



**Universidade Federal
da Grande Dourados**

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO EM ELEMENTOS DE CONCRETO ESTRUTURAL

João Victor Barbosa Bianchi; Maria Aparecida G. Tommaselli.
joavictorbianchi97@gmail.com; mariamachado@ufgd.edu.br

RESUMO - O presente trabalho visa analisar, teórica e experimentalmente, o comportamento de concreto simples reforçado com fibras de aço quando submetido à flexão pura e à compressão axial. A análise em questão diz respeito ao acréscimo de resistência adquirido nos corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) devido à contribuição das fibras de aço com relação aos esforços de tração que surgem durante o ensaio à flexão das mesmas. Além disso, foi analisada a influência das fibras no comportamento do concreto à compressão axial. Foram realizados procedimentos para monitorar as cargas aplicadas e a abertura de fissuras sofridas pelos corpos de prova de concreto armado reforçado com fibra de aço. Foi constatado um acréscimo na resistência à tração na flexão e redução na resistência à compressão axial e trabalhabilidade conforme a taxa de fibras aumentou.

Palavras-chave: Fibras. Reforço. Flexão.

ABSTRACT – The present work aims to analyze, theoretically and experimentally, the behavior of simple concrete reinforced with steel fibers when subjected to pure bending and axial application. The analysis in question concerns the increase of the purchased strength in the specimens (cylindrical and prismatic) due to the contribution of the steel fibers to the application difficulties that arise during their flexural test. In addition, the influence of fibers on the behavior of concrete to axial compression was analyzed. Procedures were performed to monitor the applied loads and cracking suffered by steel fiber reinforced concrete specimens. Increased flexural abrasion resistance and reduction of axial compressive strength and workability were observed as the increased fiber rate

Keywords: Fibers. Strengthening. Bending.

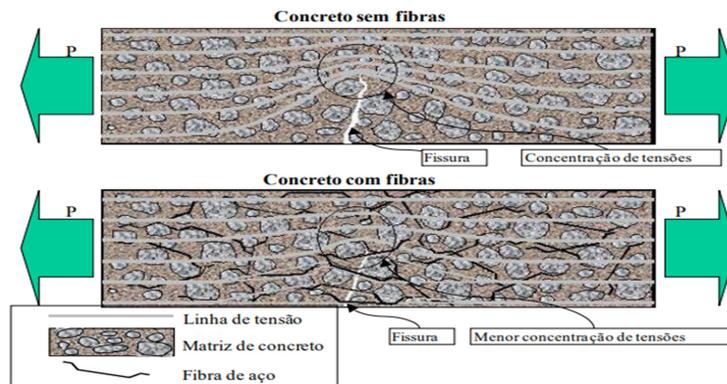
1 INTRODUÇÃO

O concreto possui diversas características que lhe garantem a posição de material estrutural mais utilizado pelo homem ao redor do globo. Dentre as principais vantagens, pode-se citar o baixo custo e a capacidade de adequação às mais diversas condições de produção, além de ser um material que apresenta boa trabalhabilidade, o que viabiliza a produção de peças dos mais diversos formatos e tamanhos (BASTOS, 2006). Apesar de inúmeras vantagens, o concreto também possui suas limitações, tais como elevado peso específico e também a dificuldade de se realizar um bom controle de qualidade da peça, visto que apenas depois de 28 dias pode-se avaliar se a mesma cumpre os requisitos de desempenho estrutural especificados em projeto, conforme a ABNT NBR 6118:2014.

Além disso, vale ressaltar que o concreto simples (composto por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água) não possui valores significativos de resistência à tração, sendo este da ordem de 10% da resistência do concreto à compressão. Portanto, o concreto simples apresenta após os 28 dias de cura boa resistência à compressão, baixa resistência aos esforços de tração e também comportamento frágil, visto que o mesmo se rompe com pequenas deformações (PINHEIRO, 2007). Visando melhorar a característica de resistência à tração do concreto e também limitar suas deformações, é usual a associação do concreto a outros materiais, tais como a utilização de armaduras junto ao perfil de concreto, podendo estas ser do tipo contínua (em barras) ou descontínua (em fibras) (DEBS, 2000).

A presença de elevadas deformações nos perfis de concreto ocasionam trincas na peça, fator esse que altera a distribuição uniforme de tensões de tração, proporcionando certa concentração de tensões em determinado ponto da peça. A utilização de fibras no concreto distribuídas aleatoriamente por todo o material reforça a peça por inteiro, diminuindo a fissuração da mesma e, conseqüentemente, a concentração de tensões de tração supracitadas. Este fato pode ser melhor visualizado através da Figura 1, onde é utilizada como exemplo uma viga de concreto simples. (FIGUEIREDO, 2007).

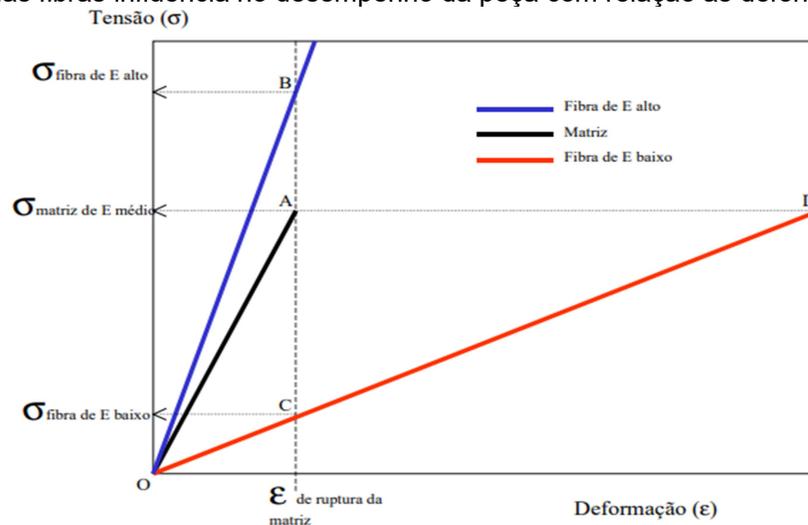
Figura 1 - Exemplificação da concentração de tensões resultantes da fissuração do concreto em vigas de concreto simples sem fibras (acima) e com fibras de aço (abaixo).



