

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**GABRIEL ALVES NOGUEIRA
MATEUS COSTA PEREIRA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
INCORPORADAS**

ANÁPOLIS / GO

2018

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
INCORPORADAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: WANESSA MESQUITA GODOI QUARESMA

ANÁPOLIS / GO: 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

NOGUEIRA, GABRIEL ALVES/ PEREIRA, MATEUS COSTA

Estudo do Comportamento Físico e Mecânico do Concreto Reforçado com Fibras de Aço Incorporadas

62 P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

TCC –UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. CRFA	2. Experimental
3. Comportamento Mecânico	4. Fibras
I. ENC/UNI	II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NOGUEIRA, G. A. PEREIRA, M. C. Estudo do Comportamento Físico e Mecânico do Concreto Reforçado com Fibras de Aço Incorporadas. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 62 p 2018.

CESSÃO DE DIREITOS

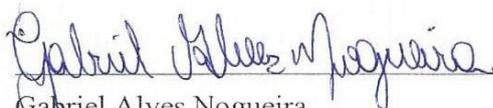
NOME DO AUTOR: Gabriel Alves Nogueira

Mateus Costa Pereira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo do Comportamento Físico e Mecânico do Concreto Reforçado com Fibras de Aço Incorporadas

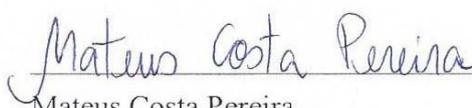
GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Gabriel Alves Nogueira

E-mail: gabrielnog20@gmail.com



Mateus Costa Pereira

E-mail: mateuscopereira1@hotmail.com

**GABRIEL ALVES NOGUEIRA
MATEUS COSTA PEREIRA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
INCORPORADAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

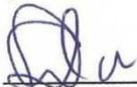
APROVADO POR:



**WANESSA MESQUITA GODOI QUARESMA, Mestre em Eng. Civil (UniEvangélica)
(ORIENTADORA)**



**ANNA PAULA BECHEPECHE, Doutora em Química (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**AGNALDO ANTÔNIO MOREIRA TEODORO DA SILVA, Especialista em Ensino da
Matemática (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 06 de JUNHO de 2018.

“Cessem as palavras e falem as obras” Santo Antônio de Pádua

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, nosso criador pois sem ele nada seria possível na vida, inclusive pelos momentos difíceis, pois estes permitiram que a minha fé fosse fortalecida.

Agradeço ao meu pai Márcio Nogueira, minha mãe Marlene Alves Moreira Nogueira, minha irmã Letícia Alves Nogueira e minha namorada Vitória Garcia Cavalcante Leite pelo apoio ao longo dos anos acadêmicos, em especial no momento de elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço ainda à engenheira Sóstena Mariano e ao arquiteto Abimael Fernandes de Jesus pois no momento em que eu mais precisei adquirir prática para tornar-se um engenheiro civil ambos me acolheram e transmitiram todo o conhecimento possível para a realização deste ato.

À minha orientadora Wanessa Mesquita pela paciência, pela disponibilidade em ajudar-me, pelo tempo dispensado a mim todas as semanas mesmo nos momentos difíceis; por seu esforço e dedicação.

Ao meu parceiro de TCC Mateus Costa Pereira pela dedicação, esforço, por todos momentos difíceis durante o tcc que superamos juntos.

A UniEvangélica, todo seu corpo docente, pelo profissionalismo e qualidade de ensino.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e com a minha formação acadêmica.

Gabriel Alves Nogueira

AGRADECIMENTOS

Inicialmente ao meu Deus, Autor da vida, por me guiar, iluminar e dar forças para prosseguir. Aos meus pais, Ana e Benedito, pelo amor, incentivo e inspiração. Ao meu irmão Abraão pelo apoio.

A toda minha família que sempre acreditou na minha capacidade de chegar até aqui, me apoiou e incentivou a continuar.

À minha orientadora Wanessa Mesquita pela disponibilidade, paciência, esforço e dedicação em ajudar-me.

Ao meu parceiro de TCC Gabriel Alves pela dedicação, esforço, por todos momentos difíceis durante o tcc que superamos juntos.

A UniEvangélica, todo seu corpo docente, pelo profissionalismo e qualidade de ensino.

Mateus Costa Pereira

RESUMO

O concreto é definido como um material composto, constituído de água, agregados e ar. Na composição pode conter também adições de outros materiais que atuam com a finalidade de melhorar o desempenho do compósito. Define-se, basicamente, como pasta o cimento misturado com água, argamassa como mistura da pasta com areia e concreto como argamassa misturada com pedra ou brita. A incorporação de fibras de aço no concreto surgiu como alternativa para melhorar o desempenho mecânico do compósito. Estudos mostram que o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta como principal vantagem a diminuição do aparecimento e propagação de fissuras, problema este recorrente no concreto estrutural. Determinado benefício é possível pois, as fibras de aço possuem geralmente em suas extremidades um certo tipo de gancho que possibilita aumentar sua ancoragem. Foram realizados traços de concreto na forma convencional e com a incorporação de fibras de aço, ambos solicitados ao mesmo tempo de cura, 7,28 e 63 dias e submetidos aos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral em datas já anunciadas. Em razão disso foi possível constatar e comprovar experimentalmente o desempenho mostrado pelo concreto reforçado com fibras de aço em comparação ao concreto convencional.

PALAVRAS-CHAVE:

CRFA. Compressão axial. Tração por compressão diametral. Concreto. Fibras de aço.

ABSTRACT

The concrete is defined as a composite material, consisting of water, aggregate and air. In concrete composition may also contain addition of other materials which operate to improve the performance of the composite. The incorporations of steel fibers in the concrete arise as an alternative to improve the mechanical performance of composite. Researches show that the concrete reinforced with steel fibers presents as the principal advantage the decreased appearance and propagation of cracks, this problem is recurrent on structural concrete. Certain benefit is only possible because the steel fibers have generally in their extremities a kind of hook that increases their anchorage. There were performed concrete tests on the conventional way and with the steel fibers, both of them requested at the same time of cure, 7, 28 and 63 days and placed to the axial compression and traction by diametric compression in a period had announced. In a purpose of that was possible to observe and verified the mechanical performance showed by the concrete reinforced with steel fibers in comparison to the conventional concrete.

KEYWORDS: Axial compression. Traction by diametric compression. Concrete. Steel fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.....	17
Figura 2 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b).....	19
Figura 3 – Representação de uma fissura no concreto reforçado com fibras.....	20
Figura 4 – Esquema de deformações (a) e distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da interface fibra-matriz; (b) de cisalhamento elástico distribuição de tensões na interface (τ) e distribuição das tensões de tração na fibra (σ).....	21
Figura 5 – Representação das tensões tangenciais (de cisalhamento) na interface fibra-matriz.....	22
Figura 6 – Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a fissuração.....	23
Figura 7 – Figura 2.6 Compósitos reforçados com fibras em teor baixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	24
Figura 8 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.....	26
Figura 9 – Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.....	30
Figura 10 – Fibra de aço utilizada, tipo A classe II. Próprios autores.....	31
Figura 11 – Laboratório Centro Tecnológico da UniEvangélica. Próprios Autores.....	32
Figura 12 – Confecção dos corpos de prova.....	40
Figura 13 – Produção do concreto no carrinho de mão. Próprios Autores.....	50
Figura 14 – (a) Primeira camada de concreto sendo compactada no molde de 100x200 mm (b) Corpos de prova prontos e etiquetados. Próprios Autores.....	51
Figura 15 – Corpos de prova na camara fria.....	51
Figura 16– (a) Rompimento dos corpos de prova em prensa de compressão axial. (b) Corpos de prova após ser submetido a compressão axial.....	52
Figura 17 – Gráfico comparativo da resistência à compressão axial do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.....	55
Figura 18 – Gráfico comparativo da resistência a tração por compressão diametral do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de corpo de provas para compressão axial.....	33
Tabela 2 – Dados para cálculo da massa unitária do agregado miúdo.....	41
Tabela 3 – Massa unitária do agregado miúdo.....	42
Tabela 4 – Dados para cálculo da massa específica do agregado miúdo.....	42
Tabela 5 – Massa específica do agregado miúdo.....	44
Tabela 6 – Granulometria amostra 1 do agregado miúdo.....	44
Tabela 7 – Granulometria amostra 2 do agregado miúdo.....	44
Tabela 8 - Granulometria média das amostras 1 e 2 agregado miúdo.....	45
Tabela 9 – Dados para cálculo da massa unitária da brita 0.....	45
Tabela 10 – Massa específica do agregado miúdo.....	46
Tabela 11– Dados para cálculo da massa específica da brita 0.....	46
Tabela 12– Massa específica brita 0.....	47
Tabela 13– Granulometria amostra 1 da brita 0.....	48
Tabela 14 – Granulometria amostra 2 da brita 0.....	48
Tabela 15 – Granulometria média das amostras 1 e 2 brita 0.....	49
Tabela 16 – Todos os resultados para o ensaio de compressão axial, prova e contraprova de acordo com as idades de ruptura.....	52
Tabela 17 – Todos os resultados para o ensaio de tração para compressão diametral, prova e contraprova de acordo com as idades de ruptura.....	53
Tabela 18 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 7 dias.....	53
Tabela 19 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 7 dias.....	54
Tabela 20 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 28 dias.....	54
Tabela 21 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 28 dias.....	54

Tabela 22 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 63 dias.....	55
Tabela 23 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 63 dias.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas,
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland,
A/C	Relação água/cimento,
ACI	American Concrete Institute,
CRF	Concreto Reforçado com Fibras,
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço,
F _{cj}	Resistência média do concreto à compressão a j dias de idade,
F _{ck}	Resistência característica do concreto à compressão,
MU	Massa Unitária,
NBR	Normas Brasileiras,
NM	Normas Mercosul,
S _d	Desvio-padrão da dosagem,

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2. Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
1.33 METODOLOGIA.....	13
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE O CRFA.....	14
2.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRFA.....	15
2.3 CONTEXTO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO CRFA NO BRASIL E NO MUNDO.....	28
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS.....	30
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.2.1 Caracterização dos Materiais.....	32
4 RESULTADOS.....	40
4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS.....	40
4.1.1 Agregado Miúdo.....	40
4.1.2 Agregado Graúdo (Brita 0)	45
4.2 ESCRITA DO TRAÇO.....	48
4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
APÊNDICE A - Cálculo do traço do concreto pelo método da ABCP.....	60

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo de introdução serão apresentados os estudos que deram início a esta dissertação. Estrutura-se uma contextualização, breve histórico e justificativa sobre o tema trabalhado, exposição dos objetivos e por fim, é descrita a estruturação do texto aqui apresentado

O concreto é definido como um material composto, constituído de água, agregados (miúdos e graúdos) e ar. Na composição pode conter também adições de outros materiais como cinza, sílica e aditivos químicos que atuam com a finalidade de melhorar ou modificar o desempenho do compósito. Define-se, basicamente, pasta como o cimento misturado com água, argamassa como mistura da pasta com areia e concreto como argamassa misturada com pedra ou brita (BASTOS, 2011).

O concreto, conforme definido, possui o comportamento frágil, baixa capacidade de deformação antes da ruptura e baixa resistência à tração. Além de todas essas características desfavoráveis, o concreto apresenta também o processo de fissuração, que pode ser de origem natural durante a cura (endurecimento da matriz) ou por processo mecânico. Várias técnicas são estudadas e aplicadas para combater esse fenômeno, sendo uma delas a incorporação de fibras na composição (BENTUR; MINDNESS, 2007).

Há registro do uso de fibras como reforço na construção desde os egípcios há mais de 3000 anos. Entretanto, a técnica de reforço de materiais cimentícios com fibra foi desenvolvido apenas nas últimas décadas. Inicialmente, a pasta de cimento foi reforçada com fibras de amianto para produção de chapas de telhados, tubos, entre outros. Posteriormente, as fibras de vidro e aço foram empregadas no reforço de argamassas de cimento (BRANDT, 2009).

Segundo Naaman (2003), desde a década de 60 têm-se visto um grande número de estudos sobre concreto armado reforçado com fibras (CRF), a maioria dos quais dedicados ao uso de fibras de aço. Então, com o desenvolvimento e propagação do estudo, as fibras de aço passaram a ser encontradas com maior frequência na composição do concreto visando um melhor desempenho mecânico, menor incidência e propagação de fissuras.

Para que se obtenham bons resultados é necessário que haja uma boa aderência entre a fibra-matriz, portanto nas fibras de aço, o estudo da geometria e arranjo das fibras no concreto estão relacionados diretamente ao aumento da eficiência do mesmo. Desta forma, o

comportamento do CRF tornou-se bastante complexo, necessitando de estudos aprofundados para o uso de forma adequada, bem como sua consideração em projeto (PASA DUTRA, 2012).

Dentre os diferentes tipos de fibras, as de aço são as mais utilizadas para aplicações estruturais e são levadas em consideração em muitas aplicações não estruturais (MEHTA E MONTEIRO, 2014, P.547). Com a finalidade de aumentar a aderência entre a matriz cimentante e as fibras de aço, as quais apresentam uma variedade no seu formato, estas têm sido alvo em pesquisas, com o objetivo de melhorar as características físicas e mecânicas dos materiais de construção.

Observa-se que o tema central dessa pesquisa será o concreto reforçado com fibras de aço e a finalidade será atestar as vantagens do uso em relação ao concreto convencional, além de verificar as principais condicionantes que possam garantir o bom desempenho deste material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Objetiva-se estudar a caracterização do comportamento físico e mecânico do concreto reforçado com fibras de aço de forma simplificada.

