

Filipe Teixeira Medeiros

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Petrópolis)

Rafael Vargas Gomes

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Petrópolis)

Kíssila Botelho Goliath

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Petrópolis)

RESUMO

Os materiais compósitos são uma constante ao longo da construção civil. Pode-se dizer que o concreto é o material mais demandando. Isso se deve à sua baixa capacidade de custo, porém, apesar dos avanços tecnológicos, esforços ainda são necessários para melhorar suas propriedades deficientes. O concreto reforçado com fibras de aço vem sendo discutido como um compósito promissor, uma vez que as fibras melhoram o desempenho do concreto junto às barras de aço, aumentando sua resistência ao cisalhamento e tenacidade, o que reduz a possibilidade de ruptura súbita, controlando ainda a propagação de fissuras, e melhorando o comportamento do material quando submetido ao esforço de tração. Esse trabalho revisa o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com adição de fibras de aço, sendo realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso das mesmas em vigas de concreto, uma análise crítica entre as diferenças do concreto convencional para o concreto incorporado com fibras de aço, um experimento através da moldagem de 5 prismas de concreto armado 50x15x15 cm com diferentes variáveis e proporções quanto ao volume de fibras de aço, sendo submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos afim de ser verificado a carga de primeira fissura e carga última e com informações sobre o material, sua aplicação, investimentos, vantagens e desvantagens. O estudo vem com o intuito geral de demonstrar de forma clara e didática os parâmetros necessários para a confecção do compósito e resultados afim de agregar novos resultados às pesquisas nacionais.

Palavras-chave: Compósito; Fibras de aço; Vigas; Cisalhamento

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos são uma constante ao longo da construção civil. Pode-se dizer que o concreto é o material compósito mais demandando neste setor. Isso se deve ao seu baixo custo, porém, apesar dos avanços tecnológicos, esforços ainda são necessários para melhorar suas propriedades deficientes.

Do ponto de vista mecânico, o concreto, em comparação ao seu comportamento quando submetido à compressão, apresenta um desempenho consideravelmente inferior

quando solicitado à tração, apresentando, além de comportamento frágil, pouca ou nenhuma ductilidade após a primeira fissura. Tal fato tem motivado a busca constante por novos materiais que atendam às exigências cada vez mais elevadas dos projetos estruturais. Segundo BELLO (2014), o reforço com fibras foi impulsionado por pesquisas realizadas no final dos anos 50 e início dos anos 60 por iniciativa de RAMOULDI e BASTON (1963) e RAMOULDI e MANDEL (1964), sendo de realçar a aplicação de fibras de aço. Entretanto, a comercialização das fibras atingiu o ápice na década de 70, particularmente na Europa, Japão e Estados Unidos.

Avanços recentes mostram que a adição de fibras à massa de concreto melhora o desempenho do concreto junto com as barras de aço. Sendo assim, o concreto reforçado com fibra de aço surge como uma forma de minimizar o comportamento frágil quando sujeitos a esforços de tração passando a ser um material pseudo-dúctil, apresentando uma resistência a esforços nele aplicados mesmo após a fissuração (FIGUEIREDO, 2000). As fibras destinadas ao reforço do concreto são comumente chamadas como microfibras.

De forma geral, deve ser usado em estruturas que estão apoiadas ao solo ou maciço, porque estão em contato com o meio elástico e permitem a redistribuição de tensões. Como exemplo, temos: Túneis, tubos de concreto, pavimentos portuários, estacionamentos e garagens, dentre outros. Têm sido largamente utilizados em pavimentos industriais apresentando agilidade no processo de concretagem, muitas vezes sendo uma ótima alternativa para casos em que o acesso de equipamentos ao canteiro é limitado. Levando em conta o custo benefício, vale salientar que é muito mais satisfatório para obras de grande porte.

As fibras de aço são as mais utilizadas para aplicações estruturais e são levadas em conta em muitas aplicações não estruturais (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Estas apresentam uma variedade quanto sua forma e tamanho com o intuito de elevar a sua aderência com a matriz e, cada vez mais, tem sido alvo de pesquisas, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção.

Apesar de garantir diversos benefícios ao material, a fibra para concreto precisa ser utilizada de maneira adequada. O uso incorreto, além de não obter nenhum benefício, pode acarretar prejuízos, não só financeiros, mas também na qualidade do concreto.

Para obtenção de um resultado satisfatório no processo, é imprescindível o conhecimento das propriedades dos materiais, visto a necessidade de limitar as variações de volume do concreto e controlar a dissipação do calor de hidratação gerado. Diante dessa necessidade, ABNT publicou em 2007 a NBR 15530 - Fibras de aço para concreto - Especificação, que estabelece parâmetros para a classificação das fibras de aço.

A utilização de fibras de aço é uma opção viável para controlar a taxa de armadura em uma estrutura de concreto armado, tendo em vista que as fibras proporcionam elevada tenacidade e viabilizam a contribuição do concreto tracionado na avaliação da resistência do elemento estrutural em análise, podendo aprimorar significativamente o caráter frágil do concreto de alta resistência, reduzindo a possibilidade de uma ruptura súbita. (BARROS, Frederico, 2015).

A evolução e avanço da construção civil proporcionaram a introdução de vários novos materiais, e a fibra de aço para concreto é um exemplo. Logo, esta pesquisa visa demonstrar quando a incorporação da fibra de aço no concreto é útil e quais suas propriedades e aplicabilidades.

Em geral, as vigas de concreto armado estão submetidas, simultaneamente, à esforços de flexão e cisalhamento, onde a preocupação com tais solicitações é evidente na prática do dimensionamento. O aumento da utilização de fibras de aço em elementos de concreto se justifica pelo seu elevado desempenho estrutural. Os compósitos são materiais compostos por duas fases: Matriz e Fibras. A adição de fibras minimiza o comportamento frágil e faz com que o concreto se comporte de maneira pseudo-dúctil. Assim é possível

observar a melhora em algumas de suas propriedades, atuando como um reforço da matriz e servindo como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, controlando uma de suas maiores patologias, a fissuração. Além de melhorar a aderência entre a matriz cimentícia e as barras de armadura, trazendo para a estrutura certa ductilidade, majorando a sua resistência à tração no cisalhamento e a tenacidade.

O presente estudo tem por objetivo avaliar metodologias para estimar a capacidade resistente de vigas em concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) quando submetidas ao esforço de cisalhamento. Sendo assim, será feita uma análise da influência da incorporação de fibras de aço no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado; uma revisão bibliográfica sobre o uso de adição de fibras em vigas de concreto armado será realizada para cumprir tal tarefa.

REFERENCIAL TEÓRICO

CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

Não diferente de outros setores, a construção civil está em constante desenvolvimento através de novas tecnologias construtivas e novos materiais que possibilitam otimizações estruturais. Os Materiais compósitos são uma constante ao longo dessa cadeia. Segundo HULL E CLYNE (1996) são compostos por dois ou mais elementos imiscíveis entre si, constituídos por matriz e reforço.

Sendo parte integrante de praticamente todas as obras, o cimento é um dos principais componentes do concreto armado. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, o consumo de cimento avançou 80% no período de 2012 a 2015, avalia Valter Frigieri, diretor de Mercado da ABCP. Basicamente, o cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que se enrijece ao entrar em contato com a água, sendo um material de composição do concreto, podendo ter variações e tipos de acordo com a necessária resistência e utilidade.

O concreto é o material mais demandado dentro da construção civil. Obtido a partir da mistura de cimento, água, agregados e aditivos. Os agregados do concreto podem ser graúdos, como a brita, ou miúdos como é o caso da areia. A principal característica do concreto endurecido é sua elevada resistência à compressão.

BORGES (2002) cita que a resistência à tração do concreto influencia diretamente o processo de fissuração, além disso, de acordo com o CEB-FIP (1993), a resistência à tração do concreto também está relacionada, dentre outros aspectos, à contribuição do material a esforços de cisalhamento.