Fonte: (FIGUEIREDO, 2007)

O material de composição da fibra será determinante para definir o módulo de elasticidade e sua resistência mecânica, propriedades essas que influenciam de forma direta na capacidade de reforço que a fibra proporciona ao concreto. As fibras cujo módulo de elasticidade é inferior ao do concreto endurecido (poliméricas, por exemplo), são classificadas como fibras de baixo módulo. Já as fibras que possuem módulo de elasticidade maior do que o do concreto endurecido (aço, por exemplo), são chamadas de fibras de alto módulo. O diagrama que relaciona tensão e deformação (Figura 2) ilustra como o módulo de elasticidade das fibras influencia no desempenho da peça (FIGUEIREDO, 2007).

Figura 2 - Diagrama que relaciona tensão e deformação, mostrando como o módulo de elasticidade das fibras influencia no desempenho da peça com relação às deformações.



Fonte: (FIGUEIREDO, 2007)

O acréscimo de resistência à tração obtido com a adição das fibras de aço ao concreto pode trazer inúmeras vantagens ao setor da construção civil, sendo esta uma justificativa válida para a realização do estudo em questão. Por exemplo, pode-se aumentar a capacidade resistente de uma viga sem que sua seção seja alterada,

preservando assim parâmetros arquitetônicos pré-estabelecidos em projeto. Além disso, o estudo da utilização de compósitos fibrosos para o reforço do concreto também pode ser direcionado para a área de patologias prediais, utilizando assim o concreto reforçado com fibras de aço para fins de correção de eventuais defeitos estruturais de uma forma menos invasiva.

O presente trabalho abordou a utilização de fibra de aço para o reforço do concreto, com o intuito de aprimorar o desempenho das peças confeccionadas com o concreto reforçado aos esforços de tração resultantes da flexão simples. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da adição de fibras de aço na matriz de concreto através de um estudo comparativo entre o concreto simples e o concreto reforçado com fibras quando submetidos aos esforços de tração na flexão e compressão axial, além da avaliação de suas trabalhabilidades.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CONCRETO SIMPLES

O concreto simples é composto pela mistura em proporções adequadas de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água. Possui tempo de cura de 28 dias para atingir a resistência de projeto, sendo um dos materiais de melhor custo benefício em uso no cenário da construção civil devido a propriedades como boa resistência à compressão (f_{ck}), baixo custo e também fácil modelagem para a confecção de peças dos mais diferentes tamanhos e formatos (PINHEIRO, 2007).

Apesar das vantagens do concreto simples, o mesmo também possui suas desvantagens. A principal desvantagem do concreto simples, por sua vez, é o comportamento frágil do material, visto que as peças de concreto simples se rompem com pequenos valores de deformação. Visto que a resistência à tração do concreto (f_{ctk}) é da ordem de 10% de sua resistência à compressão, pode-se afirmar que as deformações provenientes das solicitações de tração influenciam de forma direta nas situações onde o concreto simples pode ser empregado, limitando assim sua utilização (PINHEIRO, 2007).

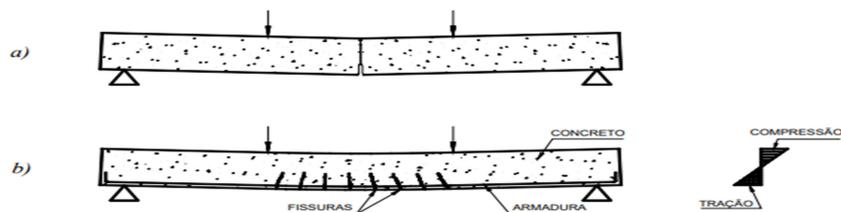
2.2. CONCRETO ARMADO

O concreto armado, por sua vez, surgiu com a necessidade de vencer os esforços de tração supracitados. Dessa forma, associa-se barras de aço aos perfis de concreto como forma de contornar o problema, visto que a aderência do concreto transmite os esforços de tração para as barras. Além de aumentar a ductilidade da peça, o emprego do

aço também melhora a resistência à compressão do concreto, sendo altamente recomendável a associação destes dos materiais (PINHEIRO, 2007).

No caso das barras de aço, estas constituem um tipo de armadura longitudinal contínua. No caso de armações realizadas associando fibras (de aço, nylon, carbono, etc) ao concreto simples, pode-se dizer que a armadura é do tipo descontínua. É possível observar o acréscimo de resistência à tração ao se avaliar as fissuras de uma viga de concreto simples e outra de concreto armado submetidas à esforços de flexão (PFEIL, 1989). A viga de concreto se rompe bruscamente assim que a tensão de tração supera a tensão admissível do concreto, logo após o surgimento das primeiras fissuras (Figura 3-a). Já a viga de concreto armado, apesar das fissuras surgirem na região tracionada da peça, a viga não se romperá caso a tensão de tração não seja superior à tensão admissível do aço utilizado (Figura 3-b).