1.1.2 Objetivos específicos

- Abordar de maneira didática o uso do concreto reforçado com fibras de aço, buscando contribuir para a formação dos acadêmicos, do curso de Engenharia Civil, na área de construção civil e estruturas, possibilitando ao leitor uma visão mais ampla do tema dentro da engenharia civil e sociedade;
- Montar dosagem experimental e corpos de provas para incorporar as fibras de aço e então submetê-los as análises;
- Avaliar o desenvolvimento da resistência à compressão com a idade do concreto produzidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Motivado pelo avanço tecnológico, construções mais elaboradas e processos construtivos mais eficientes, os materiais utilizados na construção civil têm atingido cada vez

mais complexidade a respeito da sua resposta constitutiva. Segundo Ferreira (2002), a utilização dos concretos de cimento Portland reforçados com fibras de aço, vem ganhando diversas aplicações em obras hidráulicas, em pavimentos viários rígidos, em túneis ferroviários e rodoviários e pisos industriais, uma vez que o material pode conduzir estruturas mais duráveis, esbeltas e, em consequência, a obras mais econômicas.

De forma similar ao que ocorre no caso das armaduras no concreto armado, as fibras de aço são incorporadas ao concreto de modo que o regime de ruptura do material seja modificado verificando um estado mais dúctil e restringindo a propagação de fissuras.

1.3 METODOLOGIA

Visando atingir os objetivos propostos neste trabalho será desenvolvido um programa experimental que contribuisse para o entendimento comparativo das características físicas e mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço e o convencional, para confiabilidade dos resultados serão utilizadas matrizes cimentícias de prova e contraprova para cada data de ruptura estipulada em norma vigente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução, onde se contextualiza o tema tratado, expõe os objetivos gerais e seus desdobramentos específicos, justificativa, bem como uma apresentação da metodologia a ser empregada e a estruturação do texto.

Logo, o capítulo 2 traz o referencial teórico onde será discutido o estudo da arte do concreto reforçado com fibras de aço.

Já o capítulo 3 descreve o programa experimental do estudo, neste apresenta-se os materiais utilizados, os traços e porcentagens de fibras a serem utilizadas e os métodos de análises adotados para realização dos ensaios.

Os resultados obtidos, as análises e discussões sobre o experimento são tratadas no capítulo 4.

Por fim, o capítulo 5 é dedicado às considerações finais do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado o objeto de estudo da dissertação, subdividido em: aspectos gerais do CRFA, características e propriedades mecânicas do CRFA e por fim um contexto sobre a utilização do CRFA no Brasil. Estes conceitos serão aplicados em conjunto com a metodologia a ser utilizada para o melhor entendimento dos resultados obtidos ao longo da pesquisa.

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE O CRFA

O material composto, também denominado de compósito, é constituído da junção de dois elementos: a matriz e o reforço, no caso, o concreto é a matriz, que por si só pode ser entendido como um compósito, e a fibra de aço é o reforço. A matriz tem o papel de preencher os espaços, dar forma a estrutura e sustentar as fibras. Já as fibras são os componentes que realçam as propriedades mecânicas e químicas do compósito. A junção de ambos resulta em um composto final com propriedades superiores àquelas dos materiais originais separadamente ou até mesmo ainda não existentes nos mesmos. Podendo este, apresentar melhor qualidade, resistência e aparência.

O concreto reforçado com fibras é um material produzido a partir da mistura de cimento, água, agregados de diferentes tamanhos (miúdos e graúdos) e fibras discretas e descontínuas. O mesmo é um material maleável, processado pelos próprios construtores e engenheiros civis, onde a combinação das fases em diferentes proporções e adição de aditivos altera as propriedades a fim de atender melhor a sua função.

As fibras de aço são adicionadas ao concreto, pois, funcionam como um obstáculo ao desenvolvimento das fissuras. As fissuras é um fato presente no concreto uma vez que as microfissuras se apresentam desde o lançamento do concreto, durante a cura e podem estas virarem microfissuras após a adição de carga. Mehta e Monteiro (2014) dizem que as fissuras prejudicam muito mais o concreto quando solicitado à tração do que à compressão, sendo que a relação entre as resistências à tração e compressão fica geralmente em torno de 0,07 a 0,11. Ocorre que, quando o concreto é tracionado, as fissuras se propagam transversalmente à direção principal de tensão. Nas microfissuras, as fibras atuam como ponte de transferência, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas e impedindo a sua propagação instável (FIGUEIREDO, 2000).

2.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRFA

As fibras de aço são elementos descontínuos, cujo comprimento longitudinal é bem maior que a maior dimensão da seção transversal, produzidas a partir de fios de aço carbono ou aço inoxidável trefilados, que são cortados e comercializados em diversos comprimentos e diâmetros.

(NBR 15530:07¹ *apud* FIGUEIREDO *et al*, 2008) apresenta uma tipologia e classificação das fibras de aço, correlacionando-as aos requisitos e tolerâncias específicas do material. São previstos na Norma três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica, associada ao perfil longitudinal da fibra de aço:

- ◆ Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- ◆ Tipo C: fibra de aço corrugada;
- ◆ Tipo R: fibra de aço reta.

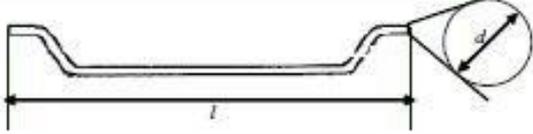
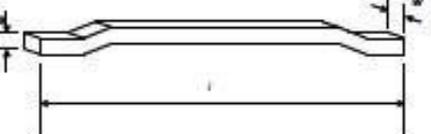
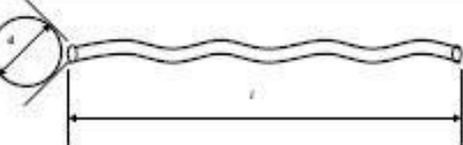
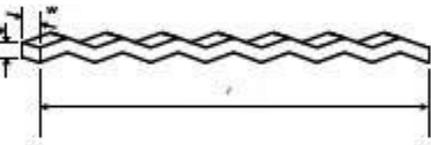
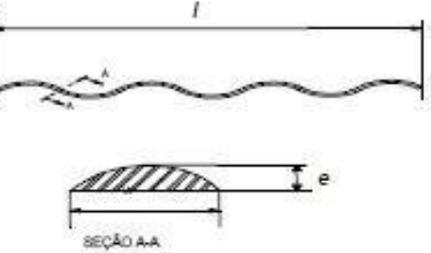
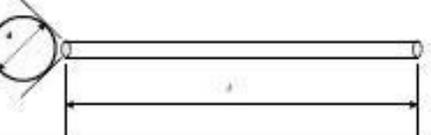
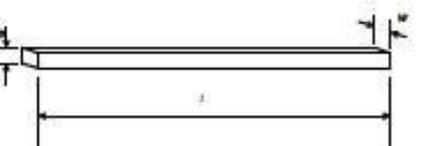
Já o formato da seção transversal irá depender do tipo de aço utilizado na produção da fibra que pode ser trefilado ou laminado. Assim, além dos tipos, a especificação brasileira prevê três classes de fibras, as quais foram associadas ao tipo de aço que deu origem as mesmas (FIGUEIREDO *et al*, 2008):

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

A correlação do tipo, classe e geometria da fibra é mostrada na figura 1 a seguir.

¹ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2007, 7p.

Figura 1 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.

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

Fonte: Figueiredo *et al.*, 2008.

Por possuírem alta resistência e alto módulo de elasticidade, as fibras de aço atuam como um reforço do concreto endurecido, podendo até substituir a armadura convencional em algumas aplicações, são destinadas ao reforço primário do concreto, ou seja, não se destinam somente à redução da fissuração e o aumento da ductilidade do material, mas também são

capazes de proporcionar um ganho de desempenho mecânico, podendo, em algumas situações, ser o único elemento de reforço existente (PASA DUTRA, 2012).

As fibras de aço destinadas ao reforço do concreto segundo Bentur e Mindess (2007) possuem diâmetro 5-500 μm , módulo de elasticidade de 200 GPa, resistência a tração de 0,5-2,0 GPa e alongamento na ruptura de 0,5-3,5 %. Pasa Dutra (2012) diz que se deve estudar a eficiência da fibra e a fração volumétrica.

A eficiência das fibras é controlada pela sua resistência ao arrancamento, o que, por sua vez, depende da sua aderência à matriz. Pasa (2007) mostra que o comportamento do compósito de fibras e concreto é dependente da sua capacidade para ligar as fissuras. Esta capacidade está relacionada com o teor de fibras dispersas na mistura e a eficiência da interação fibra-matriz, que, por sua vez, é influenciada pela geometria, propriedades mecânicas das fibras e pela composição da matriz.

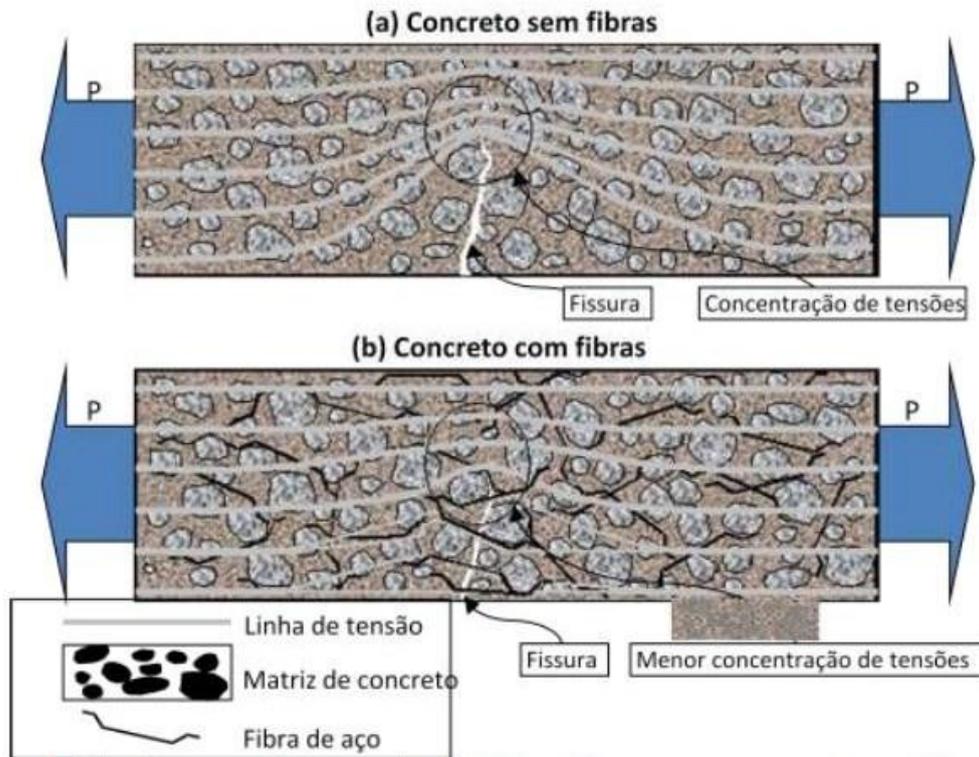
Em fibras com seção uniforme, a resistência ao arrancamento geralmente aumenta com um aumento do comprimento da fibra. Entretanto, o uso de fibras muito longas ou com alto fator de volume pode causar a diminuição da trabalhabilidade da mistura de concreto e provocar a distribuição não uniforme das fibras. O aumento da resistência ao arrancamento pode ser obtido também por meio do emprego de fibras com superfícies deformadas ou com ganchos nas extremidades. Em geral, apesar da ruptura do CRFA envolver a ruptura de algumas das fibras, é normalmente regida pelo efeito de arrancamento. Uma vantagem deste tipo de ruptura é de ser gradual e dúctil provocando no concreto um aumento de ductilidade (ACI 544.1R-96, 2002).

Fração volumétrica é o parâmetro que quantifica a relação entre o volume de fibras e o volume de concreto reforçado, outra característica importante para estudo do CRFA. Nas fibras de aço, a adição de 1 % em volume corresponde a aproximadamente 80 kg de fibra para 1 m^3 de concreto.

Por outro lado, quando o concreto se encontra submetido à tração ou à flexão, as tensões se concentram nas extremidades das microfissuras, provocando um alargamento incontrolado das mesmas e fazendo com que a ruína do material se apresente de forma frágil. No caso do concreto com adição de fibras, ocorre um retardo no alargamento das fissuras. As fibras agem como pontes de ligação, transferindo as solicitações de um lado a outro da matriz e minimizando as tensões nas extremidades das fissuras (PASA DUTRA, 2012). A Figura 2 mostra o efeito de “costura”, redução da propagação da fissura, que as fibras propiciam ao

concreto e o esquema de distribuição de tensões para um concreto sem e com reforço de fibras (HOLANDA, 2002). Observa-se, também, a redução da concentração de tensões nas extremidades das fissuras.

Figura 2 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b).



Fonte: Figueiredo, 2000²apud Figueiredo, 2011.