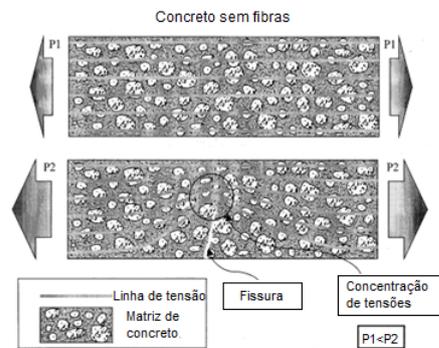
No meio acadêmico, a utilização de matrizes cimentícia reforçadas com fibras vem sendo estudada intensamente a partir da década de sessenta, a fim de superar a natureza frágil do concreto e de trazer novas possibilidades para utilização como material de construção (PEREIRA, 2014).

Segundo FIGUEIREDO (2000) a adição de fibras de aço no concreto minimiza o seu comportamento frágil típico e faz com que o concreto passe a se comportar como um material pseudo-dúctil, ou seja, o concreto apresenta resistência residual após sua fissuração. Por conseguinte, aumentando consideravelmente sua tenacidade e ductilidade. Ainda com relação às fibras, ele complementa afirmando que o tipo de fibra utilizado no concreto influencia diretamente no comportamento final do concreto reforçado com fibras.

No caso do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), o concreto comporta-se como a matriz e as fibras como reforço. É por meio dessa inter-relação que este compósito melhora o comportamento do material quando submetido ao esforço de tração bem elevadas.

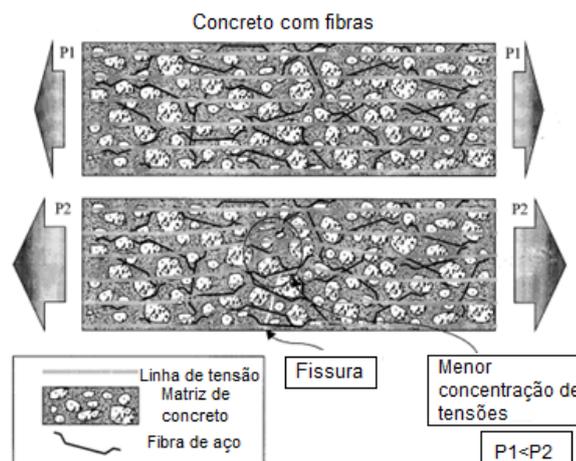
As figuras 1 e 2 abaixo mostram uma comparação entre o concreto sem fibras quando submetido à concentração de tensões, aumentando a propagação de fissuras, e com reforço das fibras, onde elas atuam com ponte de transferência de tensões, diminuindo essas concentrações.

Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras.



Fonte: FIGUEIREDO, (2000).

Figura 2 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com reforço de fibras.



Fonte: FIGUEIREDO, (2000).

Fibras de aço

As fibras de aço são segmentos de aço de alta resistência com ancoragem nas extremidades que são misturados ao concreto, normalmente com comprimentos entre 30 e 60 mm e têm como objetivo reforçar a matriz, dando mais segurança e deixando o processo construtivo mais eficiente.

Segundo o ACI 544.4R-88 as fibras de aço possuem formatos diversos, podendo ser lisas ou curvadas e assumir seções transversais circulares, retangulares, semicirculares ou irregulares. Os dois parâmetros mais efetivos para avaliar o comportamento da fibra de aço no compósito são: o fator de forma e volume de fibras.

A **fibra** confere desempenho ao concreto quando incorporada na sua mistura, desde que a dosagem ou a quantidade desta seja adequada para a finalidade da estrutura que se objetiva construir. Os principais usos de uma **fibra de aço** são em pisos, pavimentos, revestimento de túneis e pré-fabricados. Dessa forma ela pode ser inserida em diferentes tipos de construções, garantindo diversas vantagens com sua utilização.

A NBR 15530 (2007), a primeira norma brasileira a tratar diretamente das fibras de aço, visa padronizar as fibras produzidas no Brasil definindo as resistências limites à tração, fatores de forma mínimos e subdivide as fibras de aço em três grupos, segundo sua conformação geométrica (Tabela 1). Sendo elas:

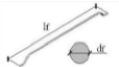
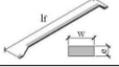
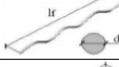
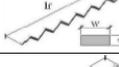
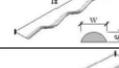
- Tipo A: fibras de aço com ancoragem nas extremidades;
- Tipo C: fibras de aço corrugadas;
- Tipo B: fibras de aço retas ou lisas.

Em relação ao processo que deu origem ao aço utilizado nas fibras, a norma apresenta a seguinte classificação:

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

MORAES NETO (2013) pontua que a eficácia das fibras em melhorar as propriedades mecânicas da matriz de concreto pode ser atribuída principalmente aos mecanismos responsáveis pela transferência das tensões entre a fibra e o concreto pelo efeito de “costura” gerado pelas fibras.

Tabela 1 - Classificação das fibras de aço.

Tipo	Classe	Geometria	Fator de forma mínimo	Limite de resistência à tração (MPa)
A	I		40	1000
	II		30	500
C	I		40	800
	II		30	500
	III		30	800
B	I		40	1000
	II		30	500

Fonte: NBR 15530 (2007).

Matriz

O concreto é por si só, um compósito formado por três fases principais: a pasta de cimento, os agregados miúdos e os grãos, sendo os agregados agem como o reforço da pasta cimentícia. Capaz de apresentar uma grande variação de suas propriedades em função do tipo de componentes principais e de suas proporções, bem como de utilização ou não de uma grande variedade de aditivos e adições. Tem inúmeras vantagens como, a capacidade de produzir estruturas com infinitas variações de forma.

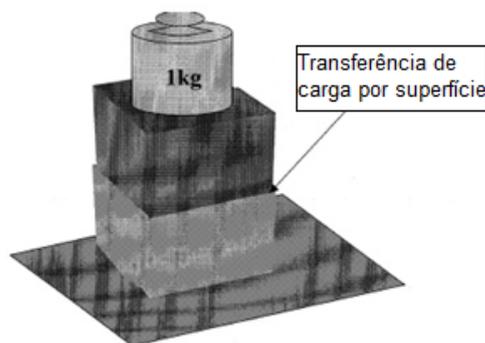
Contudo, o concreto apresenta resistência à tração bem inferior à resistência à compressão cuja relação está, geralmente, em torno de 0,07 e 0,11. Apresenta um comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais como o aço. Este comportamento está associado às fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto, que prejudicam muito mais o material quando solicitado à tração do que à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

É possível associar a reduzida capacidade de resistência à tração à dificuldade do concreto interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de tensão. Isto ocorre pelo fato de a direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal de tensão.

GRIFFITH (1920) associa a ruptura do material a uma energia de superfície que deve ser formada, concluindo que, por apresentar uma superfície total de ruptura menor, o gasto energético associado à ruptura por tração no concreto é também reduzido. Assim, o trabalho de ponte de transferência de tensão que a fibra realiza através das fissuras no concreto é um mecanismo muito interessante de aumento da energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação de fissuras.

Podemos entender este comportamento, típico dos materiais frágeis pelo modelo apresentado na figura 3 abaixo, uma representação simplificada da transferência de tensão de compressão por meio de uma superfície, onde dois cubos sobrepostos conseguem transferir tensão pelo contato quando comprimidos. Por outro lado, quando o conjunto é tracionado, como ocorre quando desempilhamos as caixas, o conjunto não oferece resistência à separação, ou seja, tem resistência à tração nula.