Figura 3 - Viga de concreto simples (a). Viga de concreto armado (b)



Fonte: (PFEIL, 1989)

2.3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

As fibras utilizadas no reforço de estruturas de concreto são definidas como elementos descontínuos, onde as dimensões da seção transversal do elemento são bem menores do que seu comprimento. No Brasil, utiliza-se a norma ABNT NBR 15530:2009 - “Fibras de aço para concreto - Especificação” para regulamentar a utilização de fibras de aço carbono no reforço de estruturas de concreto (FIGUEIREDO, 2007).

Existem três classes e três tipos de fibras de aço disponíveis no mercado brasileiro. O tipo da fibra depende do formato obtido no sentido longitudinal da fibra, influenciando de forma direta na aderência da fibra à matriz de concreto e podendo ser reta (tipo R), corrugada (tipo C) ou com ancoragem nas extremidades (tipo A). Quanto à seção transversal das fibras, existem três classes de fibras que variam de acordo com o aço que lhes deu origem. As fibras Classe I são fabricadas a partir de arame trefilado a frio, as Classe II são feitas à partir de chapa laminada e cortada a frio, já as Classe III são produzidas à partir de arame trefilado e escarificado. O Quadro 1 a seguir relaciona os

tipos de fibras e suas classes, ilustrando também sua geometria, de acordo com a ABNT NBR 15530:2009.

Quadro 1 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

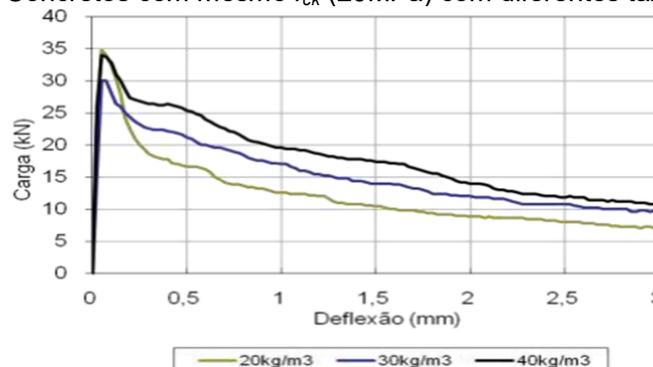
Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: (ABNT NBR 15530:2007)

As fibras de aço, de resistência e módulo de elasticidade (E) adequados, ao serem adicionadas ao concreto em quantidade apropriada funcionam no meio compósito como uma ponte de transferência de tensões através das fissuras do concreto. Sendo assim, o concreto reforçado com fibras de aço deixa de possuir caráter marcadamente frágil aos esforços de tração, passando a ter um comportamento pseudo-dúctil devido à sua capacidade resistente após sua fissuração. Dessa forma, pode-se afirmar que a utilização de fibras de aço proporcionará uma menor fissuração do perfil de concreto (FIGUEIREDO, 2007).

Pode-se afirmar que a capacidade de reforço que as fibras apresentam depende diretamente da taxa de fibras utilizadas, ou seja, quanto maior o teor de fibras adicionadas ao concreto para fins de reforço, maior será a quantidade de fibras atuando como pontes de transferência de tensão (FIGUEIREDO, 2007). O resultado será uma maior capacidade de reforço do compósito após a fissuração, conforme ilustrado na Figura 4. Como se pode observar, quanto maior a taxa de fibras associada ao concreto simples, maior a carga necessária para se atingir um mesmo valor de deflexão, sendo evidente o reforço obtido.

Figura 4 - Concretos com mesmo f_{ck} (20MPa) com diferentes taxas de fibras.

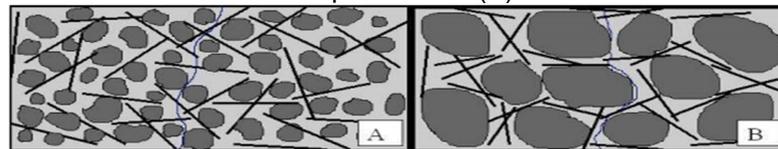


Fonte:(FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000).

Além do teor de fibras utilizado no reforço do concreto, o desempenho do conjunto após a fissuração do concreto também depende da geometria da fibra que foi empregada. A influência da geometria é usualmente representada pelo parâmetro conhecido como fator de forma (λ), sendo este obtido através da razão entre o comprimento da fibra e o diâmetro do círculo cuja área seja igual à área da seção transversal da fibra. Quanto maior o valor de λ , maior a capacidade resistente da peça após a fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2007).

O comprimento da fibra deve ser escolhido de forma a ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado na confecção do concreto. Essa compatibilidade dimensional entre o agregado e as fibras se dá de modo que estas interceptam com a maior frequência possível a fissura se abre no compósito (MAIDL, 1991). Ou seja, quanto maior a compatibilidade entre agregado e fibras, maior a quantidade de fibras que trabalham como pontes de transferência de tensão após a fissuração do concreto, fato que pode ser evidenciado pela Figura 5.

Figura 5 - Elemento onde há a compatibilidade entre fibras e agregado (A). Elemento onde não há compatibilidade (B).



Fonte: (FIGUEIREDO, 2007)

3 METODOLOGIA

3.1. CORPOS DE PROVA

3.1.1. GEOMETRIA

Os corpos de prova utilizados no ensaio em questão foram moldados de acordo com a NBR 5738:2015, sendo a dimensão escolhida de modo a satisfazer as condições estabelecidas pelo Quadro 2. Segundo a norma, o prisma a ser confeccionado deve ser de seção quadrada, com comprimento mínimo e vão de ensaio tabelados. Para o ensaio em questão, foi escolhida a dimensão básica de 150 mm, 500 mm de comprimento mínimo e vão de ensaio de 450 mm.