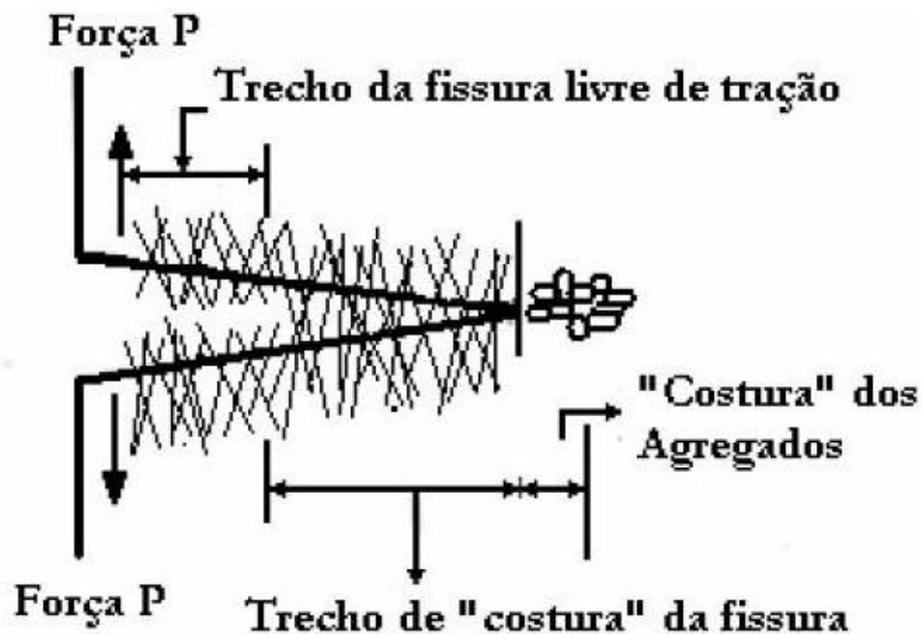
Já se sabe que as fibras reduzem o aparecimento e diminui a velocidade de propagação das fissuras, sendo necessária uma maior quantidade de energia para a abertura e propagação das mesmas. Deste modo, a ruína do compósito se torna menos frágil, propiciando eventual ganho de ductilidade da estrutura. Segundo Figueiredo (2011), o CRFA se torna um material pseudo-dúctil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual a esforços nele aplicados mesmo após sua fissuração. Além disso, a primeira fissura não consegue levar o compósito à ruína e, conseqüentemente, há um aumento da resistência do material à fissuração, conforme afirma Holanda (2002).

²FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. [s.e.] São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 2000. 68 f.

(Wecharatana e Shah, 1983³ *apud* Pasa, 2007) representa na Figura 3 uma fissura no CRF. Nela é possível encontrar as três zonas distintas existentes na fissura do CRF:

- ◆ A zona livre de tração, onde a matriz se encontra fissurada e as fibras rompidas ou arrancadas da matriz;
- ◆ A zona de “costura” das fissuras pelas fibras, no qual a tensão é transferida da matriz para as fibras por atrito;
- ◆ A zona de microfissuração da matriz, onde a transferência de tensão de tração ocorre pelo próprio compósito.

Figura 3 – Representação de uma fissura no concreto reforçado com fibras.



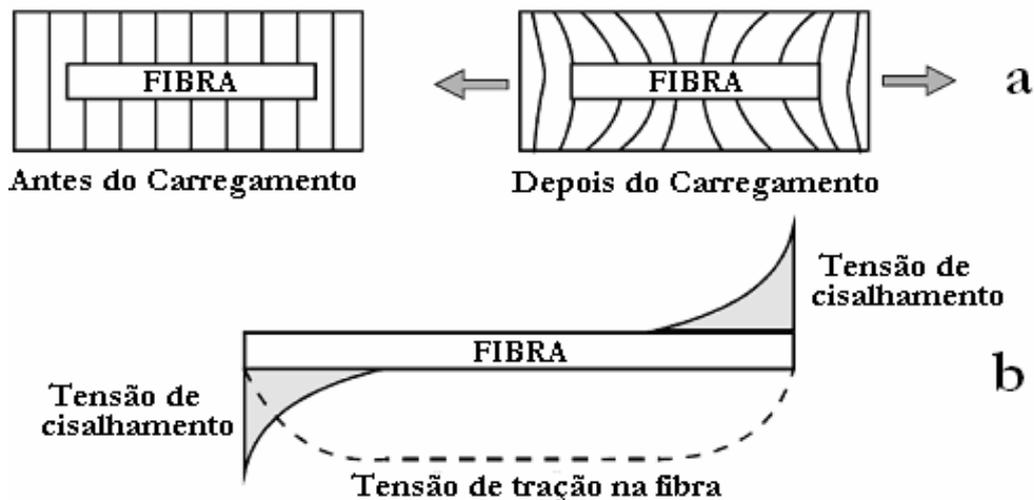
Fonte: adaptado de Wecharatana e Shah, 1983²*apud*Pasa, 2007.

Segundo Bentur e Mindess (2007) a eficácia das fibras para melhorar o desempenho mecânico da matriz frágil depende, em grande parte, das interações fibra-matriz. Três tipos de interações são particularmente importantes: adesão física e química; atrito e a ancoragem mecânica induzida por deformação na superfície da fibra ou por geometria (por exemplo, frisos, ganchos, fibras deformadas). Antes da fissuração, o mecanismo dominante de transferência de tensão é o elástico e os deslocamentos longitudinais na interface da fibra e da matriz são

³WECHARATANA, M. e SHAH, S. P., A Model for predicting fracture resistance of fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 819-829, 1983.

geometricamente compatíveis. Em função da diferença entre os módulos de elasticidade da fibra e da matriz, tensões tangenciais são desenvolvidas na interface, distribuindo a carga externa entre a fibra e a matriz. Os autores também afirmam que a distribuição das tensões tangenciais ao longo da interface fibra-matriz não é uniforme, conforme se observa na Figura 4(a). A tensão de cisalhamento tem um valor máximo nas extremidades da fibra e cai para zero no centro. É nesta zona de extremidade que a tensão é transferida da matriz para a fibra. A tensão de tração aumenta a partir da extremidade da fibra e se move para dentro, atingindo um máximo no centro, conforme Figura 4(b).

Figura 4 – Esquema de deformações (a) e distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da interface fibra-matriz; (b) de cisalhamento elástico distribuição de tensões na interface (τ) e distribuição das tensões de tração na fibra (σ).



Fonte: adaptado de Bentur e Mindess, 2007.

Em avançados estágios de carga, ocorrem descolamentos entre a fibra e a matriz e o mecanismo de transferência de tensão entre ambas, passa a ser por atrito, ocorrendo deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. A tensão de atrito desenvolvida é uma tensão tangencial, considerada como sendo uniformemente distribuída ao longo da interface. Este processo tem uma maior importância na pós-fissuração, onde as fibras atuam como pontes de ligação através das fissuras, controlando, inclusive, propriedades como a resistência e a deformação específica do compósito (Bentur e Mindess, 2007).

A transferência de tensão elástica para transferência de tensão por atrito ocorre quando as tensões tangenciais na interface fibra-matriz excedem o limite de resistência ao cisalhamento. Está pode ser referenciada como resistência de cisalhamento de adesão (τ_{au}). Quando esta tensão

é excedida, o descolamento entre fibra e matriz é iniciado e tensões de atrito passam a atuar na interface. A máxima tensão tangencial de atrito que pode suportar na interface é denominada (τ_{fu}), resistência de cisalhamento de atrito. Na Figura 5 pode ser observada a representação das tensões tangenciais na interface fibra-matriz.

Figura 5 – Representação das tensões tangenciais (de cisalhamento) na interface fibra-matriz.



Fonte: adaptado de Bentur e Mindess, 2007.

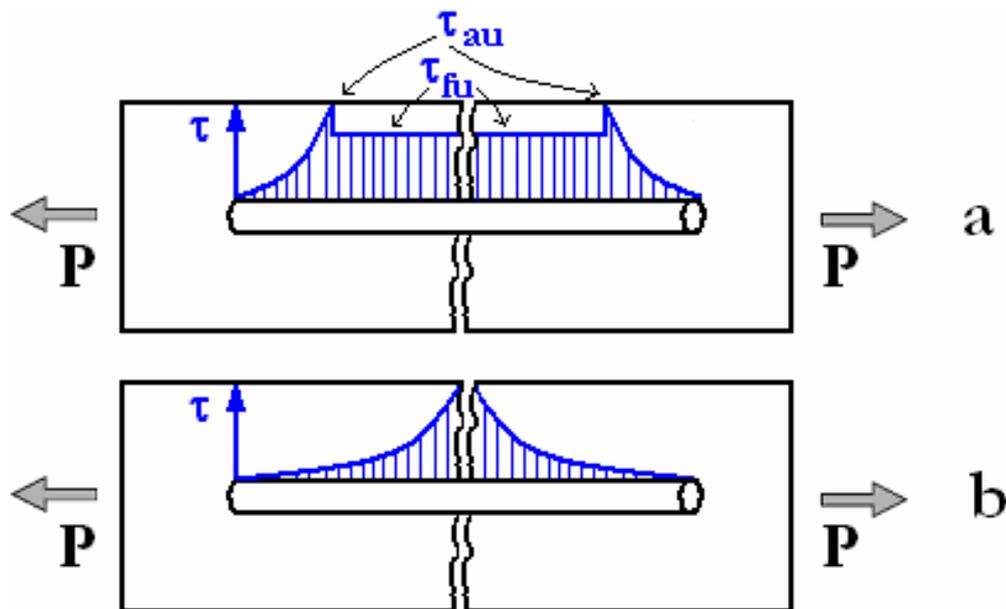
A transição do tipo de transferência de tensão, por aderência elástica (antes do descolamento) e por atrito (após o descolamento) é um processo gradual, durante o qual ambos os mecanismos são efetivos. Quando o descolamento ocorre anteriormente ao início da fissuração da matriz, o efeito combinado destes dois mecanismos pode influenciar a forma da curva tensão-deformação do compósito. A ocorrência do descolamento é dependente das propriedades dos materiais que constituem o compósito e da sua interação, como a resistência de aderência e a resistência à tração da matriz.

Observado em mesoescala o CRFA pode-se considerá-lo um material trifásico, constituído de partículas de agregados e fibras dispersos em uma matriz de cimento. Essas três fases chamam-se fase de agregados, fase de fibras e fase matriz. Analisando melhor pode-se considerar uma terceira fase chamada de zona de transição. Considerando o CRFA, os processos interação da fibra-matriz ocorrem principalmente em um volume relativamente pequeno da matriz circundante da fibra. Esta zona na matriz da microestrutura pode ser bastante

diferente daquela da matriz da macroestrutura, os efeitos provocados nem sempre são previstos por modelos analíticos que assumem uma matriz uniforme até à superfície da fibra (PEREIRA JR, 2014).

Quando o descolamento das fibras ocorre após a fissuração, este é influenciado pela formação e desenvolvimento das fissuras, bem como a posição das fibras na matriz. Na Figura 6 (a) e (b) observa-se a distribuição de tensões de cisalhamento da interface fibra-matriz imediatamente após a fissura, quando o descolamento ocorre antes e após a fissuração.

Figura 6 – Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a fissuração.



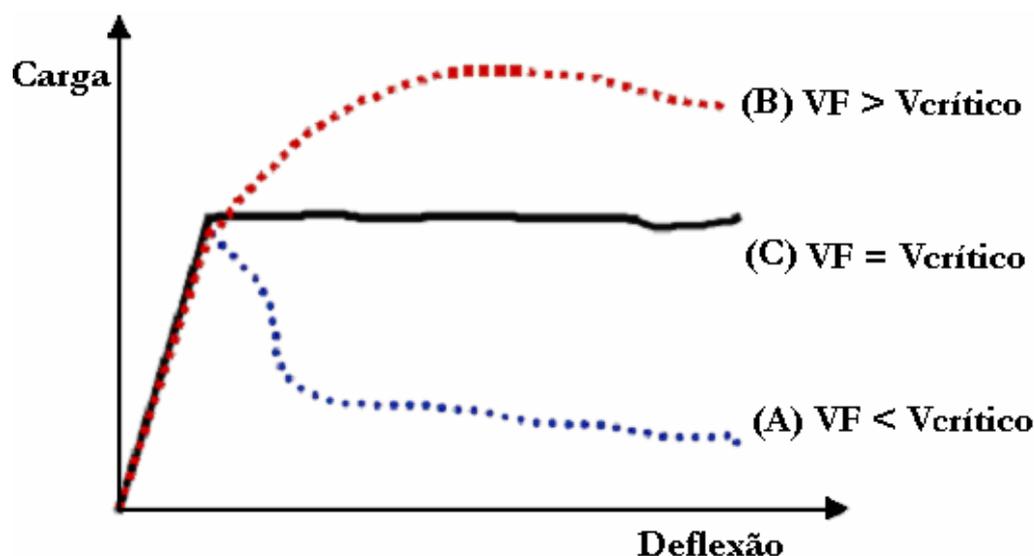
Fonte: adaptado de Bentur e Mindess, 2007.

A tensão de cisalhamento desenvolvida paralela à interface fibra-matriz é um importante mecanismo de transferência de carga entre a fibra e a matriz, mas também devem ser considerados os efeitos das tensões e deformações normais que surgem na interface. As tensões normais são resultantes do efeito de Poisson, de alterações de volume e de carregamentos biaxiais e triaxiais, podendo causar enfraquecimento da interface e um desligamento prematuro das fibras e alterando a resistência ao atrito, que é sensível a tensões normais.

Para melhor aprofundamento no mecanismo de ponte de transferência de tensões as fibras devem ter comprimento adequado e correta proporção em volume. Neste sentido, encontram-se na literatura dois parâmetros importantes: o volume crítico V_{crit} e o comprimento crítico l_c das fibras de aço.

Segundo Figueiredo (2000), o volume crítico corresponde ao teor de fibras que permite a manutenção da capacidade cortante do compósito após a ruptura da matriz. Ou seja, acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamento crescente mesmo após a ruptura da matriz; enquanto que abaixo do volume crítico, este fenômeno não ocorre. Este conceito se encontra ilustrado na Figura 7, onde se apresentam curvas de carga por deflexão em prismas de concretos com fibras rompidos à flexão. Existe um trecho elástico linear inicial correspondente ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito e outro, similar a um patamar de escoamento, onde se pode diferenciar o comportamento do concreto reforçado com teores abaixo, acima e iguais ao volume crítico.