Figura 3 - Representação simplificada da transferência de tensão de compressão por meio de uma superfície



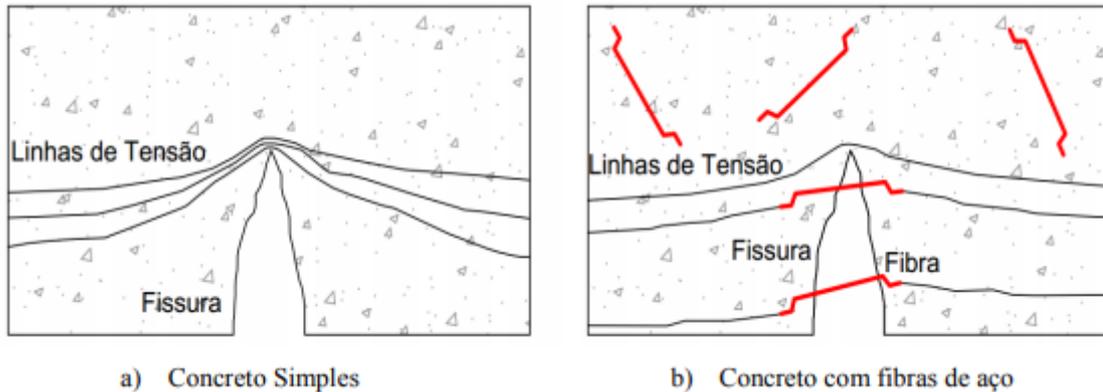
Fonte: MEHTA e MONTEIRO, (1994).

Influências da adição das fibras de aço

A utilização de fibras de aço melhora consideravelmente algumas propriedades do concreto. Comparativamente ao concreto simples, pode-se observar maior tenacidade, maior resistência a impactos, abrasão e fadiga e a redistribuição das tensões no plano de uma fissura. Entre os fatores que influenciam as propriedades mecânicas do CRFA pontua-se o tipo de fibra, fator de forma, volume de fibras, resistência do concreto e a dimensão do agregado graúdo.

A figura 4a abaixo, mostra a redistribuição das tensões no plano de uma fissura, onde no concreto simples, a fissura se apresenta como uma barreira à propagação das tensões, ocasionando uma concentração de tensões na extremidade da fissura, a qual contribui para a sua abertura descontrolada e ao modo de ruína brusco e frágil após a formação das primeiras fissuras. Diferentemente, no CRFA (Figura 4b), as fibras atuam como pontes de transferência de tensões no plano da fissura, impedindo a sua propagação, proporcionando ductilidade ao material e incorporando resistência residual após a fissuração, alterando o modo de ruína. (BARROS, F. C. G. M. B., 2015).

Figura 4 - Redistribuição das tensões no plano de uma fissura



Fonte: BARROS, F. C. G. M. B., (2015).

Moraes Neto (2013) pontua que, a eficácia das fibras em melhorar as propriedades mecânicas da matriz de concreto, pode ser atribuída principalmente aos mecanismos responsáveis pela transferência das tensões entre a fibra e o concreto pelo efeito de “costura” gerado pelas fibras. Ou seja, o concreto reforçado com fibras apresenta certa capacidade resistente após a sua fissuração descaracterizando o comportamento frágil típico do material quando tracionado. Assim, com a utilização de fibras, será assegurada menor abertura e propagação das fissuras.

Para que as fibras desempenhem um papel de reforço efetivo, há a necessidade de garantir a compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras. O comprimento das fibras deve ser, no mínimo, o dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo. Dessa forma, a disposição das fibras na massa de concreto (entre os agregados), é favorecida, garantindo um melhor desempenho do efeito de “costura” (FIGUEREDO, 2000).

Como a eficiência da fibra depende de sua atuação como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, podem-se considerar alguns aspectos fundamentais. Um deles é o fato de a capacidade de reforço que as fibras apresentam depender diretamente do teor de fibra utilizado. Ou seja, quanto maior for o teor, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência, o que aumenta a capacidade de reforço pós-fissuração do compósito, (FIGUEIREDO, A. D., 2011).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como relatado acima, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar o comportamento estrutural, com foco na resistência ao cisalhamento, de vigas de concreto armado com fibras de aço, buscando oferecer subsídios para a avaliação dos efeitos da incorporação dessas fibras numa matriz cimentícia.

A revisão bibliográfica disponível, forneceu a base teórica para a escolha dos parâmetros básicos que seriam variados para geração dos compósitos com incorporação de fibras de aço, bem como permitiu definir quais estratégias para os ensaios utilizados.

Assim, foi elaborado um programa experimental para atingir o objetivo proposto. No mesmo, serão descritos os materiais utilizados e os procedimentos de ensaio empregados para avaliar a resistência ao cisalhamento de prismas de concretos com fibras de aço.

Foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos 10cmx20cm (diâmetro x altura) com concreto convencional para garantir a resistência à compressão do concreto. Também foram confeccionados cinco prismas 50cmx15cmx15cm (largura x altura x base), sendo: um de referência, com armadura longitudinal e transversal apenas com concreto convencional; um com apenas armadura longitudinal e 7% de fibra de aço em relação a

quantidade de cimento; um com armadura longitudinal e transversal, com 7% de fibra de aço em relação a quantidade de cimento; um com apenas armadura longitudinal, com 14% de fibra de aço em relação a quantidade de cimento; e um contendo armadura transversal e longitudinal com 14% de fibra de aço.

Após garantir o tempo de cura (28 dias) de todos as amostras, os mesmos foram submetidos aos respectivos ensaios, isto é, os corpos de prova cilíndricos foram para garantir o controle tecnológico e de qualidade com ensaio de resistência a compressão e os prismas para verificação das resistências de cisalhamento através do ensaio de quatro pontos.

Caracterização do concreto

Para confecção das matrizes do concreto de referência, foram empregados materiais comumente encontrados em obras, conforme apresentado a seguir.

Cimento

Para a produção do concreto a escolha do cimento foi realizada pelo critério de uso geral e comum a obras urbanas que possuem uma agressividade moderada. Para isso, foi utilizado o cimento Portland CPII do fabricante TUPI, que atende todos os parâmetros necessários da norma vigente NBR 11578/1991 (Cimento Portland composto).

Agregados

Para a produção do concreto foi utilizado agregado miúdo e graúdo cuja especificações estão ditas nos tópicos 4.1.2.1 e 4.1.2.2.

Agregado miúdo

Pode-se denominar agregados miúdos, grãos que possuem dimensão inferior a 4,8 mm, isto é que passa pela malha da peneira ABNT referente. Para a produção deste experimento, foi utilizada areia natura lavada com principal fragmentação de quartzo. Para se obter uma variação na granulometria, foi utilizada uma peneira de malha média, ou seja, espaçamento inferior a 1,2 mm.

Agregado graúdo

Para a utilização do concreto deste trabalho, foi utilizado agregados de granulometria entre 4,8 mm e 9,5 mm. Dentre dessas condições se denomina o agregado graúdo de brita 0, fruto da fragmentação de gnaisse.

Fibras de aço

Foi utilizada a fibra de aço em pente Dramix do tipo A (fibras de aço com ancoragem nas extremidades) da classe I (oriunda de arame trefilado a frio), com módulo de elasticidade de 200Gpa, produzida pela empresa Belgo Bekaert Arames/Grupo Arcelor, conforme ilustrado na figura 35.

O fator de forma da fibra foi 45, comprimento de 30mm e diâmetro de 0,62mm, o que permite uma mistura rápida e uma distribuição perfeitamente homogênea, sem a formação de “bolas” e “ouriços”; os fios de aço treliçados garantem resistência à tração de 1200Mpa e favorece uma maior ancoragem dentro da matriz do concreto.

Figura 5 - Fibras de aço em pente



Fonte: Autores, (2020).

Madeira

Para moldagem dos exemplares foram confeccionadas fôrmas com madeira Pinus nas dimensões 15x15x50, conforme figura 36 abaixo. O Procedimento de preparação das fôrmas iniciou-se com a compra das tábuas pinus e do corte com serra mármore makita 1450w 110v na dimensão desejada, seguido da vedação da base, do estaqueamento e travamento das laterais com a utilização de prego 17x27, e do posicionamento sobre base nivelada.

Figura 6 - Fôrma de madeira Pinus



Fonte: Autores, (2020).

Aço

Para armadura transversal foi utilizado aço CA-50 de bitola $\varnothing 1/4$ " (6,3 mm) com dimensão de 11x11 e espaçamento de 10 cm. Na armadura longitudinal foi utilizado aço CA-60 com bitola $\varnothing 3/16$ " (4,2 mm) e dimensão de 46x11. A figura 37 ilustra a armadura transversal e longitudinal. Todas essas dimensões foram de acordo para obedecer a distância para o cobrimento da armadura.