Quadro 2 - Dimensões básicas para confecção de corpos de prova prismático

Dimensão básica (mm)	Comprimento mínimo (mm)	Vão de ensaio* (mm)
100	350	300
150	500	450
250	800	750
450	1400	1350

Fonte: ABNT NBR 5738

A ABNT NBR 5738 recomenda a confecção de mais de um corpo de prova por amostra. Portanto, foram confeccionados quatro prismas de concreto simples e três prismas de concreto reforçado para cada proporção de fibras utilizada. Ao todo, foram utilizados 16 prismas e 12 cilindros. Além disso, foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos para a verificação do acréscimo de resistência à compressão proporcionado pela adição das fibras de aço ao concreto.

3.1.2. TRONCO DE CONE

O ensaio de abatimento foi realizado antes da concretagem dos corpos de prova, de forma a se avaliar a trabalhabilidade do concreto utilizado. O ensaio em questão foi realizado de acordo com a NBR NM 67:98.

O valor ideal de abatimento depende diretamente da finalidade com que o concreto será empregado, sendo a trabalhabilidade e a consistência fatores intimamente relacionados à relação água/cimento utilizada durante a confecção do concreto. A ABNT NBR 8953 traz o abatimento recomendado de acordo com a aplicação do mesmo, conforme pode se observar na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Classes de consistência do concreto, relacionando-se o abatimento e a aplicação desejada para o mesmo.

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953.

3.1.3. CONCRETAGEM

Foi escolhido concreto de 25 MPa de resistência à compressão, visto que de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 esta é a resistência indicada para que o concreto seja considerado estrutural. Foi utilizado o traço em quilogramas, sendo o mesmo escolhido à partir da literatura (SILVA, 1975), sendo utilizado 64,5 Kg de brita 1, 46,2 Kg

de areia média, 22,1 Kg de cimento e 13,6 Kg de água para a confecção do concreto utilizado em uma forma contendo quatro prismas, para três formas cilíndricas e também para a realização do ensaio de abatimento. As fibras para reforço do concreto foram misturadas em proporções diferentes de acordo com o item 3.1.4. Após a confecção do concreto, foi realizado o ensaio de abatimento (slump test) conforme NM 67:98 para verificar a trabalhabilidade do concreto produzido e, em seguida, foi realizada a concretagem das formas prismáticas e cilíndricas.

Para a concretagem dos corpos de prova prismáticos e cilíndricos, foi seguida a NBR 5738. Nos prismáticos, o concreto foi despejado na forma em duas camadas, sendo adensado manualmente entre uma camada e outra com 75 golpes, conforme ABNT NBR 5738. Nos cilíndricos, a concretagem foi realizada em três camadas, sendo cada camada golpeada 12 vezes com a haste de adensamento em movimentos circulares. A desforma dos corpos de prova prismáticos ocorreu 48 horas após a concretagem, enquanto os corpos de prova cilíndricos foram desformados com 24 horas. Feita a desforma, os corpos de prova foram encaminhados para o Núcleo Tecnológico da Unigran (NTU), onde permaneceram até os 28 dias de idade curando em uma câmara úmida (conforme NBR 9479). Apenas após 28 dias de cura os prismas e cilindros foram submetidos aos ensaios necessários.

Vale ressaltar que as formas foram untadas com óleo antes da realização da concretagem, visto que este procedimento facilita a desforma nas etapas seguintes. O processo de concretagem dos corpos de prova e a aparência do concreto com fibras, podem ser observados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 6 – Processo de concretagem das formas prismáticas. Da esquerda para a direita, pode-se observar as formas limpas, untadas com óleo, concretadas e o processo de desforma seguidos dos prismas prontos para serem levados para a câmara úmida, após 48 horas de cura.



Figura 7 – Detalhe do concreto após a adição das fibras. Na foto, a taxa de fibras utilizada foi de 100Kg de fibras por m³ de concreto.

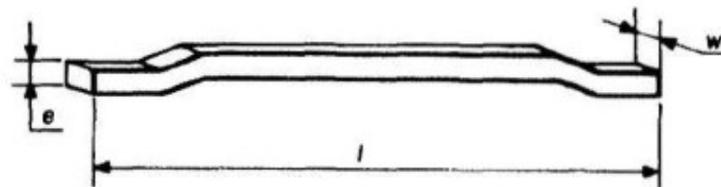


Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

3.1.4. TAXA DE FIBRA UTILIZADA

A fibra utilizada no experimento em questão é do tipo A (com ancoragem nas extremidades), classe II (fibra oriunda de chapa cortada à frio), conforme pode ser observado no Quadro 1 supracitado. O comprimento (l) das mesmas é de 25 mm e a largura (w) é de 0,55 mm. O limite de resistência à tração é de 500 MPa para fibras do tipo A-II (ABNT NBR 15530). A Figura 9 ilustra de forma clara as dimensões de uma fibra do tipo A-II.

Figura 9 - Dimensões relativa de uma fibra de aço do tipo A-II



Fonte: (ABNT NBR 15530, 2007)

O fator de forma (λ) é calculado através da relação l/d_e onde o diâmetro equivalente se trata do diâmetro de um círculo com área equivalente à seção da fibra utilizada (ABNT NBR 15530). Dessa forma, o diâmetro equivalente é obtido através da seguinte equação:

$$d_e = \sqrt{\frac{4 \times e \times w}{\pi}} \quad (1)$$

Fator de forma:

$$\lambda = \frac{l}{d_e} \quad (2)$$

O diâmetro equivalente das fibras utilizadas foi de 0,5 mm. O fator de forma das fibras utilizadas foi de 0,42. Estes dados, assim como as dimensões do comprimento (l), largura (w) e espessura (e) são dados fornecidos pelo fabricante em ficha técnica descritiva do material comercializado pelos mesmos.