Figura 7 – Compósitos reforçados com fibras em teor baixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.



Fonte: adaptado de Figueiredo, 2000.

(Avestonet *al.* 1971⁴ *apud* Figueiredo, 2000) propõem uma modelagem para a determinação do volume crítico a qual focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção do esforço principal. Este modelo não condiz com a realidade do material CRFA, onde as fibras são descontínuas e distribuídas randomicamente. Para corrigir estes desvios são utilizados os chamados fatores de eficiência, que permitem uma maior aproximação do V_{crit} teórico para o V_{crit} experimental. Assim o volume crítico é calculado por meio da Equação 2.1, considerando os efeitos de orientação da fibra (Figueiredo, 2000).

⁴AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. Single and multiple fracture. *In: Conference on the Properties of Fiber Composites*, 1971, London. **Proceedings...** NPL Conference, National Physical Laboratory, 1971. [s.v.], p. 15-26.

$$V_{crit} = \frac{\varepsilon_{mu} E_c}{\sigma_{fu} \eta_1} \quad (2.1)$$

Onde, ε_{mu} é a deformação última de ruptura da matriz; E_c é o módulo de deformação elástica da matriz; σ_{fu} é a resistência à tração da fibra e η_1 é o fator de correção do volume crítico em função da orientação das fibras.

Adotando os seguintes valores de referência para CRFA: $\varepsilon_{mu} = 100 \cdot 10^{-6}$, $E_c = 25000$ MPa; $\sigma_{fu} = 1100$ MPa e $\eta_1 = 0,20$ correspondente as fibras de 3 direções (Hannant, 1978⁵ *apud* Figueiredo 2000), obtém-se um $V_{fcrit} = 1$ %.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), o volume crítico para fibras distribuídas aleatoriamente em três direções é dependente da resistência da matriz e do fator de forma das fibras (l_f/d) e é calculado por meio da Equação 2.2.

$$V_{crit} = 2 \frac{\sigma_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{l_f} \frac{1}{d} \quad (2.2)$$

Onde, σ_{mu} é a resistência à tração da matriz sem fibras; τ_{fu} é máxima tensão tangencial (cisalhamento) de atrito, variando de 1 MPa a 10 MPa (Bentur e Mindess, 2007); l_f é o comprimento da fibra e d é o diâmetro da fibra. Adotando-se os seguintes valores de referência: $\sigma_{mu} = 3$ MPa; $\tau_{fu} = 7$ Mpa e $l_f/d = 60$, obtém-se um $V_{crit} = 1,4$ %.

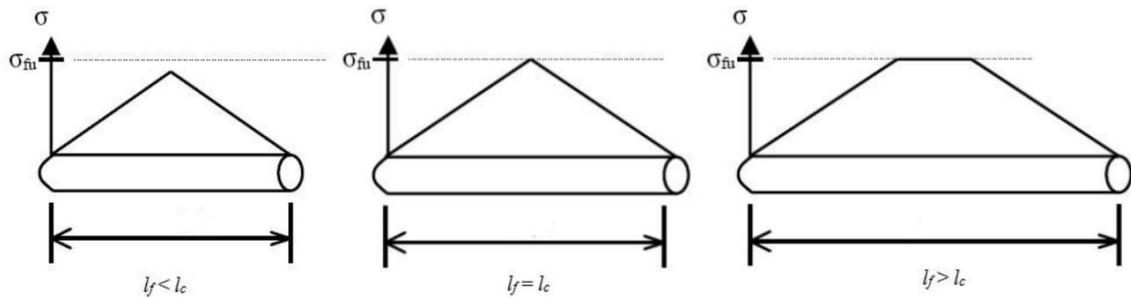
O segundo parâmetro importante na transferência de tensões, o comprimento crítico l_c , é definido como o comprimento de fibra mínimo necessário para o desenvolvimento de tensão na fibra igual à sua resistência última (Bentur e Mindess, 2007). Se o $l_f < l_c$, não existe comprimento suficiente para gerar na fibra uma tensão igual à sua resistência e a fibra não é assim utilizada eficientemente. Somente se o comprimento da fibra exceder o comprimento crítico é que a maioria das fibras alcançará a tensão de escoamento ou a resistência à tração, mobilizando desta forma a maior parte do potencial de reforço das mesmas.

Ainda quanto ao comprimento da fibra, é importante que haja uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, possibilitando a atuação destas como reforço do concreto como um todo, e não como mero reforço de segmentos da pasta de cimento (Figueiredo, 2000).

⁵HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. [s.e.] New York: wiley-interscience, 1978.[s.v.], 219p.

Na Figura 8 é possível observar as possíveis distribuições de tensão ao longo de uma fibra em função do seu comprimento crítico.

Figura 8 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.



Fonte: adaptado de Bentur e Mindess, 2007.

Em análise na macroescala, há muitos trabalhos experimentais que estudam o comportamento e as características do CRFA. Para melhor exemplificar Kang; Bittencourt (1999) apresenta o concreto como um material de múltipla escala. Nota-se que na escala nanométrica (10^{-9} m), pode-se distinguir a estrutura atômica de cimento e agregados. Na escala micrométrica (10^{-6} m), é possível identificar grãos individuais de cimento antes de endurecimento. Nessa escala, pode ser observada ainda a estrutura complexa de poros. Na escala milimétrica (10^{-3} m), podem ser distinguidas as partículas individuais de areia e agregados. Na escala métrica (1 m), tem-se a escala de laboratório onde são executados os experimentos com o concreto (simples ou armado). Para escalas ainda maiores (de 10^2 m a 10^3 m), encontram-se as estruturas correntes de construção na engenharia civil. Portanto os trabalhos experimentais logo citados estão na escala métrica.

Ainda nesse contexto, Bastos (1999) analisou experimentalmente dormentes de concreto protendido reforçado com fibras de aço e observou-se que as fibras aumentaram o momento fletor e o momento último de primeira fissura, aumentaram também, significativamente a força de início de escorregamento dos fios de protensão e reduziram o espaçamento e a abertura das fissuras. As fibras também acrescentaram grande ductilidade aos dormentes e diminuíram a tensão nos fios de protensão nos estágios mais avançados do carregamento. Sob ação dinâmica, as fibras reduziram a tensão nos fios de protensão mais tracionados em aproximadamente 100 %, o que elevou significativamente a resistência do dormente à fadiga.

Holanda (2002) realizou experimento para analisar a resistência e ductilidade do concreto com fibras de aço em lajes, encontrou, em todas as series de ensaios que a resistência e a ductilidade aumentaram com o aumento do volume de fibras de aço adicionadas ao concreto. Mostrou também que as vigas reforçadas com fibra de aço apresentaram uma ruína bem mais dúctil, com maior solicitação da armadura de flexão, aparecendo fissuras no momento fletor máximo.

Reis (2003) reforçou vigas de seção T com fibra de aço curta e observou que a fibra proporciona maior ductilidade ao material. A fibra também mostra maiores aumentos de resistência à tração na flexão e que o aumento da resistência é linearmente proporcional ao aumento de fibras.

Gonçalves (2003) testou diferentes tipos de fibras em vigas simplesmente apoiadas e observou que as vigas com fibras de aço obtiveram um desempenho significativamente melhor, estas vigas tiveram menores espaçamentos entre fissuras e aberturas destas e conseqüente maior rigidez e capacidade portante. Nas vigas, as fibras de aço se comportaram com uma armadura transversal adicional reduzindo as tensões nos estribos. Em alguns casos, as fibras de aço também modificaram o modo de ruptura das vigas: de cisalhamento para flexão. Portanto, neste estudo, as vigas com fibras de aço apresentaram um melhor desempenho em relação as outras fibras estudadas.

Souza (2006) realizou uma análise numérica objetivando a determinação da energia de fratura de vigas de concreto armado empregando programas comerciais de elementos finitos. A validação da modelagem foi realizada com vigas e primas de concreto com e sem adição de fibras. Notou-se que com a utilização de fibras metálicas diminui consideravelmente a armadura longitudinal para combater esforços de flexão.

Danin (2010) investigou a influência das fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto e na aderência aço-concreto. E obteve tanto com os ensaios experimentais quanto da modelagem que as fibras estudadas exercem pequena influência na resistência ao arrancamento para corpos de prova com barra de 10 mm. Por outro lado, a influência das mesmas na resistência ao fendilhamento do cobrimento de concreto é significativa.

Góis (2010) analisou o comportamento dos concretos fluídos reforçados com fibras de aço, submetidos às tensões de tração, avaliando a influência do fator de forma e da fração volumétrica e observou que os compósitos com fibras com maior fator de forma e maior fração volumétrica tendem a ser mais eficientes na resistência à tração dos compósitos fluídos.

Curado (2011) objetivou-se estudar uma ligação resistente à força normal de tração constituída pelo traspasse de barras dobradas em forma de laço desenvolvido um programa experimental onde foram adotados como variáveis o diâmetro de dobramento do laço e o teor de fibras de aço adicionadas ao concreto. No caso dos ensaios de arrancamento, para avaliação da resistência da ancoragem, foram também considerados diferentes comprimentos de ancoragem. As fibras proporcionaram acréscimos na resistência das ancoragens e das ligações, além de terem permitido a redução do comprimento de ancoragem dos laços.

Guetti (2012) analisou experimentalmente o comportamento mecânico do concreto auto adensável e do concreto auto adensável reforçado com fibras de aço. Apesar da caracterização dos compósitos, o estudo não apresentou diferença significativa entre as amostras. Porém pode-se ressaltar que entre a metodologia de correlação de imagem digital cujos resultados foram plenamente consistentes com os das demais metodologias usadas, mostrou-se como uma metodologia de baixo custo, eficiente e precisa, plenamente aplicável não só aos testes adotados no trabalho citado, mas como aos demais testes experimentais em corpos-de-prova no ambiente de laboratório, visando à caracterização de materiais.

Oliveira (2012) intencionou avaliar diferentes procedimentos de confecção de consolos de concreto moldados em duas etapas, onde molda-se primeiramente o pilar e após a desforma, moldam-se os consolos. Foram analisados consolos com e sem a incorporação de fibras metálicas, tanto com armadura de costura como em substituição a ela, variando o tratamento da junta e a forma da ligação do tirante do consolo ao pilar. As fibras metálicas adicionadas ao concreto não influenciaram a abertura da interface consolo-pilar dos consolos moldados em duas etapas, mas reduziram substancialmente nos consolos monolíticos.

Em termos de aplicações práticas do CRFA, suas vantagens de emprego são bem conhecidas do meio técnico internacional e começam a ser conhecidas também nacionalmente. Mindess, 1995⁶ *apud* Figueiredo, 2000 chega a apontar a utilização de fibras no concreto como de grande interesse tecnológico mesmo em estruturas convencionais de concreto armado, onde, em conjunto com o concreto de elevado desempenho, aumenta a competitividade do material quando comparado com outras tecnologias como a das estruturas de aço, por exemplo.

Entre os empregos de CRFA estão os pavimentos e capeamentos, como são os casos dos pavimentos rodoviários e malhas urbanas, pavimentos portuários, de pontes, pistas de

⁶MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. *In*: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials, 1995, Toronto, Canada. **Proceedings...** Toronto, Canada, 1995.[s.v.], p. 1-12.

aeroportos e bases aéreas, pisos sem juntas e capas de compressão; No Brasil, segundo os fabricantes de fibras, já se superou a marca dos dois milhões de metros quadrados de pavimentos industriais executados com fibras de aço. Isto ocorre apesar de alguns aspectos de sua tecnologia ainda carecer de informações básicas e apresentarem uma grande necessidade de desenvolvimento e popularização. No entanto, algumas vantagens tecnológicas do uso de fibras de aço em pavimentos são inquestionáveis, quando comparado ao uso das telas de aço soldadas.

Destaca-se, também, a utilização de CRFA em pisos industriais pesados e leves, armazéns de alta densidade, pátios de manobra de caminhões e transportadoras pesadas. Outros empregos seriam em estruturas hidráulicas, como na recuperação e construção de diques; estruturas marinhas, como em flutuadores para marinas; reparos e reabilitações, como em reparos de viadutos, pontes e outras estruturas; concreto projetado, como nos revestimentos de túneis e estabilização de maciços rochosos.

Ainda, diversas aplicações em pré-moldados, tais como anéis segmentados de túneis, tubos de concreto, tampas de bueiro, blocos de fundação, painéis e placas, tanques para esgotos banheiros para celas, blocos de fundação e algumas estruturas resistentes à explosão.