Figura 7 - Armadura transversal e longitudinal



Fonte: Autores, (2020).

Método executivo

Os ajustes quantitativos para produção do concreto moldado “in loco” por meio do equipamento mecânico (betoneira) foram com base nos estudos e análises para atingir 20 Mpa de resistência e Slump 12+/- 2, especificações comuns para utilização em elementos estruturais de uma edificação. Com comparação de traços utilizados em obra urbana e agregando conceitos teóricos, foi definido um traço 1: 2,52: 2,16 (cimento: areia: brita), em massa, e relação água /cimento de 0,6.

Como o traço foi rodado de forma manual, a pesagem e o controle dos materiais foi inviabilizado por falta de equipamentos, sendo utilizado como forma de medida lata de 20 litros. Dito isto, a tabela 4 traz as informações utilizadas para realização do traço proposto pelos autores.

Tabela 2 - Quantitativo de traço

Item	Material	Quantidade	Unidade
1	Cimento	50	Kg
2	Areia	90	litros
3	Brita 0	72	litros
4	Água	21,6	litros

Autores, (2020).

A sequência executiva para a moldagem dos corpos de prova e prismas obedeceu a seguinte etapa:

Iniciou-se com a limpeza de todo equipamento (betoneira) e ferramental a ser utilizado, assim como das fôrmas dos corpos de prova e prismas e separação de todo material (cimento, areia, brita, água e fibras de aço);

O processo de mistura consistiu em três etapas: Primeiramente misturamos a brita e cerca de 60% da água para umedecimento e homogeneização por 3 minutos; a segunda etapa consistia em adicionar o agregado miúdo (areia) sobre o agregado graúdo umedecido

e misturava-se por mais 3 minutos; a última etapa consistia em adicionar o cimento e os 40% restantes de água ao conjunto, formando uma mistura com aparência desejada. O processo de fabricação se encerrava após a mistura interrompida por 10 minutos. Quando utilizamos as fibras de aço, as adições foram realizadas gradualmente e manualmente utilizando-se cinco minutos adicionais para cada porcentagem de fibra na mistura. A figura 38 abaixo mostra a etapa da mistura dos materiais na betoneira.

Figura 8 - Etapa de Mistura dos materiais na betoneira



Fonte: Autores, (2020).

Em seguida realizamos o ensaio do abatimento do cone (Slump test) para avaliar a consistência e trabalhabilidade do concreto e se o mesmo está adequado para o uso a que se destina. Seguindo a norma ABNT NBR NM 67:1998, o molde estava de acordo e tinha a forma de um tronco de cone oco, com as seguintes dimensões internas: Diâmetro da base inferior: 200 mm \pm 2 mm; diâmetro da base superior: 100 mm \pm 2 mm; altura: 300 mm \pm 2 mm. A haste de compactação foi de seção circular, reta, feita de aço, com diâmetro de 16 mm, comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas. A placa de base para apoio do molde foi metálica, plana, quadrada.

Umedecemos o molde e a placa de base e colocamos o molde sobre a placa de base. Durante o preenchimento o operador estava posicionando os pés sobre suas aletas, de forma a mantê-lo estável. Enchemos rapidamente o molde com o concreto coletado, em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado para que fiquem igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes. A figura 39 ilustra esse procedimento. O resultado do teste foi satisfatório com um Slump de 12cm, como mostra a figura 40.

Figura 9 - Procedimento do teste Slump



Fonte: Autores, (2020).

Figura 10 - Resultado do teste Slump



Fonte: Autores, (2020).

Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada de acordo com as recomendações da NBR-5738 – *Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. A temperatura ambiente para o lançamento do concreto estava 25°C de acordo com a NBR 7112/2012 que exige que esteja entre 5°C e 30°C.

Foi realizada a moldagem de 16 corpos de prova com dimensão 10x20 cm. O procedimento de moldagem seguiu a NBR 5738 – *Procedimento para coleta de corpo de prova (concreto) na obra*. Antes de proceder à moldagem, revestimos com uma fina camada de óleo mineral e apoiamos em uma superfície horizontal e sem vibrações que possam ocasionar mudança na propriedade do concreto durante a moldagem e o início da pega. O concreto foi colocado dentro do molde com uma concha, obedecendo a regra estabelecida: Corpo de prova com diâmetro de 100 mm, três camadas de concreto com 25 golpes cada. Os golpes foram distribuídos uniformemente na seção transversal do molde. A figura 41 abaixo ilustra a moldagem dos corpos de prova.

Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autores, (2020).

Moldagem dos prismas

Foram moldados 5 prismas, como descritos a seguir, denominados P1, P2, P3, P4, P5 com dimensões descritas na tabela 4 e com duas porcentagens diferentes de fibras de aço em relação a quantidade de cimento utilizado.

Tabela 3 - Dimensões dos prismas ensaiados

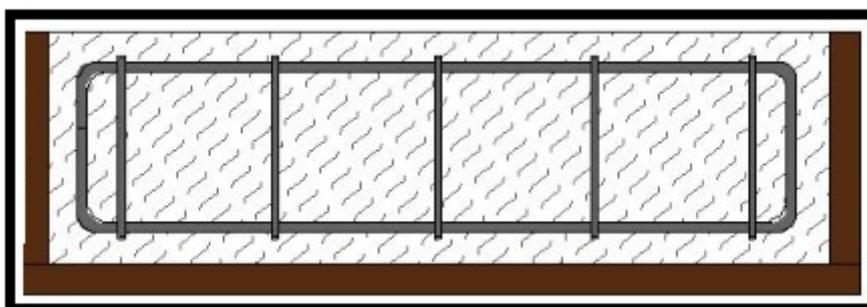
DIMENSÕES	
Base (bw)	15 cm
Altura (H)	15 cm
Comprimento (l)	50 cm

Fonte: Autores, (2020).

Abaixo segue as especificações de cada prisma com a respectiva quantidade de fibra incorporada e distribuição das armaduras.

P1 – Prisma de referência, onde não apresentou nenhuma incorporação de fibras de aço, somente armaduras transversal e longitudinal, como ilustra a figura 42 abaixo.

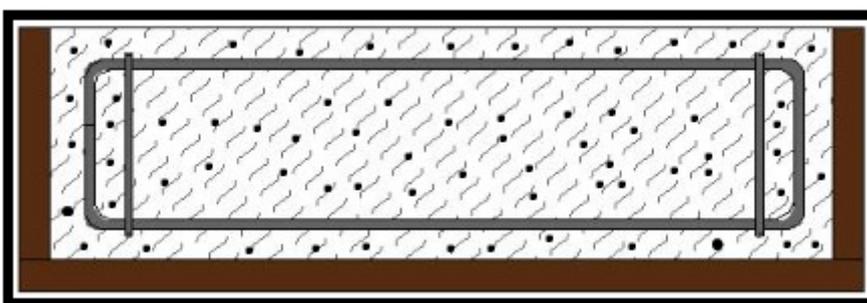
Figura 12 - Prisma P1



Fonte: Autores, (2020).

P2 – Prisma com incorporação de 7% de fibras de aço, contendo apenas armadura longitudinal, como ilustra a figura 43 abaixo.

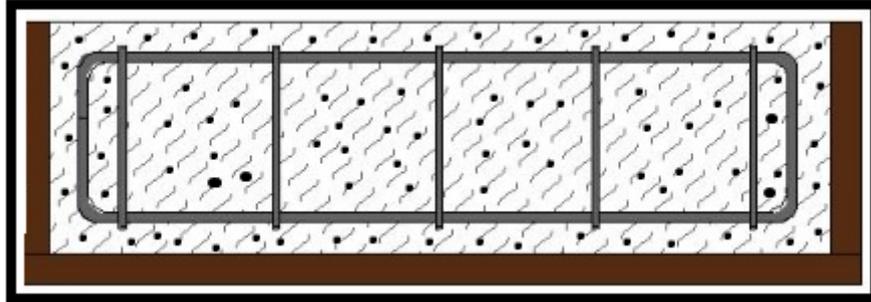
Figura 13 - Prisma P2



Fonte: Autores, (2020).