Diferentes taxas de fibras de aço (Marca TEC-MACHINE FIBRAS ESTRUTURAIS) foram utilizadas para a verificação do acréscimo de resistência que as mesmas proporcionaram ao prisma de ensaio. As taxas utilizadas foram de 50, 75 e 100 Kg/m³ respectivamente. Estas taxas de aço foram arbitrariamente escolhidas visando aproveitar a elevada quantidade de material que foi adquirida, possibilitando assim o estudo da utilização de taxas maiores do que as habituais para o concreto ensaiado à flexão pura. A Figura 10 ilustra as fibras utilizadas.

Figura 10 - Fibras de aço utilizadas no presente trabalho, tipo A-II.



Fonte: (AUTOR, Setembro/2019)

Sendo os prismas ensaiados à flexão com dimensões (0,15 x 0,15 x 0,5) m, pode-se dizer que o volume de um único prisma é de 0,01125 m³. Portanto, a quantidade de fibras utilizadas para cada traço (quatro prisma e três cilindros) de acordo com a taxa escolhida é descrita pela Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de fibras utilizadas por traço, de acordo com a taxa de armadura utilizada.

Taxa de fibras (Kg/m ³)	Consumo de fibras de aço (Kg)
50	3.11
75	4.66
100	6.21
Total	13.98

Fonte: (AUTOR, 2019)

3.1.5. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A caracterização dos agregados utilizados na confecção do concreto para os ensaios do presente trabalho foi realizada com base na NBR NM 248:2003. Segundo a norma em questão, há diferença no peso da amostra a ser submetida ao ensaio de

acordo com a dimensão máxima nominal do agregado utilizado. Dessa forma, sendo a dimensão máxima da brita 1 igual a 19mm e da areia $\leq 4,5$ mm, foram utilizadas amostras de 5 Kg de brita 1 e de 500 gramas de areia média para a realização do ensaio.

As amostras permaneceram na estufa por 24 horas, sendo posteriormente submetidas ao peneiramento utilizando equipamento ilustrado na Figura 11. Foram anotadas as massas retidas em cada peneira da série normal e realizados os cálculos percentuais para a construção das curvas de granulometria em escala monologarítmica.

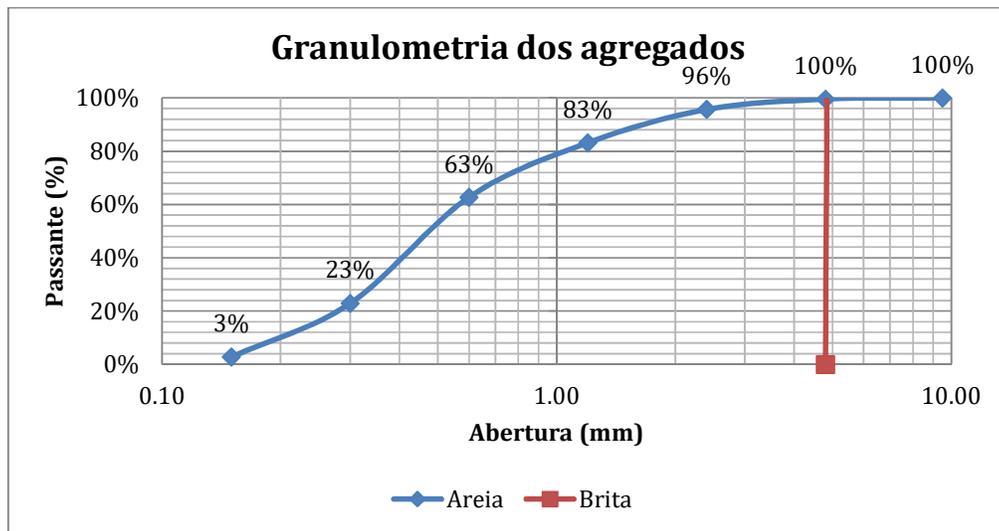
Figura 11 - Dispositivo utilizado no ensaio de peneiramento (à direita) e a areia após a realização do ensaio em questão (à esquerda), sendo possível observar nitidamente a segregação das partículas.



Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

A caracterização da areia foi realizada com base em seu módulo de finura (MF), onde se obtém o mesmo através da somatória dos percentuais acumulados retidos nas peneiras de série normal dividido por 100. O módulo de finura das amostras foi de 2,4 sendo possível caracterizar a areia utilizada como média. Quanto à brita, os percentuais retidos se encontraram entre 9,5 mm e 19 mm, valores característicos referentes à brita de número 1. As curvas granulométricas dos agregados supracitados podem ser observadas na Figura 12.

Figura 12- Curva granulométrica referente à caracterização. Agregado miúdo (areia média) e graúdo (brita 1) utilizados na confecção do concreto utilizado.



Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

O equipamento utilizado deve ser configurado de modo que se obtenha um dispositivo de flexão que garanta a força aplicada de forma perpendicular às faces superior e inferior do prisma ensaiado. A ABNT NBR 12142:2010 estabelece as condições necessárias a serem cumpridas pelo equipamento durante a realização dos ensaios.

Vale ressaltar que a aplicação de duas cargas pontuais ocorre de forma que entre as duas cargas o único esforço interno atuante seja o momento fletor. Dessa forma, garante-se que a ruptura ocorrerá em consequência do que é conhecido como flexão pura, ou seja, a região está submetida somente ao momento fletor constante (MARTHA, 2010).