2.3 CONTEXTO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO CRFA

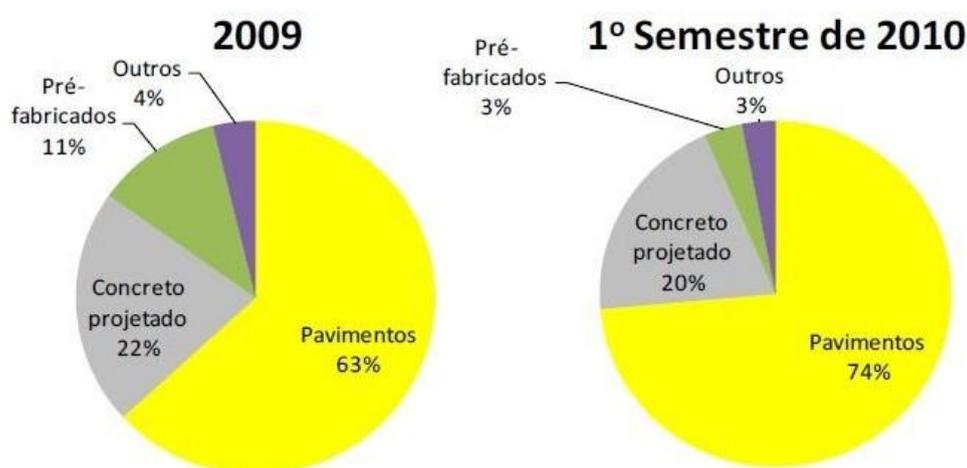
No Panorama nacional, observa-se que a utilização do CRFA quanto ao nível técnico é relativamente atrasado quando comparada com outros países. Na Europa o CRF já é utilizado para lajes suspensas como único sistema de reforço (DESTREÉ, 2009; BARROS et al, 2012). No Brasil o emprego do CRFA está voltado primordialmente para obras de infraestrutura, como por exemplo as obras de saneamento básico e de transportes.

Atualmente, o mercado brasileiro de fibras é centralizado em aplicações de baixo consumo de fibras e estruturas contínuas. Num levantamento realizado pelo autor junto aos principais fabricantes e representantes nacionais de fibras para reforço do concreto, foi possível verificar que as aplicações do CRF são muito concentradas. Como se pode observar da Figura 8, o mercado de fibras de aço tem como principal aplicação os pavimentos industriais. Em segundo lugar vem o concreto projetado e em terceiro, os pré-moldados (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda nesse contexto, Figueiredo (2011) observa que haverá provavelmente uma queda na fração do mercado que corresponde aos pré-moldados em comparação com os dados

referentes a 2009 e ao primeiro semestre de 2010. Fato devido esse ao encerramento da produção de segmentos para a obra da Linha Amarela do Metrô de São Paulo. Por que razão, o mercado que continuaria constante seria o de pavimentos em conjunto com o concreto projetado e os pré-moldados, que segundo o Autor formam a quase totalidade de aplicações de fibras de aço no Brasil.

Figura 9 – Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.



Fonte: Figueiredo, (2011).

Podendo ser descrita como empírica, a prática de utilização do CRF no Brasil, observa-se que há total ausência de procedimentos de qualidade do compósito e a utilização de teores fixos de fibras. Apesar de custar cerca de quinze vezes mais que o cimento, a dosagem da fibra não recebe a mesma atenção deste para a definição de teores mais precisos (FIGUEIREDO, 2011).

No entanto, há hoje um novo horizonte de evolução para o CRF sendo aplicado como material estrutural. Este horizonte surgiu a partir da publicação do novo o qual traz uma nova concepção que permitirá um maior conforto para os projetistas no dimensionamento de estruturas utilizando este tipo de compósito (FIGUEIREDO, 2014).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o processo de confecção dos corpos de prova para os testes mecânicos, visuais e a descrição do processo experimental.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

A classificação da fibra de aço utilizada, além de definir o tipo de aço utilizado na produção da fibra, irá determinar também a forma da seção transversal, o que proporcionará condições de definir os requisitos geométricos finais da mesma em conjunto com o nível de resistência mínima do aço. De acordo com Figueiredo (2011) apesar dessa classificação não tipificar as fibras em função do desempenho, seja quanto à trabalhabilidade ou mesmo quanto à tenacidade, ao adotar essas classificações possibilita estabelecer requisitos mínimos que poderão ser correlacionados com o desempenho final do CRFA.

A fibra de aço utilizada neste trabalho, ver figura 9, foi fornecida pelo laboratório centro tecnológico UniEvangélica, podendo caracterizar as mesmas de acordo com a NBR 15530 (2007), do tipo A pois apresenta ancoragem nas extremidades e Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio, sendo assim apresenta seção transversal circular, já demonstrado na Figura 1.

Figura 10 – Fibra de aço utilizada, tipo A classe II.



Fonte: Próprios autores, 2018.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento que protagonizou o estudo de caso deste trabalho foi conduzido no período de outubro de 2017 e janeiro de 2018, no laboratório CENTRO TECNOLÓGICO do Centro Universitário da Faculdade Evangélica de Anápolis, no município de Anápolis – GO (Figura 10). O local encontra-se na latitude $16^{\circ} 19' 00''$ S e longitude $48^{\circ} 57' 10''$ W, estando aproximadamente a 1017 m de altitude, apresentando um clima Aw, tropical de savana, megatérmico, no inverno apresenta menos pluviosidade que no verão, com temperatura média anual do ar de $22,2^{\circ}\text{C}$, precipitação média anual de 1441 mm, o mês mais seco é Junho e tem 7 mm de precipitação, a maioria da precipitação cai em Janeiro, com uma média de 245 mm. Dados esses relevantes para a caracterização do ambiente em que o experimento foi realizado.

Figura 11 – Laboratório Centro Tecnológico da UniEvangélica.



Fonte: Próprios Autores, 2018.

Foi considerado para montagem do experimento a hipótese de que as fibras de aço aumentariam a resistência mecânica do concreto convencional, conforme Figueiredo (2011).

Baseado nisso foi montado o plano experimental qualitativo de dois tratamentos (concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço) para dois testes mecânicos (compressão axial e tração por compressão diametral), foi confeccionado 24 (vinte e quatro) corpos de prova para ter prova e contraprova de cada traço, e assim testar resistência axial a compressão e a resistência à tração por compressão diametral com idade de 7, 28 e 63 dias, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Número de corpo de provas para compressão axial.

Resistências	Teste	Reforçado com fibras incorporadas	Convencional
20 MPa	Compressão axial	6	6
20 MPa	Tração por compressão diametral	6	6

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O processo de dosagem de concreto é importante para entendermos a influência do Cimento Portland e da água na resistência final do Concreto. Para o cálculo dos traços referente a resistência de 20 MPa utilizado o método de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

Para realizar os cálculos pelo método ABCP primeiro é preciso conhecer as propriedades dos materiais que serão utilizados. O concreto simples é composto por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. O Cálculo é feito para 1 m³ de concreto.

Pelo método ABCP, após obtidos os valores da massas específicas e massa unitárias dos materiais e tendo em mãos o fck e abatimento desejados, pode-se calcular o traço, procedimento este disponível no Apêndice A.

3.2.1 Caracterização dos materiais

Foi utilizado em todas as análises os seguintes instrumentos:

- Agitador mecânico de peneiras;
- Balanças;
- Balde;
- Bandejas metálica retangular;
- Enxada;
- Câmara fria;
- Carro de mão;
- Cesto de arame com abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm;
- Concha;
- Corpo de prova 100x200 mm;
- Escova;
- Estufa;

- Frasco aferido de 500 centímetros cúbicos;
- Funil de vidro;
- Haste de compactação metálica com superfície circular plana;
- Haste reta de aço, com 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento;
- Molde tronco-cônico metálico de 40 mm de diâmetro superior, 90 mm de diâmetro inferior e 75 mm de altura, com espessura mínima de 1 mm;
- Molde tronco de cone com diâmetro inferior 200 mm e superior de 100 mm;
- Pá;
- Placa de base com dimensão de 500 mm;
- Peneiras serie normal e intermediaria com tampa e fundo de acordo com a NM-ISO 3310-1 e 2;
- Pincel;
- Prensa de compressão axial da Contenco;
- Recipiente cilíndrico metálico com alças;
- Tanque de água;

3.2.2 Caracterização dos materiais

Massa específica dos agregados segundo NBR NM 52:2009 e a NBR NM 53:2009

Foi realizado a caracterização da massa específica para a areia e a brita 0 de acordo com as normas NBR NM 52:2009 e NBR NM 53:2009.

Para a massa específica da areia, uma amostra de 1 quilograma de areia foi colocada em um recipiente e coberta com água permanecendo em repouso por 24 horas, após este período a amostra foi retirada da água e colocada sobre uma superfície plana, onde secou naturalmente, sendo revolvida com frequência.

O agregado foi colocado no molde tronco-cônico metálico de 40 mm de diâmetro superior, 90 mm de diâmetro inferior e 75 mm de altura, com espessura mínima de 1 mm; e sua superfície compactada suavemente com haste de compactação metálica, com 340 g de massa, tendo superfície de compactação circular plana de 25 mm de diâmetro; com 25 golpes, e então o molde foi levantado verticalmente para testar a umidade superficial do agregado, quando o cone do agregado desmoronar ao retirar o molde, neste momento o agregado terá chegado a

condição de saturado superfície seca, tal teste assegura que o agregado tenha alguma umidade superficial.

O procedimento consistiu em pesar 500 gramas de amostra (ms), coloca-la no frasco aferido de 500 centímetros cúbicos de capacidade e registrar a massa do conjunto (m1), depois encher o frasco com água até próxima da marca de 500 ml e movê-lo para eliminar as bolhas de ar, em seguida colocá-lo em banho mantido a temperatura constante de 21°C por 1 hora.

Completar o frasco com água até a marca de 500 centímetros cúbicos e determinar a massa total (m²). Retirar o agregado miúdo do frasco e secá-lo na estufa a 105°C até massa constante, esfriar à temperatura ambiente e pesar (m).

Já para a massa específica da brita 0, foram separadas duas amostras de 2 quilogramas cada, após pesar colocou-se em um recipiente e cobriu com água permanecendo em repouso por 24 horas, retira-se a amostra da água e com um pano absorvente enxuga a amostra até que toda a água visível seja eliminada, mesmo que a superfície das partículas se apresente úmida.

Logo após ser enxugada, pesa-se a amostra (ms), e a coloca no cesto de arame e submerge em água e pesar em água (ma). Seca-se a amostra na estufa a 105°C até massa constante, esfriar até a temperatura ambiente por 1 a 3 horas e pesar novamente (m).

Massa unitária dos agregados segundo NBR NM 45:2006

Assim como a massa específica para a massa unitária foi realizado a caracterização da areia e da brita 0 de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006)

A amostra de areia foi seca em estufa a 105°C por 24 horas, como o agregado possui dimensão máxima característica inferior a 37,5 mm foi empregado o “método A” da NBR NM 45:2006. Nesse método foi determinada e registrada a massa do recipiente cilíndrico vazio, com 27 centímetros de altura, 22 centímetros de diâmetro e volume de 0,01 metros cúbicos. A seguir, encheu-se o recipiente com o material até um terço de sua capacidade e o adensou com 25 golpes da haste de adensamento reta de aço, com 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, distribuídos uniformemente em toda a superfície do material.

Encheu novamente o recipiente até dois terços de sua capacidade e aplicou mais 25 golpes, por fim, terminou de encher totalmente o recipiente e aplicou mais 25 golpes. A camada superficial do agregado foi nivelada com uma espátula, de forma a rasá-la com a borda superior do recipiente. Foi registrada a massa do recipiente mais seu conteúdo.

O mesmo processo descrito para a areia foi realizado com a brita 0 para determinação de sua massa unitária.

Determinação da composição granulométrica segundo a NBR NM 248:2003

Seguindo a NBR NM 248:2003 foi realizado o ensaio de granulometria para a brita 0 e areia.

Para a areia secou se em estufa por 24 horas 1 quilograma de areia, que foi dividido em duas amostras de 500 gramas cada, cada amostra foi pesada após esfriar em temperatura ambiente e suas massas foram registradas (m_1 e m_2), as peneiras foram encaixadas formando um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente e provido de um fundo adequado para o conjunto.

Cada amostra foi ensaiada individualmente colocando a amostra na peneira superior do conjunto e colocando o conjunto no agitador mecânico por dois minutos cada peneira, após agita-las o material foi removido e colocado em uma bandeja circular, a malha foi escovada para retirar o material remanescente e pesou se o elemento retido em cada peneira. O procedimento deve ser repetindo para cada abertura de malha.

Para a brita 0 foi realizado o mesmo experimento descrito para a areia, mudando apenas o tamanho das peneiras e o agitador mecânico, e para cada amostra foi utilizado 2 quilogramas de agregado que foi colocado no peneirador por 1 minuto em cada peneira e registrado a massa retida em cada uma.

Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone segundo a NBR NM 67:1998

Para cada traço de concreto produzido foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67:1998. Foi utilizado um molde de tronco cônico oco com as seguintes dimensões: diâmetro da base inferior de 200 mm, diâmetro da base superior de 100 mm e altura de 300 mm. Uma haste de compactação de seção circular, reta, feita de aço com diâmetro de 16 mm, comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas. E para apoio do molde uma placa metálica, plana, quadrada com lados de dimensão não inferior a 500 mm e espessura igual ou superior a 3 mm.

Primeiro molhou-se o molde, a placa base e a haste, durante o preenchimento do molde com o concreto o operador se posicionou com os pés sobre as aletas do molde de forma a mantê-lo estável, o molde foi enchido em três camadas, cada uma com um terço da altura do molde e cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de socamento, distribuídos uniformemente sobre cada camada.

Na camada superior colocou um excesso de concreto sobre a superfície do molde, após efetuar os golpes rasar a superfície do concreto com a haste de compactação. O molde foi retirado cuidadosamente, levantando-o na direção vertical em 10 segundos com movimento constante para cima. Logo após a retirada do molde, mediu-se o abatimento do concreto, através da diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova desmoldado.

O ensaio foi realizado para cada traço até atingir o abatimento esperado. Como o concreto desenvolvido foi para a utilização em pavimento o abatimento desejado era de 90 ± 10 mm, o abatimento obtido em cada traço foi de 80mm.