P3 – Prisma com incorporação de 7% de fibras de aço, contendo armadura transversal e longitudinal, como ilustra a figura 44 abaixo.

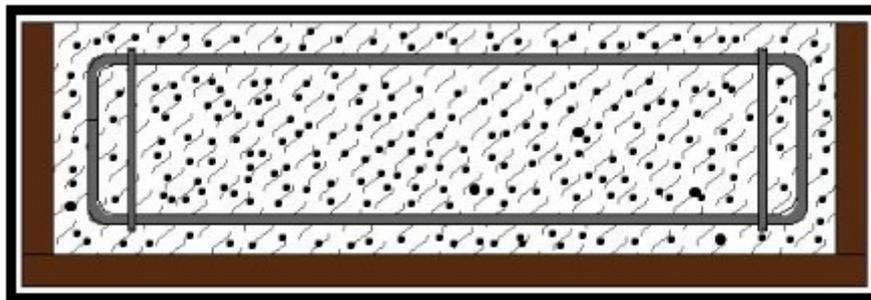
Figura 14 - Prisma P3



Fonte: Autores, (2020).

P4 – Prisma com incorporação de 14% de fibras de aço, contendo apenas armadura longitudinal, como ilustra a figura 45 abaixo.

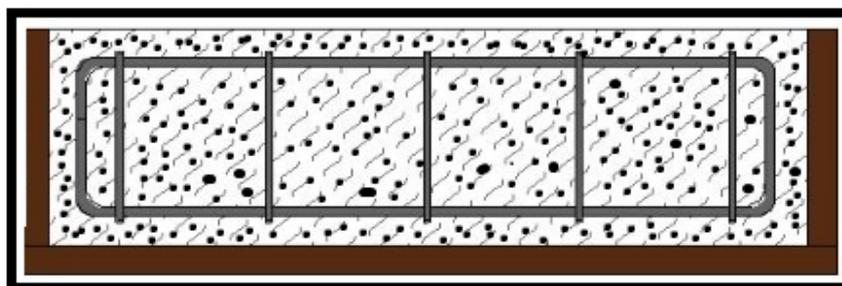
Figura 15 - Prisma P4



Fonte: Autores, (2020).

P5 – Prisma com incorporação de 14% de fibras de aço, contendo armadura transversal e longitudinal, como ilustra a figura 46 abaixo.

Figura 16 - Prisma P5



Fonte: Autores, (2020).

Para a moldagem de forma geral, foi adicionado uma camada de 2 centímetros de concreto (com respectivas variações no quantitativo de fibra) no fundo da forma de madeira e posicionada a armadura de forma centralizada, afim de garantir o cobrimento proposto em todas as faces do prisma, conforme ilustra a figura 47 abaixo. Em seguida foi sendo adicionado camadas finas de concreto e conferindo o espalhamento uniforme visando um bom adensamento da argamassa com o objetivo de evitar falhas e espaços vazios.

Figura 17 - Posicionamento da armadura



Fonte: Autores, (2020).

Finalizada a moldagem, todos os prismas foram armazenados em local protegidos de intempéries (vide figura 48), sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto até completar a idade de 28 dias para rompimento no laboratório.

Figura 18 - Armazenamento dos prismas moldados



Fonte: Autores, (2020).

Ensaio

Foram realizados ensaios de compressão para os corpos de prova cilíndricos e de flexão a quatro pontos para os prismas. Ambos os ensaios foram realizados no laboratório

MEG TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO LTDA, inscrito no nº 10.327.010/0001-90 – MATRIZ, localizado na cidade de Petrópolis - RJ.

O ensaio de compressão foi realizado para indicar eventuais variações da qualidade do um concreto, seja com relação à dosagem, seja quanto a seus insumos, afim de garantir segurança quanto a resistência. Foi aplicada uma força uniaxial de carga compressiva em um corpo de prova até a ruptura. A máquina utilizada foi EMIC modelo PCE-100-D conforme figura 49 abaixo.

Figura 19 - Máquina do ensaio de compressão



Fonte: Autores, (2020).

O ensaio de flexão a quatro pontos foi realizado para verificação da resistência de cisalhamento. A máquina utilizada para o ensaio foi a prensa para ensaio de força Zelozo, conforme figura 50 abaixo.

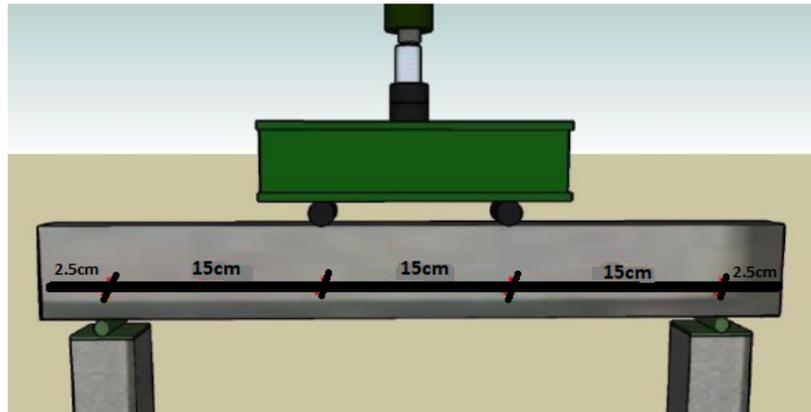
Figura 20 - Prensa modelo Zelozo



Fonte: Autores, (2020).

O esquema para realização do ensaio está esquematizado na figura 51 e apresentado na figura 52.

Figura 21 - Esquema de ensaio dos prismas



Fonte: Carnaval, (2016).

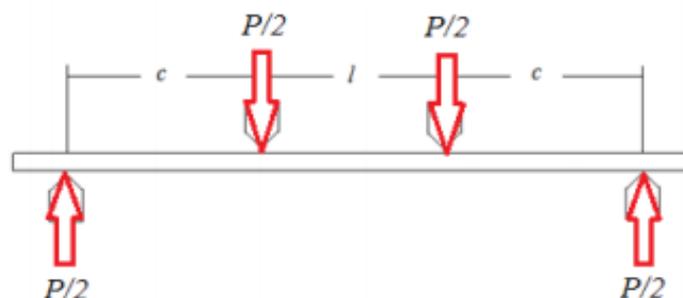
Figura 22 - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autores, (2020).

Nesse tipo de ensaio o momento entre os apoios internos permanece constante. Com isso, no espaço entre os apoios internos, apenas tensões trativas e compressivas atuam ao longo da seção transversal. A figura 53 abaixo mostra as forças que atuam nesse tipo de ensaio.

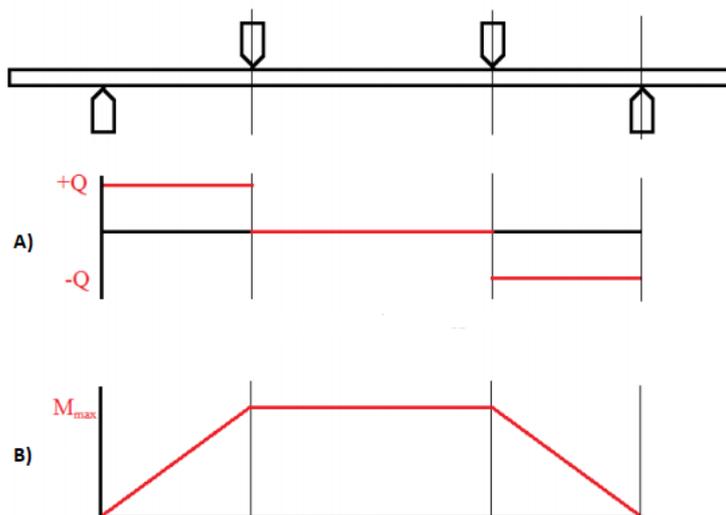
Figura 23 - Flexão a quatro pontos



Fonte: Autores, (2020)

A figura 53 (A e B) ilustram os gráficos de esforços cortantes e momento fletor, respectivamente, ao longo do corpo de prova.