O ensaio de tração na flexão foi realizado pelo Núcleo Tecnológico da Unigran (NTU), sendo os laudos resultantes do ensaio emitidos no dia 04/10/2019. As tensões de ruptura média para tração na compressão estão descritas no item 4.1A ABNT NBR 12142:2010 estabelece a maneira como o ensaio deve ser realizado.

3.2.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de prova utilizados para a verificação da resistência à compressão axial possuíam 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo de formato cilíndrico. Os mesmos foram submetidos ao ensaio de compressão após 28 dias de cura em câmara úmida, conforme ABNT NBR 9479. O ensaio em questão foi realizado conforme ABNT NBR 5739:2018.

O ensaio de compressão axial foi realizado pelo Núcleo Tecnológico da Unigran (NTU), sendo os laudos resultantes do ensaio emitidos no dia 04/10/2019. As tensões de ruptura média para compressão axial estão descritas no item 4.2 do presente trabalho. A

3.3. CÁLCULOS

A norma NBR 12142:2010 estabelece que a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) deve ser calculada utilizando-se a equação de número 3. A norma estabelece que, em caso da ruptura ocorrer fora do terço médio do vão (ou seja, fora da região de flexão pura, conforme Figura 13 a uma distância não superior a 5% de l (22,5 mm), a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) deve ser calculada utilizando-se a equação 4.

Ruptura dentro do terço médio

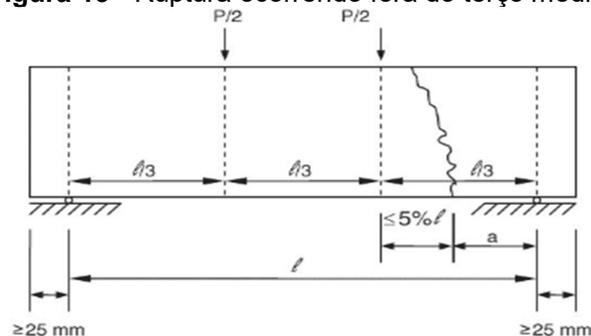
$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (3)$$

Ruptura fora do terço médio

$$f_{ct,f} = 3 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (4)$$

Em que: $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão (MPa); F é a força máxima registrada na máquina onde o ensaio foi realizado (N); l é a dimensão do vão entre os apoios (mm); b é a largura média do corpo de prova (mm); d é a altura média do corpo de prova (mm); a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e o apoio mais próximo (mm).

Figura 13 - Ruptura ocorrendo fora do terço médio.



Fonte: (ABNT NBR 12142, 2010)

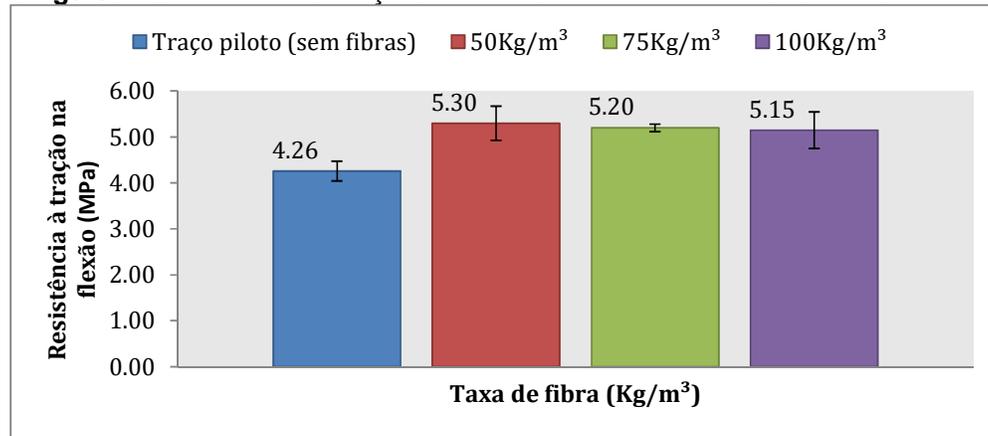
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PURA

Durante a realização dos ensaios, foi constatado que, em todos os 16 corpos de prova prismáticos ensaiados, a ruptura ocorreu dentro de seu terço médio. Dessa forma,

pode-se calcular a resistência à tração na flexão através da equação (3). A média dos resultados obtidos através dos cálculos realizados está demonstrada na Figura 14.

Figura 14- Resistência à tração na flexão relacionada à taxa de fibras utilizada



Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

Através da análise dos resultados obtidos, observa-se que a adição de fibras de aço do tipo A-II no concreto proporcionou um aumento considerável nos valores de resistência à tração na flexão ($f_{ct,r}$). No entanto, apesar de se proporcionar um aumento da resistência com relação ao concreto simples, pode-se observar também que conforme a taxa de fibras aumentou o acréscimo de resistência à tração diminuiu.

Segundo Figueiredo (2000), ao se utilizar fibras do tipo A-II com 36 mm de comprimento, observou-se que a resistência à tração na flexão aumentou e depois decresceu conforme ocorreu o aumento da taxa de fibras utilizada, conforme observado na Tabela 3. Dessa forma, foi possível validar os resultados obtidos com as taxas e o tipo de fibra utilizado no presente trabalho.