Resistência à compressão axial em concretos segundo a NBR 5739:2007

O baixo custo, facilidade de execução, simplicidade e precisão do ensaio e sua importância na segurança das estruturas faz com que a resistência axial seja a propriedade mais avaliada para a verificação da qualidade de um concreto. Visto ainda que o concreto está submetido na maioria das estruturas a esforços que resultam em tensões de compressão.

A realização do ensaio é importante para manter uma padronização e qualidade do concreto e verificar a resistência real do traço produzido. Para o ensaio foram confeccionados os corpos de prova no laboratório.

Até a idade do concreto, os corpos de prova são mantidos na câmara úmida. O ensaio é realizado imediatamente após a sua remoção do local de cura. Foram rompidos nas idades de 7, 28 e 63 dias. As faces dos pratos de carga foram limpas e secas antes do corpo de prova ser colocado no centro do prato inferior. A carga do ensaio foi aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento 0,3MPa/s a 0,8MPa/s. A resistência à compressão, todos os dados e gráficos são dados pelo programa do computador.

A NBR 5738, de 2015, esclarece, em seu escopo, a função para qual foi criada, regulamentando os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova, estando estes em formato cilíndrico ou prismático. Os corpos de prova deste trabalho foram confeccionados em moldes cilíndricos, portanto, neste tópico, discorre-se apenas sobre os procedimentos aplicados a esta forma.

De acordo com a mesma NBR, os moldes utilizados para execução dos corpos de prova cilíndricos devem ser de aço ou material não absorvente ou reagente ao cimento Portland, de forma que sejam suficientemente resistentes, mantendo sua forma original durante a operação de moldagem. Ainda sobre a confecção dos moldes dos corpos de prova cilíndricos, a altura deles deve ser o dobro de seu diâmetro e os diâmetros ter 10, 15, 20, 25, 30, ou 45 cm.

A porção de concreto a ser empregado na preparação dos corpos de prova deve ser confeccionada em concordância com a ABNT NBR NM 33 e eles deverão ser moldados em cilindros cuja dimensão seja, no mínimo, três vezes maior do que a dimensão do agregado graúdo a ser utilizado na confecção do concreto. Para posterior referência, a NBR citada afirma que devem ser registrados “a data, a hora de adição da água de mistura, o local de aplicação do concreto, a hora da moldagem e o abatimento obtido”.

Para moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases devem ser untados com uma fina camada de óleo mineral ou correspondente lubrificante não reagente ao cimento Portland. Segundo a ABNT NBR 5738 (2015, p.3):

A superfície de apoio dos moldes deve ser rígida, horizontal, livre de vibrações e outras perturbações que possam modificar a forma e as propriedades do concreto dos corpos de prova durante sua moldagem e início de pega.

Antes de introduzir o concreto dentro dos moldes deve se efetuar uma nova mistura da porção de concreto, garantindo a sua uniformidade. O concreto deve ser introduzido em camadas, a quantidade de camadas e o número de golpes devem ser determinados de acordo com o tipo do corpo de prova.

O rasamento deverá ser efetuado com o auxílio de régua metálica ou colher de pedreiro adequada. Os corpos de prova deverão permanecer durante 24 horas sobre superfície horizontal rígida, sem qualquer perturbação e cobertos com material não reativo e não absorvente para que não ocorra perda de água do concreto.

Após ser observado o prazo de cura inicial descrito acima, estes podem ser transportados ao laboratório onde deverão ser submetidos ao tipo de cura correspondente aos corpos de prova moldados para comprovar a qualidade e a uniformidade do concreto durante a construção. Eles terão resistência à compressão testada de acordo com os quesitos para seus corpos de prova.

Para a determinação da consistência do concreto pelo método de abatimento do tronco de cone, utilizamos a NBR 67, de 1998, ainda em vigência, que determina “o método aplicável aos concretos plásticos e coesivos”.

A porção de concreto a ser utilizada para a determinação de sua consistência deve representar todo o lote de concreto. O molde a ser utilizado no ensaio deve ser em formato tronco de cone oco, em que o diâmetro da base inferior possuirá 200 mm, o diâmetro da base superior 100 mm e altura 300 mm; deve ser confeccionado em metal, possuir seu interior liso e espessura igual ou maior que 1,5 mm.

A NBR NM 67 (1998, p.3) diz que:

As bases superior e inferior devem ser abertas e paralelas entre si, formando ângulos retos com o eixo do cone. O molde deverá ser provido, em sua parte superior, de duas alças, posicionadas a dois terços de sua altura, e ter aletas em sua parte inferior para mantê-lo estável.

Para o correto procedimento do teste de abatimento do tronco de cone devemos umedecer, respectivamente, o molde e a placa da base a serem utilizados, após devemos preencher rapidamente todo o molde com o concreto, em três camadas, cada camada igual a um terço da altura do molde, observando que o operador do ensaio deve fixar os pés sobre as aletas do tronco cone, permitindo que este se mantenha estável.

Ao todo são ministrados 25 golpes em cada camada de concreto através de haste de compactação. A NBR NM 67 (1998, p.3) legisla que a haste de compactação deverá ser “de seção circular, reta, feita de aço ou outro material adequado, com diâmetro de 16 mm, comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas”. A compactação das camadas deverá ocorrer de forma que “os golpes apenas penetrem na camada anterior”.

O preenchimento da camada superior deve estar em excesso, para que se possa rasar a superfície, com desempenadeira em movimentos rolantes. O molde de concreto deve ser retirado entre 5s a 10s em movimento constante na direção vertical, evitando qualquer movimento de torção lateral. Ainda segundo a NBR NM 67 (1998, p.4):

Imediatamente após a retirada do molde, medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado, aproximando aos 5 mm mais próximos.

Resistência à tração por compressão diametral em concretos segundo a NBR 7222:2011

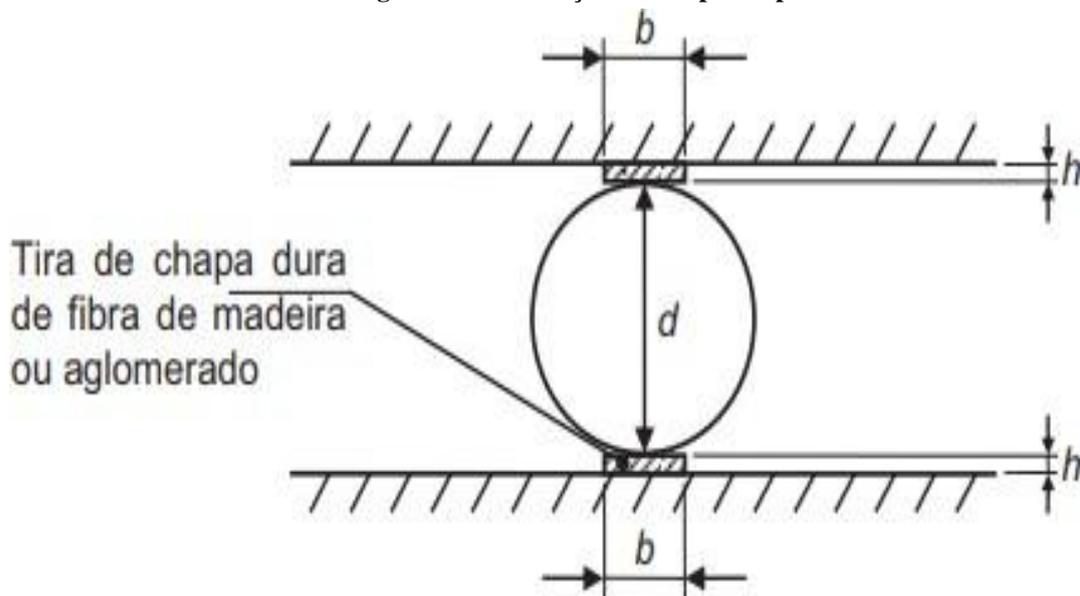
A NBR 7222, de 2011, explica de forma sucinta e de fácil entendimento, a função para qual foi criada, prescrevendo os métodos para determinação da resistência à tração por compressão diametral. Segundo a ABNT 7222 (2011,p2).”As diretrizes estabelecidas nesta Norma para o ensaio de corpos de prova moldados são igualmente válidas, sempre que aplicáveis.”

De forma similar ao procedimento de ruptura para obtenção da resistência à compressão axial em concretos segundo a NBR 5739:2007 a obtenção da resistência à tração por compressão diametral em concreto segundo a NBR 7222:2011, obedece as mesmas normas já citadas quanto á :

- ABNT NBR 5738, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova;
- ABNT NBR NM 67, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

O posicionamento dos corpos de prova e aparelhagem utilizada para ruptura é normatizado pela NBR 7222:2011, sendo que podem ser utilizados dispositivos auxiliares que facilitem o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios.

Figura 12 – Confeção dos corpos de prova



Fonte: ABNT NBR 7222 (2011, p 3).

O posicionamento dos corpos de prova cilíndricos na máquina de ensaio é normatizado pela NBR 7222 (2011, p4) item 5.2.

Colocar o corpo de prova de forma que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas, que devem receber o carregamento, coincida com eixo de aplicação de carga. Colocar, entre os pratos da máquina e os corpos de prova em ensaio, as duas tiras de chapa dura de fibra de madeira ou aglomerado, definidas em 3.4. As tiras de madeira devem ser usadas para apenas uma determinação. Ajustar os pratos da máquina até que seja obtida uma compressão capaz de manter em posição o corpo de prova.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre os mesmos para fins de entendimento e cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

Realizados os ensaios no laboratório do Centro Universitário da UniEvangélica, Anápolis-GO e os posteriores cálculos de acordo com as normas citadas no capítulo 3 foram obtidos os seguintes resultados:

4.1.1 Agregado Miúdo

Considerando a amostra da areia a primeira caracterização foi a de massa unitária, os dados obtidos na análise seguem na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados para cálculo da massa unitária do agregado miúdo.

Massa unitária	
Recipiente vazio	6,5 kg
Diâmetro recipiente	0,22 m
Altura recipiente	0,27 m
Amostra 1	18,00 kg
Amostra 2	17,95 kg
Amostra 3	17,95 kg

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Segundo a norma da ABNT (2006) NBR NM 45 a massa unitária é obtida pela equação (4.1) a seguir:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (4.1)$$

Onde,

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V é o volume do recipiente, em metros cúbicos.

O volume do recipiente foi obtido por meio da fórmula do volume do cilindro conforme Equação (4.2):

$$V = \pi r^2 h \quad (4.2)$$

Onde r é o raio do recipiente e h a altura ambos em metros

Que resultou em um volume de $V = 0,010 \text{ m}^3$.

Com o volume e o peso das amostras obtive as massas unitárias, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa unitária do agregado miúdo.

Massa unitária	
Amostra 1	1150,00 kg/m ³
Amostra 2	1145,00 kg/m ³
Amostra 3	1145,00 kg/m ³
Média	1146,67 kg/m ³

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Os dados obtidos para cálculo da massa específica conforme normas da ABNT NBR NM 52:2009 seguem na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados para cálculo da massa específica do agregado miúdo.

Massa específica	
MS	500 g
M1	886 g
M2	1125,2 g
M	470 g
Água a 24,5°	$\rho = 999,972 \text{ kg/m}^3$

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O cálculo da massa específica do agregado seco é obtido por meio das Equação (4.3):

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (4.3)$$

Onde,

d_1 , é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m , é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a Equação (4.4), em centímetros cúbicos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (4.4)$$

Onde,

m_1 , é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

m_2 , é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Já a massa específica do agregado saturado superfície seca é obtido pela Equação (4.5):

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (4.5)$$

Onde,

d_2 , é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.

Já a massa específica é obtida pela Equação (4.6) a seguir:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \left(\frac{m - m_s}{\rho_a} \right)} \quad (4.6)$$

Onde,

d_3 , é a massa específica do agregado, em gramas por centímetros cúbicos;

m , é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a , é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

ρ_a , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Os resultados calculados para a massa específica da areia reciclada de acordo a ABNT NBR NM 52:2009 estão na tabela 5.

Tabela 5: Massa específica do agregado miúdo.

Massa específica	
Va	239,88 cm ³
d1	1,81 g/cm ³
d2	1,92 g/cm ³
d3	2,043 g/cm ³

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O teste de Granulometria foi realizado conforme a norma NBR NM 248:2003 os dados obtidos para os cálculos seguem abaixo na Tabela (6) para a amostra 1 de 500g:

Tabela 6 - Granulometria amostra 1 do agregado miúdo.

Abertura da malha	Material retido	% retida	% acumulada
4,75mm	2,0g	0,4	0,4
2,36mm	63,6g	12,72	13,12
1,18mm	91,8g	18,36	31,48
600mm	112,8g	22,44	53,92
300mm	112,9g	22,58	76,50
150mm	66,2g	13,24	89,74
Fundo	51,3g	10,26	100

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Na Tabela (7) para a amostra 2 de 500 g:

Tabela 7 - Granulometria amostra 2 do agregado miúdo.

Abertura da malha	Material retido	% retida	% acumulada
4,75mm	3,0g	0,6	0,6
2,36mm	92,5g	18,5	19,1
1,18mm	108,6g	21,72	40,82
600mm	116,7g	23,34	64,16
300mm	96,4g	19,28	83,44
150mm	45,6g	9,12	92,56
Fundo	37,2g	7,44	100

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O cálculo de percentagem retida é realizado conforme a Equação (4.7) a seguir:

$$\% \text{ Retida} = \frac{\text{material retido}}{500} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Tendo a Tabela (8) como média das amostras

Tabela 8 - Granulometria média das amostras 1 e 2 agregado miúdo.