Figura 24 - Diagramas de esforços cortantes e momentos fletores



Fonte: Autores, (2020).

O momento máximo é dado por:

$$M = \frac{P}{2} \cdot c$$

Onde:

P = Carga aplicada pela máquina

c = Distância entre o apoio externo e o apoio interno

RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados de resistência à compressão e flexão aos quatro pontos foram obtidos após o rompimento dos corpos de prova em 7, 14, 21 e 28 dias. Para os prismas, obedecemos a norma que estabelece o tempo de cura de 28 dias.

Resistência a compressão

Os resultados obtidos nesse ensaio consistem na relação entre a deformação linear, obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo de prova, em função da carga de compressão aplicada em cada instante.

Apresentou resultado satisfatório com o esperado, testando assim o material até altos valores de deformação. A tabela 5 abaixo ilustra a resistência obtida de todos os exemplares durante o processo e cura.

Tabela 4 - Resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto

Resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto NBR – 5739		
Dados	Peça	Resistência 07 dias - 31/10/20
Data da moldagem - 24/10/20	1	15.3 Mpa

Fck = 20 Mpa	2	15.3 Mpa
Slump = 12	3	15.2 Mpa
Altura do CP (mm) = >195 <200	4	15.5 Mpa
Fator de correção = 1		
Classe do equipamento = Classe 1	Peça	Resistência 14 dias - 07/11/20
Capecamento = Fases retificadas	5	17.2 Mpa
Adensamento = Mecânico	6	16.3 Mpa
	7	17.4 Mpa
	8	16.6 Mpa
	Peça	Resistência 21 dias - 14/11/20
	9	18.1 Mpa
	10	18.3 Mpa
	11	18.3 Mpa
	12	17.9 Mpa
	Peça	Resistência 28 dias - 21/11/20
	13	19.4 Mpa
	14	18.8 Mpa
	15	19.3 Mpa
	16	19.5 Mpa

Fonte: Autores, (2020).

A partir da tabela acima, foram retirados os dados estatísticos, referente a média das resistências, máximo e mínimo encontrados, desvio padrão e intervalo de confiança conforme apresenta a tabela 6 abaixo.

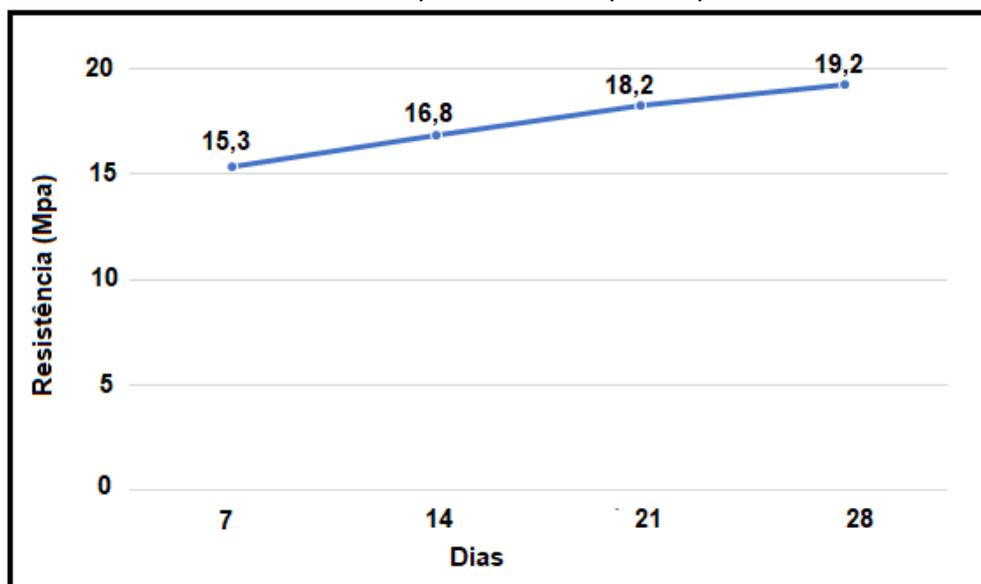
Tabela 5 - Dados estatísticos do ensaio a compressão dos corpos de prova.

Dados estatísticos				
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Nº de resultados	4	4	4	4
X (MÉDIA Mpa)	15.3	16.8	18.2	19.2
Desvio Padrão	0,126	0,483	0,193	0.322
Máx. encontrado (Mpa)	15.5	17.4	18.3	19.5
Mín. encontrado (Mpa)	15.2	16.3	17.9	18.8
Intervalo de confiança	0,124	0,474	0,189	0.316

Fonte: Autores, (2020).

A partir da análise, o gráfico 1 abaixo mostra a curva de compressão dos corpos cilíndricos considerando a média dos resultados após o rompimento.

Gráfico 1 – Curva de compressão dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autores, (2020).

Flexão a quatro pontos

A partir da ruptura de cada prisma, foram verificados a carga de primeira fissura e a carga máxima assim como o modo de falha, conforme são descritos nos itens abaixo.

Carga de primeira fissura e a carga máxima

Aqui foi analisado a carga de primeira fissura e carga última dos prismas. Salientamos que este procedimento foi realizado de forma visual, logo não tivemos possibilidade de analisar a deformação e deslocamento. Sendo assim, impossibilitando a interpretação de outros resultados e exposições de gráficos.

O prisma de referência (P1) quando submetida ao ensaio apresentou a primeira fissura (Vide figura 55) quando era aplicado 23,53kN e a partir daí foram surgindo múltiplas fissuras (figura 56) até sua carga última que foi de 47,07kN.

Figura 25 - Primeira fissura (P1)



Fonte: Autores, (2020).

Figura 26 - Múltiplas fissuras (P1)



Fonte: Autores, (2020).

O prisma P2, quando submetida ao ensaio apresentou a primeira fissura (Vide figura 57) quando era aplicado 26,48 kN e a partir daí foram surgindo múltiplas fissuras (figura 58) até sua carga última que foi de 53,94 kN.

Figura 27 - Primeira fissura (P2)



Fonte: Autores, (2020).

Figura 28 - Múltiplas fissuras (P2)



Fonte: Autores, (2020).

O prisma P3, quando submetida ao ensaio apresentou a primeira fissura (Vide figura 59) quando era aplicado 27,46 kN e a partir daí foram surgindo múltiplas fissuras (figura 60) até sua carga última que foi de 55,90 kN.

Figura 29 - Primeira fissura (P3)



Fonte: Autores, (2020).

Figura 30 - Múltiplas fissuras (P3)



Fonte: Autores, (2020).

O prisma P4, quando submetida ao ensaio apresentou a primeira fissura (Vide figura 61) quando era aplicado 50,99 kN e a partir daí foram surgindo múltiplas fissuras (figura 62) até sua carga última que foi de 64,73 kN.

Figura 31 - Primeira fissura (P4)



Fonte: Autores, (2020).

Figura 32 - Múltiplas fissuras (P4)



Fonte: Autores, (2020).