Tabela 3 – Resistência à tração na flexão de concretos de 25MPa reforçados com fibras de aço. Estudos realizados por Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

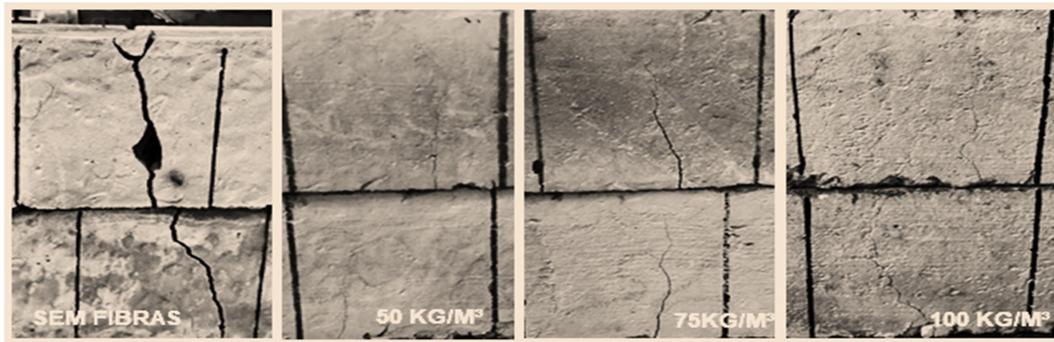
Taxa de fibras utilizada (Kg/m³)	Resistência à tração na flexão (MPa)
0	4.7
20	5.3
30	4.4
40	5.2

Fonte: (Figueiredo; Nunes ; Tanesi , 2000)

Durante a realização do experimento, pode-se observar que quanto maior a taxa de fibra utilizada, menores foram as fissuras encontradas nos corpos de prova durante seu rompimento. Este fato pode ser explicado pelo fato de as fibras de aço, por constituírem um tipo de armadura descontínua, proporcionam uma melhor distribuição das

tensões de flexão ao longo do elemento. A figura 15 ilustra a fissuração durante o ensaio de tração na flexão.

Figura 15 – Redução das fissuras conforme a taxa de fibra aumenta.

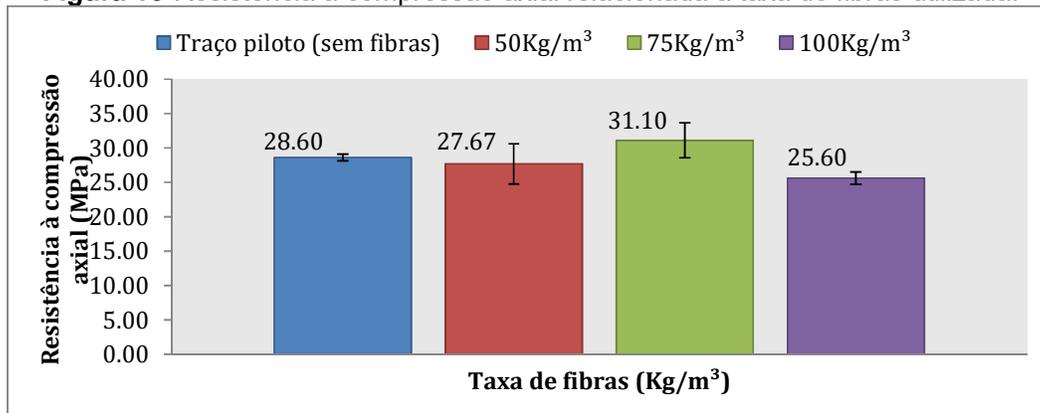


Fonte: (AUTOR, Outubro/2019).

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Durante a realização do experimento, observou-se que a adição de fibras de aço do tipo A-II alterou a resistência à compressão do concreto produzido. Para se obter os valores de resistência à compressão, foi necessário dividir as forças de ruptura registradas pela máquina pela área da superfície circular do corpo de prova. Os resultados referentes ao ensaio de compressão axial podem ser observados na Figura 16.

Figura 16-Resistência à compressão axial relacionada à taxa de fibras utilizada.



Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

A redução de resistência à compressão conforme se adiciona fibras de aço do tipo A-II pode ser explicada devido às propriedades dos materiais utilizados. Com a adição das fibras, a quantidade de concreto presente em um mesmo volume de corpo de prova cilíndrico diminui. Ou seja, sendo a principal função do concreto resistir aos esforços de compressão, a redução deste material por fibras de aço ocasiona uma perda de

resistência visto que o papel do aço é resistir aos esforços de tração e não de compressão.

Segundo Figueiredo (2000), a resistência à compressão axial dos corpos de prova diminui conforme ocorre o aumento da taxa de fibras utilizada até a taxa de 30 Kg/m³. A partir da taxa de 40 Kg/m³ a resistência começa a aumentar novamente de forma considerável, fato esse que possibilita explicar o motivo do aumento repentino da resistência à compressão em proporção similar no traço de 75 Kg/m³ confeccionado no presente trabalho. Os resultados obtidos por Figueiredo (2000) estão presentes na Tabela 4, sendo baseadas em estudos utilizando fibra do tipo A-II com 36 mm de comprimento.