Abertura da malha	% Média Retida	% Média Acumulada
4,75mm	0,5	0,5
2,36mm	15,61	16,11
1,18mm	20,04	36,15
600mm	22,89	59,04
300mm	20,93	79,97
150mm	11,18	91,15
Fundo	8,85	100

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Conforme a norma o módulo de finura da areia é de 2,83.

4.1.2 Agregado Graúdo (Brita 0)

Analisando a amostra da brita 0 inicialmente foi caracterizado massa unitária, as informações obtidas na análise seguem na Tabela 9.

Tabela 9: Dados para cálculo da massa unitária da brita 0.

Massa unitária	
Recipiente vazio	6,5 kg
Diâmetro	0,22 m
Altura	0,27 m
Amostra 1	17,40 kg
Amostra 2	17,75 kg
Amostra 3	17,95 kg

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Conforme a norma da ABNT (2006) NBR NM 45 a massa unitária é encontrada pela equação (1) citada no item 4.1.1. J volume do recipiente foi calculado pela fórmula do volume do cilindro de acordo com a Equação (2). Que resultou em um volume de $V = 0,010 \text{ m}^3$.

Tendo o volume e o peso das amostras obteve-se as massas unitárias, apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Massa unitária brita 0.

Massa unitária	
Amostra 1	1090,00 kg/m ³
Amostra 2	1125,00 kg/m ³
Amostra 3	1145,00 kg/m ³
Média	1120,00 kg/m ³

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Os valores encontrados para o cálculo da massa específica seguindo a norma da ABNT NBR NBR NM 53:2009 seguem na Tabela 11.

Tabela 11: Dados para cálculo da massa específica da brita 0.

Massa específica	
Ms1	2571,4g
Ma1	1391 g
M1	2336,5 g
Ms2	3021,2 g
Ma2	1642 g
M2	2817,8 g

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O cálculo da massa específica do agregado seco é obtido por meio das Equação (4.8):

$$d = \frac{m}{ms - ma} \quad (4.8)$$

Onde,

d , é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m , é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;

m_a , é a massa em água da amostra, em gramas.

Ja a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca é calculada pela Equação (9):

$$ds = \frac{ms}{ms - ma} \quad (4.9)$$

Onde,

ds , é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

ms , é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

ma , é a massa em água da amostra, em gramas.

A massa específica aparente do agregado é dada por meio das Equação (4.10):

$$da = \frac{m}{ms - ma} \quad (4.10)$$

Onde,

da , é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m , é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;

ms , é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

ma , é a massa em água da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas

A absorção de água é calculada utilizando a Equação (11):

$$A = \frac{ms - m}{m} .100 \quad (4.11)$$

Onde,

A , é a absorção de água, em percentagem;

m , é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;

ms , é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas.

Com os cálculos da massa específica da brita 0 foram obtidos os valores apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Massa específica brita 0.

Massa específica		
	Amostra 1	Amostra 2
d	1,98 g/cm ³	2,04 g/cm ³
ds	2,178 g/cm ³	2,19 g/cm ³
da	2,47 g/cm ³	2,40 g/cm ³
A	10,05%	7,2%

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O teste de Granulometria foi realizado conforme a norma NBR NM 248:2003 os dados obtidos para os cálculos seguem na Tabela (13) para a amostra 1 de 2,00 kg:

Tabela 13: Granulometria amostra 1 da brita 0.

Abertura da malha	Material retido	% retida	% acumulada
37,5mm	0 g	0	0
25mm	0 g	0	0
19mm	0 g	0	0
12,5mm	0 g	0	0
9,5mm	0 g	0	0
4,75mm	820 g	41	41
2,36mm	775 g	38,75	79,75
Fundo	405 g	20,25	100

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Ja a Tabela (14) é para a amostra 2 de 2,00 kg:

Tabela 14: Granulometria amostra 2 da brita 0.

Abertura da malha	Material retido	% retida	% acumulada
37,5mm	0 g	0	0
25mm	0 g	0	0
19mm	0 g	0	0
12,5mm	0 g	0	0
9,5mm	0 g	0	0
4,75mm	815 g	40,75	40,75
2,36mm	785 g	39,25	80
Fundo	400 g	20	100

Fonte: Próprios Autores, 2018.

O cálculo de percentagem retida é realizado conforme a Equação (12) a seguir:

$$\% \text{ Re tida} = \frac{\text{material retido}}{2000} \cdot 100 \quad (12)$$

Tendo a Tabela (15) como média das amostras

Tabela 15: Granulometria média das amostras 1 e 2 brita 0.

Abertura da malha	% Média Retida	% Média Acumulada
37,5mm	0 g	0 g
25mm	0 g	0 g
19mm	0 g	0 g
12,5mm	0 g	0 g
9,5mm	0 g	0 g
4,75mm	40,875 g	40,875 g
2,36mm	39 g	79,875 g
Fundo	20,125 g	100 g

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Conforme a norma o módulo de finura da brita 0 é de 1,21.

4.2 ESCRITA DO TRAÇO

Utilizando os dados da caracterização dos agregados, inicialmente foram calculados traços conforme as normas da ABCP (Apêndice A) - o primeiro de concreto convencional e o segundo de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), ambos dimensionados para uma resistência inicial de 20 MPa. Visto que esta resistência está entre o exigido em grande parte dos projetos estruturais (OLIVEIRA, 2001). Pelo método da ABCP, considerando os fatores de cada concreto e um desvio padrão para 20 MPa de 5,5 MPa (concreto classe C10 a C25) e foi obtido um f_{cj} de 29,07 MPa (tensão média de dosagem aos 28 dias).

Uma significativa característica do concreto que determina a sua tendência para ser empregado é a sua consistência, que em relação a tecnologia do concreto, pode ser definida como a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação da sua própria massa (KIAHARA, CENTURIONE, 2005, p.295). A trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento; teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados. Sendo assim, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1996) o abatimento do tronco de cone é o método de ensaio definido pela normalização brasileira para determinação da consistência do concreto fresco, em detrimento de tal fato estipulado um abatimento de 90 ± 10 mm.

Foi utilizado o cimento CP II Z 32 (Ciplan), material este, determinado devido as condições oferecidas pela instituição de pesquisa. Após a realização dos cálculos, resultou para

20 MPa um traço de 1: 1,66: 2,2: 0,53 Kg (Cimento:Areia:Brita:Água). Para a realização do traço de concreto incorporado com fibras de aço foi utilizado o mesmo cálculo para o concreto convencional com a adição de 1kg das fibras de aço, o que compreende 15% de fibra em relação a massa de cimento utilizado para a realização desse traço.

A medida máxima e mínima do abatimento é definida pelo calculista, em função das propriedades desejadas de trabalhabilidade. Os procedimentos necessários para execução do Slump Test foram observados. O ensaio realizado alcançou no Slump Test o valor de 80 mm para todos os traços.

Os corpos de provas foram confeccionados no Centro Tecnológico da UniEvangélica, no dia 06 de dezembro de 2017. Os traços foram produzidos na betoneira, primeiro colocou-se o agregado graúdo, o agregado miúdo e metade da água calculada no traço base, após misturar os agregados colocou-se o cimento e foi sendo adicionado água até atingir a fluidez desejada no slump test.

Figura 13 - Produção do concreto no carrinho de mão.



Fonte: Próprios Autores, 2018.

Com o concreto pronto, a próxima etapa é montar os corpos de prova, o molde usado foi o 100x200 mm, o molde deve ser untado por dentro com óleo desmoldante, para que os corpos de prova possam ser removidos, primeiro coloca-se metade da altura do molde de concreto e adensa com a haste de compactação aplicando 12 golpes, em seguida preenche o restante do molde colocando um excesso de concreto e compacta novamente com mais 12 golpes, depois rasa a superfície do concreto até se igualar ao molde. Após monta-los é necessário etiqueta-los e deixar secar por 24 horas.

Figura 14 - (a) Primeira camada de concreto sendo compactada no molde de 100x200 mm. (b) Corpos de prova prontos e etiquetados.



Fonte: Próprios Autores, 2018.

4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

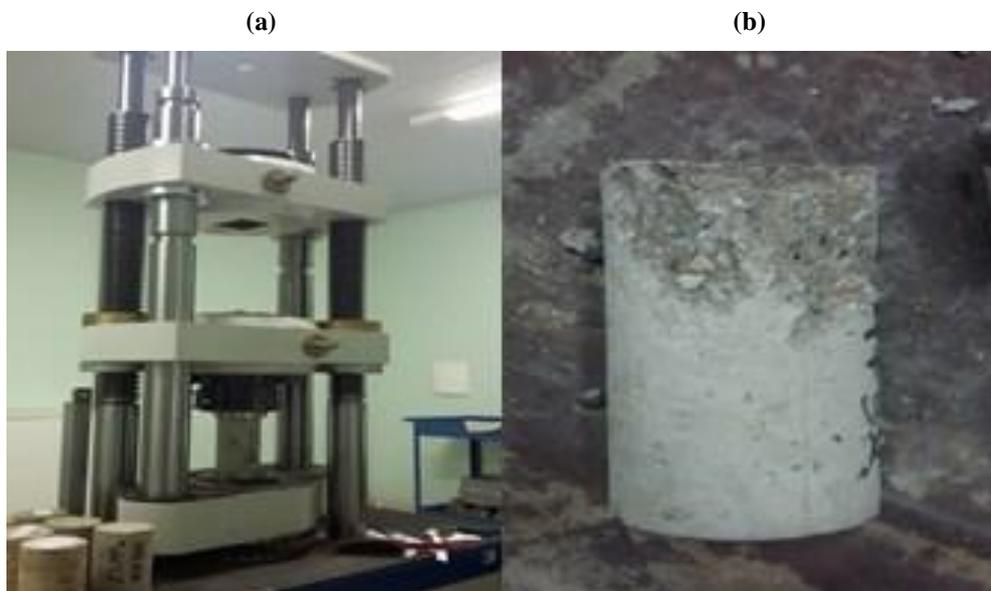
Apos desenformar os corpos de prova, eles foram para a camara fria até atingirem as idades de rompimento, ver figura 27,28 e 29.

Figura 15 – Corpos de prova na camara fria.



Fonte: - Laboratório Centro Tecnológico da UniEvangélica, 2018.

Figura 16– (a) Rompimento dos corpos de prova em prensa de compressão axial. (b) Corpos de prova após ser submetido a compressão axial.



Fonte: Próprios Autores, 2018.

As idades de rompimento foram aos 7, 28 e 63 dias, sendo confeccionados quatro corpos de prova para cada idade, para podermos obter prova e contraprova de cada resultado, para os testes de compressão axial e tração para compressão diametral. A tabela 16 demonstra todos os resultados obtidos no laboratório para o ensaio de compressão axial.

Tabela 2 – Todos os resultados para o ensaio de compressão axial, prova e contraprova de acordo com as idades de ruptura.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (Mpa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	7	16,4	13,110
	7	17,1	13,690
	28	20,4	16,320
	28	21,3	17,027
	63	23,5	18,786
	63	24,1	19,255
CRFA	7	17,2	13,766
	7	18,0	14,353
	28	21,4	17,123
	28	22,4	17,878
	63	24,7	19,725
	63	25,3	20,229

Fonte: Próprios Autores, 2018.

A tabela 17 apresenta todos os resultados obtidos de prova e contraprova para o teste de compressão diametral.

Tabela 3 – Todos os resultados para o ensaio de tração para compressão diametral, prova e contraprova de acordo com as idades de ruptura.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (Mpa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	7	2,0	6,280
	7	2,1	6,594
	28	2,4	7,630
	28	2,3	7,312
	63	2,6	8,266
	63	2,4	7,630
CRFA	7	2,1	6,594
	7	2,2	6,924
	28	2,5	7,913
	28	2,4	7,583
	63	2,7	8,572
	63	2,5	7,913

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Para a idade de 7 dias, o rompimento foi realizado no dia 12 de dezembro de 2017 e obtiveram-se os seguintes resultados medianos, entre prova e contraprova, para o ensaio de compressão axial para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) conforme a Tabela 18. O ensaio de tração para compressão diametral para ambos concretos de acordo com a tabela 19. Observa-se que os corpos de provas de concreto incorporado com fibra de aço apresentaram valores de resistência acima quando comparados aos de concreto convencional.

Tabela 4 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 7 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto convencional	7	16,75	13,400
CRFA	7	17,6	14,059

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Tabela 5 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 7 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	7	2,05	6,437
CRFA	7	2,15	6,759

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Para a idade de 28 dias, o rompimento foi realizado no dia 02 de janeiro de 2018 e obtiveram-se os seguintes resultados, a partir da média da prova e contraprova para a data de ruptura de 28 dias, para o ensaio de compressão axial para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) conforme a Tabela 20. O ensaio de tração para compressão diametral para ambos concretos de acordo com a tabela 21.

Tabela 6 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 28 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto convencional	28	20,85	16,674
CRFA	28	21,90	17,501

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Tabela 7 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 28 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	28	2,35	7,471
CRFA	28	2,50	7,748

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Para a idade de 63 dias, o rompimento foi realizado no dia 06 de fevereiro de 2018 e obtiveram-se os seguintes resultados médios, para o ensaio de compressão axial para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), conforme a Tabela 22. O ensaio de tração para compressão diametral para ambos concretos de acordo com a tabela 23.

Tabela 8 – Ensaio de compressão axial concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para a idade de 63 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	63	23,80	19,025
CRFA	63	24,90	19,977

Fonte: Próprios Autores, 2018.