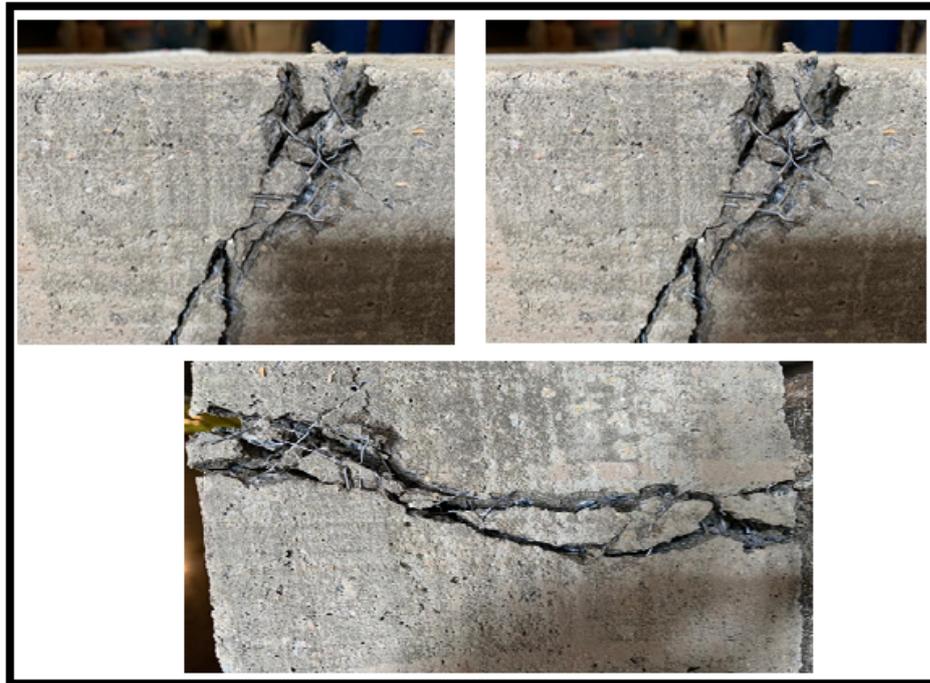
O prisma P5, quando submetida ao ensaio apresentou a primeira fissura (Vide figura 63) quando era aplicado 55,90 kN e a partir daí foram surgindo múltiplas fissuras (figura 64) até sua carga última que foi de 74,53 kN.

Figura 33 - Primeira fissura (P5)



Fonte: Autores, (2020).

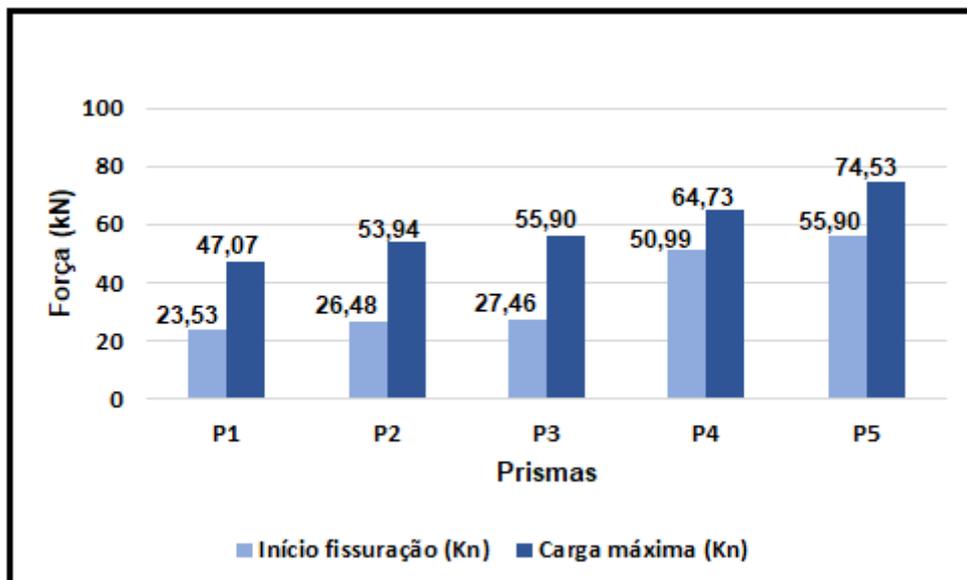
Figura 34 - Múltiplas fissuras (P5)



Fonte: Autores, (2020).

O gráfico 2 abaixo simplifica o resultado da carga de primeira fissura e a carga máxima do experimento realizado.

Gráfico 2 – Carga de primeira fissura e carga máxima



Fonte: Autores, (2020).

Analisando a influência das fibras de aço, foi possível perceber que a incorporação de 7% das fibras nos prismas P2 e P3, trouxe um aumento de 12,54% e 16,7%, respectivamente, para o início da fissuração quando comparado ao P1. Com relação a carga máxima tivemos um aumento de 14,6% para P2 e 18,76% para P3. Sendo assim, foi verificado que a adição de 7% de fibras de aço não resultou em uma melhora tão significativa para o aumento de cargas analisadas e não trouxe diferença considerável na utilização de armadura transversal, apesar da utilização das fibras de aço terem prolongado

o estágio 1 do concreto (regime não fissurado), uma vez que as fibras serviram como ponte de transferência de tensões.

Com o aumento do volume de fibras para 14%, pode ser notado que resistência a primeira fissura, tenacidade e ductilidade foram melhoradas e claramente aumentadas tendo como os seguintes resultados: 116,7% e 137,57% de aumento na resistência a primeira fissura para o prisma P4 (sem armadura transversal) e P5 (com armadura transversal), respectivamente. Enquanto a carga máxima chegou a 37,52% para o prisma P4 e 58,34% para o prisma P5.

Pela análise dos resultados informados acima, conclui-se que a adição de fibras de aço promoveu um melhor controle de fissuração restringindo a propagação de fissuras e permitindo uma fissuração uniforme além do retardamento do seu aparecimento, uma vez que ocorreram múltiplas fissuras diagonais, as quais se propagaram lentamente a cada incremento da força aplicada.

Ainda nesse contexto, foi possível concluir que as resistências analisadas tiveram um aumento conforme a adição na quantidade de fibras, isto é o volume de fibras teve uma forte influência para os resultados finais.

Modo de falha

Numa viga de concreto armado, vários tipos de ruptura podem ser observados. Sua caracterização se dará pelo tipo de tensão cisalhante que caminha ao longo da peça e como ela se distribui. Este tipo de comportamento é descrito no tópico 3.5 deste trabalho com maior detalhamento.

Neste capítulo será comparado os tipos de ruptura observado após o ensaio de flexão a quatro pontos conforme apresentado nas figuras abaixo, onde é a apresentado a face lateral dos prismáticos.

O tipo de falha encontrado nos prismas P1 e P2 pode ser descrito como ruptura por força cortante-tração, conforme figuras 65 e 66 onde é sugerido a analogia com a treliça. Quando ultrapassa o limite de escoamento da armadura transversal surge o aparecimento de fissuras inclinadas.

Figura 35 - Caracterização da fissuração do prisma P1



Fonte: Autores, (2020).

Figura 36 - Caracterização da fissuração do prisma P2



Fonte: Autores, (2020).

O prisma P3 (figura 67) foi caracterizado pelas deficiências encontradas na armadura. Quando o prisma sofreu carregamento e foi submetido a uma flexão, o alongamento da armadura longitudinal na zona inferior (tracionada) provocou o aumento excessivo da armadura transversal, por estarem agarradas entre si, sendo encontrado a ruptura por flexão da armadura longitudinal.

Figura 37 - Caracterização da fissuração do prisma P3



Fonte: Autores, (2020).

O alongamento excessivo da armadura transversal apresenta fissuras inclinadas direcionadas a zona comprimida. Ocorre somente em carregamentos elevados e concentrados e acontece por esmagamento do concreto na região superior (zona de compressão) sendo caracterizado ruptura por força cortante flexão os prismas P4 e P5 (Figura 68 e 69).

Figura 38 - Caracterização da fissuração do prisma P4



Fonte: Autores, (2020).

Figura 39 - Caracterização da fissuração do prisma P5



Fonte: Autores, (2020).

Avaliação de custos

Após todos os procedimentos do ensaios e análise, foi elaborado uma avaliação para ser calculado o custo unitário dos prismas com a utilização da fibra de aço, visto que o traço

foi elaborado de forma manual e sem a utilização de pesagens dos insumos utilizados, onde o método de medida foi através de latas de 20 litros, porém sendo respeitando o quantitativo para o traço criado. Para isso, foi comparado o prismas P1 e P5. A escolha se deu por ser utilizado o mesmo quantitativo de barras de aço e concreto, com a diferença na utilização das fibras, outro motivo foi pelos resultados, onde ambas se encontram nas posições de resistência mínima e máxima da análise do experimento deste trabalho. Na tabela 7, é demonstrado o valor de cada insumo utilizado para a moldagem do prisma.