Tabela 4 – Resistência à compressão de concretos de 25 MPa reforçados com fibras de aço. Estudos realizados por Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

Taxa de fibras utilizada (Kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
0	25.7
20	24.7
30	22.1
40	25.4

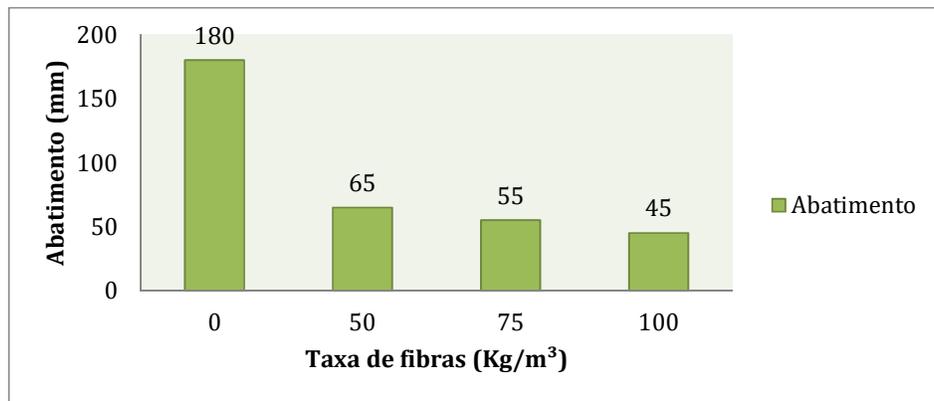
Fonte: (Figueiredo; Nunes; Tanesi, 2000)

Além disso, pode-se observar que o f_{ck} do concreto obtido experimentalmente para o traço piloto foi 3,6 MPa acima do esperado (28,6 > 25 MPa). A hipótese para que isso tenha ocorrido é a de que a areia utilizada na confecção do concreto deveria ser grossa de acordo com a literatura (SILVA, 1975), porém foi utilizada a areia média, e não grossa. Dessa forma, a areia média pode ter proporcionado um melhor preenchimento dos vazios do concreto, melhorando assim a resistência à compressão axial do mesmo.

4.3. TRABALHABILIDADE

Diante da realização do teste de abatimento para todos os traços de concreto executados, pode-se observar que a trabalhabilidade do concreto é reduzida de forma expressiva quando as fibras são adicionadas. Provavelmente este fato ocorreu devido ao atrito das fibras no interior do concreto durante a realização do ensaio supracitado. A Figura 17 ilustra os resultados obtidos em relação a trabalhabilidade.

Figura 1- Abatimento do concreto em função da taxa de fibras utilizada. O ensaio em questão foi realizado uma vez por traço.



Fonte: (AUTOR, Outubro/2019)

De acordo com Figura 19, o traço piloto foi classificado como classe S160 sendo indicado para elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto. Com o acréscimo de fibras, os traços com taxas de 50 Kg/m³ e 75 Kg/m³ podem ser classificados como classe S50, sendo indicados para alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações (radiers, por exemplo). Já o traço contendo 100 Kg/m³ é indicado para utilização como concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado, visto que o mesmo é classificado como classe S10. O mesmo tipo de classificação é utilizado por Figueiredo (2007) ao adotar slump 150 ± 20 mm para a execução de projetos utilizando fibras de aço em elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto (classe S160).

5 CONCLUSÃO

Diante do exposto pode-se afirmar que adição de fibras de aço do tipo A-II em elementos de concreto estrutural proporcionou um aumento considerável de resistência à tração na flexão, porém reduziu significativamente os valores de resistência à compressão axial e também de abatimento, comprometendo assim a trabalhabilidade do mesmo. Dessa forma, vale ressaltar que a utilização de fibras de aço para reforço do concreto se torna inviável para elementos estruturais quando comparado aos ganhos de resistência proporcionados pelo concreto armado com barras longitudinais, sendo preferível a utilização do concreto armado tradicionalmente utilizado.

Entretanto, devido suas boas propriedades com relação à capacidade de reduzir fissuras em elementos de concreto, as fibras de aço se tornam altamente recomendáveis para contrapisos e reparos de patologias construtivas não estruturais. Contudo, o estudo do emprego de fibras de aço como reforço do concreto deve ser estudado com mais profundidade para verificação de sua viabilidade técnica.

6 AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que tornaram este projeto possível. Aos meus pais, Roberto e Jaqueline Bianchi, pelo apoio financeiro e incentivo incondicional. Aos que me ajudaram durante a confecção dos corpos de prova (André Luiz Barbosa Bianchi, Luana Ely Farias de Souza, Bruno Gonçalves, Matheus Marra e Estela Westemaier). Aos técnicos André e Everton pelo auxílio durante a utilização dos laboratórios. Aos professores André Mello e Maria Tommaselli pela orientação durante todo o projeto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 Procedimentos para a moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro 2018;

NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

NBR 8953. Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT:2015.

NBR 9479 . Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT:2006.

NBR 12142. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT:2010.

NBR 12655. Concreto – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT:2015

NBR 15530. Fibras de aço para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT:2007.

NBR NM 67. Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT:1998.

NBR NM 248. Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT:2003.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Fundamentos do concreto armado. Bauru: UNESP, 2006.

EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESCUSP, 2000. 441 p.

FIGUEIREDO, A. D., CHAMA NETO, P. J. A nova especificação brasileira para tubos de concreto para águas pluviais e esgoto In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves, 2007. Anais.

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. In: FIFTH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON FIBRE-REINFORCED CONCRETES (FRC), 2000. Lyon. Fibre-Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB'2000. Proceedings. RILEM Publications S.A.R.L., Lyon, 2000. Pp 103-18.

MAIDL, B. Stahlfaserbeton. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

Martha, L. F. (2010). Métodos Básicos da Análise de Estruturas. Rio de Janeiro:Elsevier Editora.

PFEIL, W. Concreto armado, v. 1, 2 e 3, 5a ed., Rio de Janeiro, Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1989.

PINHEIRO, L. M. (2007) Fundamentos do concreto e projeto de edifícios. ed.rev. São Carlos, EESC-USP.

SILVA, R.G. Manual de traços de concreto. São Paulo, Ed. Nobel, 3a ed., 1975, 142p.