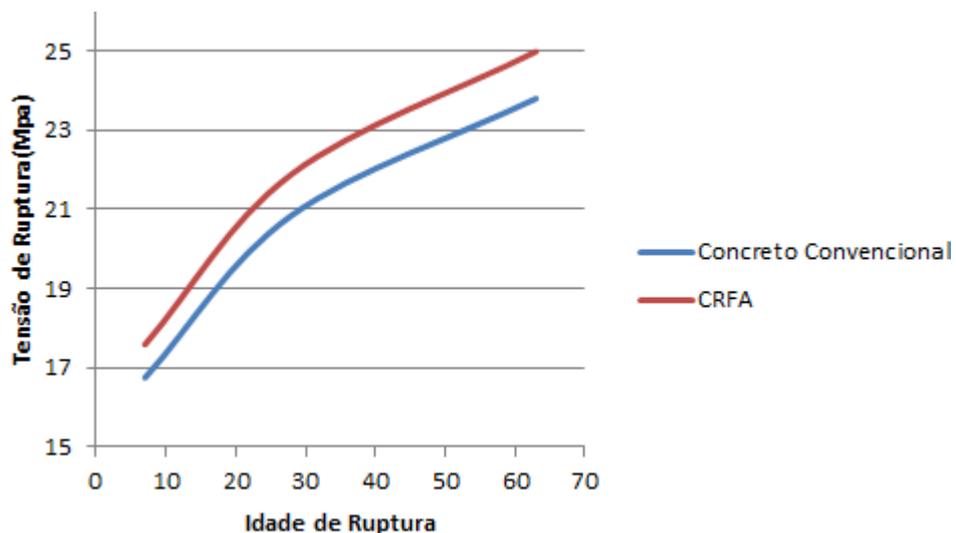
Tabela 9 – Ensaio de tração para compressão diametral concreto convencional e concreto com fibras de aço (CRFA) para a idade de 63 dias.

	Idade de Ruptura	Tensão ruptura (MPa)	Carga ruptura (Kgf)
Concreto Convencional	63	2,50	7,948
CRFA	63	2,63	8,243

Fonte: Próprios Autores, 2018.

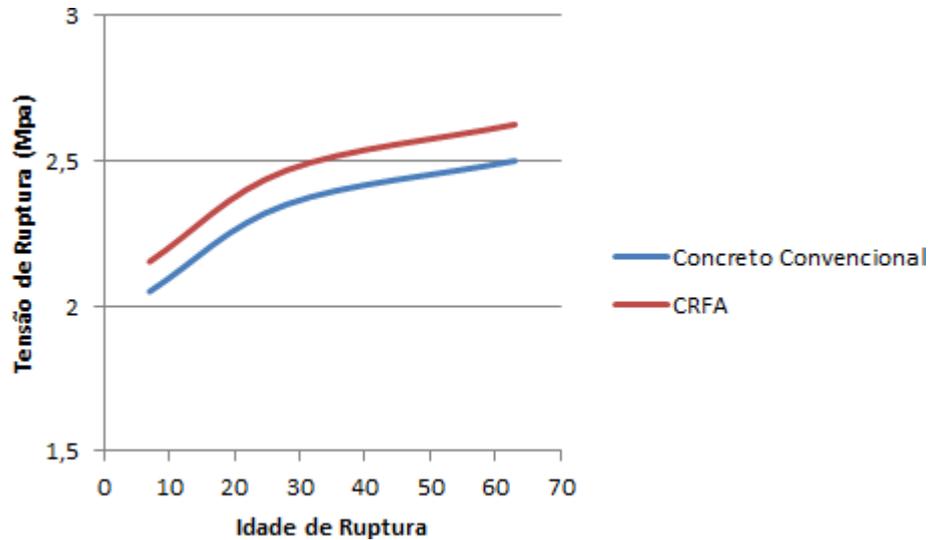
Segue a abaixo os gráficos para melhor visualização dos resultados médios, entre prova e contraprova, de ruptura por compressão axial, ver figura 30, e ruptura de tração por compressão diametral, ver figura 31. Os gráficos Tensão de Ruptura x Idade, foram confeccionados em planilhas Excel a partir dos dados obtidos pelos laudos dos testes realizados no laboratório centro tecnológico da UniEvangélica, pelo programa de prensa de compressão axial e tração por compressão diametral da contenco, 2018.

Figura 17 - Gráfico comparativo da resistência à compressão axial do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Próprios Autores, 2018.

Figura 18 – Gráfico comparativo da resistência a tração por compressão diametral do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Próprios Autores, 2018. .

Analisando sistematicamente os resultados podemos constatar que no ensaio de compressão axial referente a idade de 7 dias o concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto convencional apresentou um aumento de resistência de 4,92%, em relação a idade de 28 dias 4,97% e em relação a idade de 63 dias 5,02%. Em relação ao ensaio de tração por compressão diametral referente a idade de 7 dias o concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto convencional apresentou um aumento de resistência de 2,23 %, em relação a idade 28 dias 3,7% e em relação a idade 63 dias 3,8%. Podemos observar que em o concreto reforçado com fibras de aço apresentou um aumento pouco significativo em relação ao concreto convencional, entretanto é muito utilizado para casos onde possa ser utilizado para resistir a pós-fissuração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível esclarecer que a pesquisa abordou boa parte dos aspectos ligados à tecnologia do CRF. De maneira sistemática, abrangeram-se as exterioridades ligadas aos conceitos fundamentais do comportamento do material CRF às condições de aplicações de maior relevância para o cenário nacional, como o concreto de revestimento de túneis e os tubos pré-moldados. Alguns pontos foram abordados com especial atenção, como é o caso da avaliação do comportamento mecânico, os métodos de ensaio, procedimentos de dosagem e o controle de aplicação do produto. Tendo como objetivo a colaboração técnica científica, este trabalho cumpriu com o objetivo, apresentando a tecnologia e mostrando a exequibilidade da técnica.

A montagem e dosagem experimental dos corpos de provas para incorporar as fibras de aço não foram analisadas neste estudo, mas observa-se que necessita de atenção pois, a sua incorporação exagerada pode atrapalhar na trabalhabilidade do material e a incorporação mínima não teria efeito desejado alcançado. Pode-se dizer que análise dos materiais utilizado nos experimentos precisa ser realizada com muita precisão para garantir os bons resultados.

Haja visto que este trabalho constitui uma linha de pesquisa onde foram comparadas várias outras fibras incorporadas no concreto. Tendo então, neste caso analisado somente o ganho de resistência em relação ao concreto convencional, pode-se observar um ganho de resistência entre a compressão axial e compressão diametral, ambas dentro do comprovado pela teoria.

Finalmente, há toda uma escassez de pesquisa no tema da análise mecânica dos concretos reforçados com fibras aplicados em estruturas. Especialmente para obras de infraestrutura, onde a vida-útil esperada pode ser de mais de uma centena de anos, a parametrização da durabilidade do compósito é fundamental para a garantia de sua aplicação de uma forma mais sustentável.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Além das Estruturas contínuas, como pavimentos e revestimentos de túneis, e os pré-moldados, existem diversas aplicações, onde as fibras podem ser utilizadas com uma maior veemência no futuro. Como apontado, os maiores ganhos obtidos com a utilização das fibras são associados ao aumento da resistência do concreto a esforços dinâmicos (BENTUR;

MINDESS, 1990). Como possibilidades para a utilização de concreto incorporados com fibras futuramente;

Fibras de aço para o reforço de componentes e estruturas sujeitos a elevados esforços e a possibilidade de ocorrência de incêndios;

Fibras combinadas com microfibras para a aplicação à resistência à fadiga da matriz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, P. S. S. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. 1999. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BASTOS, P. S. S. **Estruturas de Concreto I: Fundamentos do concreto armado**. [s.e.]. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2011. [s.v.]. 92 p.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007. [s.v.]. 601 p.

BRANDT, A. M. **Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2009. [s.v.]. 526 p.

CURADO, M. C. **Ligações formadas pelo traspasse de armadura dobrada em forma de laço: Análise da influência das fibras de aço**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2011.

DANIN, A. R. **Estudo da aderência entre concreto e armadura: Análise da influência das fibras de aço**. 2010. 277 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 247 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió, 2010.

GONÇALVES, C. M. M. **Influência da adição de fibras curtas de aço e de nylon no comportamento e na resistência ao esforço cortante em vigas de concreto armado**. 2003. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, 2003.

GUETTI, P. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas do concreto autoadensável e do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2012. 395 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da UFMG, – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

HOLANDA, K. M. A. **Análise dos Mecanismos Resistentes e da Similaridade dos Efeitos de Adição de Fibras de Aço na Resistência e na Ductilidade à Punção de Lajes-Cogumelo e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto**. 2002. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

OLIVEIRA, E. M. **Consolos de concreto moldados em duas etapas: Influência do tratamento da interface e da adição de fibras de aço**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2012.

PASA DUTRA, V.F. **Um Modelo Constitutivo para o Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Teoria da Homogeneização**. 2012. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PEREIRA JR, W. M. **Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano**. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2014.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço**. 2003. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

SOUZA, M. B.S. **Modelagem numérica de vigas de concreto reforçado com fibras de aço**. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2006.

APÊNDICE A – Cálculo do traço do concreto pelo método da ABCP

O primeiro passo é o cálculo da resistência média aos 28 dias – F_{cj} – a partir do desvio padrão.

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 \cdot Sd \quad (1)$$

Em que:

F_{cj} = resistência média do concreto à compressão a j dias de idade, em MPa;

F_{ck} = resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

Sd = desvio-padrão da dosagem, em MPa;

$Sd = 4,0$ MPa concreto classe C10 a C80.

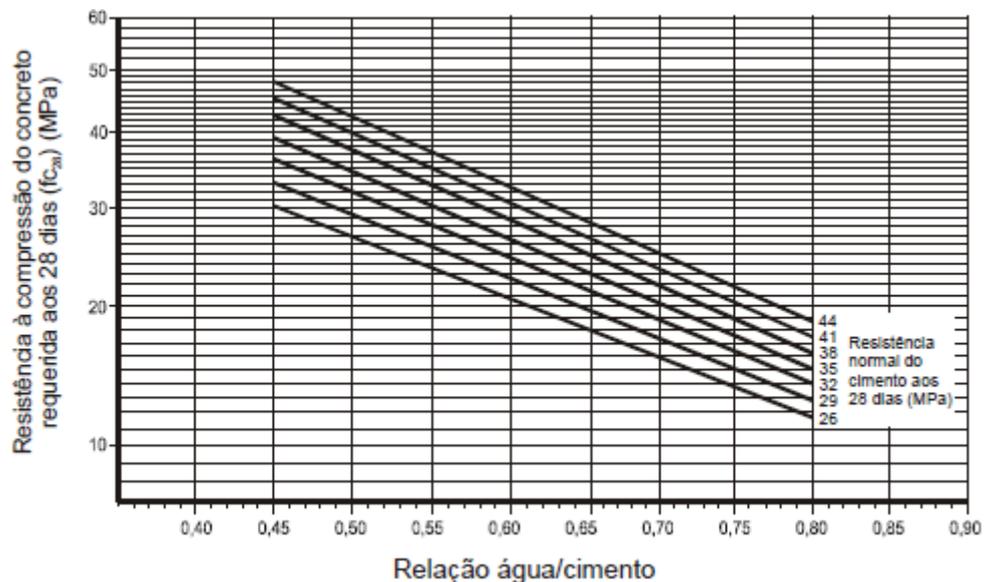
$Sd = 5,5$ MPa concreto classe C10 a C25.

$Sd = 7,0$ MPa concreto classe C10 a C15.

Segundo passo - Fixação da relação água/cimento (a/c)

O valor da relação água/cimento é estimado com base na curva de Abrams, que por sua vez, deve ser determinado em função do tipo de cimento.

Figura 1 - Gráfico para determinação da relação água cimento (a/c) em função da resistência do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.



Fonte: Rodrigues, 1990 apud Boggio, 2000.

Considerando a dificuldade em expressar o consumo de água na mistura por meio de uma lei matemática, Rodrigues, 1990 apresenta como estimativa inicial do consumo de água por metro cúbico de concreto, os valores constantes no Tabela 1 (BOGGIO, 2000).

Tabela 1 - Estimativa do consumo de água por metro cubico de concreto em função do diâmetro máximo característico do agregado e do abatimento da mistura.

Abatimento do tronco de cone	Dimensão máxima característica do agregado				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
40 a 60 mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80 mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100 mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

Fonte: Rodrigues, 1990 apud Boggio,2000.

Terceiro passo é a estimativa do consumo de cimento. O fator água/cimento nada mais é do que uma fração, que divide o peso da água pelo peso do cimento, conforme abaixo:

$$A/C = \frac{Ca}{Cc} \quad (2)$$

Quarto passo é a estimativa de consumo de agregados

A Tabela 2, cujos valores foram determinados experimentalmente pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), apresenta os volumes compactados a seco de agregado graúdo, por metro cúbico de concreto, em função do Diâmetro Máximo característico do agregado graúdo ($\phi_{m\acute{a}x.}$) e do Módulo de Finura (MF) do agregado miúdo.

Tabela 2 - Volume compactado seco (Vpc) do agregado graúdo por metro cubico de concreto.

Módulo de finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo ($\phi_{m\acute{a}x.}$)				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	38 mm
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

Fonte: Rodrigues, 1990 apud Boggio,2000.

$$MU = \frac{P(kg)}{V(m^3)} \quad (3)$$

Quinto passo é a estimativa do consumo de agregado miúdo, para 1,0 metro cúbico de concreto, o volume do agregado é dado pela equação abaixo:

$$V_m = 1 - \left(\frac{P_c}{\gamma_c} + \frac{P_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{P_a}{\gamma_a} \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{P(kg)}{V(m^3)} \quad (5)$$

A escrita do traço é feita na sequência:

Cimento:Areia:Brita:Água (Kg)