Tabela 6 - Valor unitário dos insumos

Item	Material	Quantidade	Unidade	Valor
1	Cimento	50	kg	R\$ 25,70
2	Areia	1	m ³	R\$ 95,00
3	Brita 0	1	m ³	R\$ 140,00
4	CA-50 Ø 1/4"	12	m	R\$ 23,00
5	CA-60 Ø 3/16"	12	m	R\$ 13,80
6	Fibra	20	kg	R\$ 241,60

Fonte: Autores, (2020).

Realizando o cálculo de proporcionalidade e através das especificações de projeto foi previsto a quantidade demonstrada na tabela 8 e 9 para cada prisma.

Tabela 7 - Quantitativo P1

P1				
Item	Material	Quantidade	Unidade	Valor
1	Cimento	5	kg	R\$ 2,57
2	Areia	0,5	lata	R\$ 0,95
3	Brita 0	0,4	lata	R\$ 1,12
4	CA-50 Ø 1/4"	2,44	m	R\$ 4,68
5	CA-60 Ø 3/16"	2,7	m	R\$ 3,11
6	Fibra	0	kg	R\$ -
				Total: R\$ 12,42

Fonte: Autores, (2020).

Tabela 8 - Quantitativo P5

P5				
Item	Material	Quantidade	Unidade	Valor
1	Cimento	5	kg	R\$ 2,57
2	Areia	0,5	lata	R\$ 0,95
3	Brita 0	0,4	lata	R\$ 1,12
4	CA-50 Ø 1/4"	2,44	m	R\$ 4,68
5	CA-60 Ø 3/16"	2,7	m	R\$ 3,11
6	Fibra	0,7	kg	R\$ 8,46
				Total: R\$ 20,88

Fonte: Autores, (2020).

Verificando o custo final de cada prisma, é observado que a diferença no valor para a moldagem é de R\$ 8,46, ou seja, o valor respectivo para a quantidade de fibra utilizada pelo prisma P5. Com o valor informado houve acréscimo de 32,37 kN para o aparecimento da primeira fissura e 27,46 kN para a carga máxima resistida, em porcentagem 42,1% e 63,2%, respectivamente. É importante ressaltar que o custo da mão de obra para aplicação das fibras na execução do traço pode ser desprezível, pois não requer mão de obra especializada, visto que a mesma deve ser apenas pesada conforme projeto e lançada na mistura no momento em que há homogeneização do concreto.

CONCLUSÃO

Diferente de outros campos, de forma geral, a construção civil ainda é muito resistente ao que é novo, o que explica o fato de uma tecnologia como o CRFA, a qual traz enormes vantagens ao setor ainda estar pouco difundida, sendo seu uso muitas vezes restrito. Mesmo assim, o emprego do concreto reforçado com fibras, uma tecnologia relativamente nova, vem crescendo ao longo das últimas décadas.

Vigas de concreto reforçadas com fibras de aço tem uma alta resistência após fissuração, a qual é uma característica desejável no dimensionamento, pois a condições de segurança do elemento estrutural é satisfatória quando são verificados no Estado Limite Último.

Essa tecnologia veio para suprir as deficiências do concreto convencional podendo ser facilmente deformadas melhorando sua capacidade de aderência, o que contribui para o aumento da tenacidade do compósito, uma vez que as fibras de aço servem como ponte de transferência entre as fissuras aumentando a resistência e tenacidade reduzindo a possibilidade de ruptura súbita. Sendo corretamente preparada e aplicada trará enormes benefícios ao setor, visto que não apresentam muita distinção nas etapas de preparação do concreto convencional, exigindo apenas uma atenção especial na dosagem, lançamento e vibração.

Diante da avaliação da eficácia das fibras de aço no desempenho mecânico ao cisalhamento de vigas em concreto, o estudo apresentado sob uma perspectiva teórica e experimental, além de uma revisão bibliográfica, nos mostrou que os mecanismos responsáveis pela transferência da força cortante são variados, complexos e difíceis de medir e identificar. Isso ocorre pois, após o surgimento das fissuras inclinadas, ocorre uma

complexa redistribuição de tensões, a qual é influenciada por vários fatores, como foi apresentado os cinco mecanismos mais importantes.

No que diz respeito ao cisalhamento em vigas de concreto armado, as fibras de aço apresentam uma grande vantagem sobre os outros tipos de fibras por sua alta resistência à tração e grande capacidade de aderência a matriz que a envolve.

De acordo com os numerosos estudos avaliados, percebeu-se um aumento na resistência ao esforço cortante quando são adicionadas fibras ao concreto de vigas de resistência normal e o uso de fibras de aço com gancho nas extremidades no traço do concreto, com teor de fibras maior ou igual a 0,75%, aumenta a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal.

Ainda nesse contexto, analisando vigas de concreto armado, foi possível perceber que teve aumento na resistência ao cisalhamento apresentando uma apreciável ductibilidade. Enquanto as vigas de concreto armado sem armadura transversal no vão testado apresentaram uma fissura diagonal única seguida por uma ruptura frágil, as vigas com fibras de aço apresentaram pelo menos duas fissuras e o alargamento de pelo menos uma delas antes da ruptura, proporcionando algum aviso sobre a ruptura eminente.

Pela análise experimental, conclui-se que a adição de fibras de aço promoveu um melhor controle de fissuração restringindo a propagação de fissuras e permitindo uma fissuração uniforme além do retardamento do seu aparecimento, uma vez que ocorreram múltiplas fissuras diagonais, as quais se propagaram lentamente a cada incremento da força aplicada. Ainda nesse contexto, foi possível concluir que as resistências analisadas tiveram um aumento conforme a adição na quantidade de fibras, isto é o volume de fibras teve uma forte influência para os resultados finais.

No âmbito da aplicação, foi possível verificar que as aplicações do CRFA são muito concentradas. O mercado de fibras de aço tem como principal aplicação os pavimentos industriais, onde em seguida vem o concreto projetado e os pré-moldados.

TRABALHOS FUTUROS

Em termos de trabalho futuro, existem muitas linhas de desenvolvimento e outras perspectivas que podem ser exploradas. Aconselha-se então:

- Experimento com variação na geometria;
- Análise da deformação e deslocamento;
- Aumento e diminuição do quantitativo de fibras;
- Análise de uma viga propriamente dita;

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15530 (2007). Fibras de aço para concreto – Especificações. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 08890 (2007). Tubo de concreto armado de seção circular para esgoto sanitário – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 67 (1996). Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ARAUJO, A (2002). Reforço ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado com fibra de carbono com dois tipos de ancoragem. 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R. (1996) Report on fiber reinforced concrete.

BANTHIA N., ARMELIN H.(2001 BARROS, ALEXANDRE RODRIGUES DE. Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço / Alexandre Rodrigues de Barros, 2009.

BARROS, F. C. G. M. B. (2015). Análise do Momento Resistente de Vigas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 132 pg.

BELLO, H.J. (2014). Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams. Tese de mestrado, Atilim University, Turquia, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2ª. ed. London: Taylor & Francis, 2007. 601 p.

BORGES, J. U. A. (2002) Análise do comportamento de vigas de concreto de alto desempenho por meio da mecânica da fratura. 2002. 311 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASANOVA, P., ROSSI, P. "Analysis and design of steel fiber reinforced concrete beams". ACI Structural Journal, V94, N5, September-October, 1997, p.595-602.

CELESTINO, T. B. Early-age shotcrete performance at excavation faces of underground works. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON URBAN PROBLEMS AND UNDERGROUND SOLUTIONS. Proceedings. São Paulo, Brasil, 1996.pp 77-88.

CHANH, N. V. Steel fiber reinforced concrete. In: Joint seminar on concrete engineering. Ho Chi Minh City University of Technology, 2005. p.108-116.

CHAVEZ ARAUZ, Alcibiades. "Resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçado com fibras de aço". 2002. 135 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP. 2002.

DI PRISCO, M., ROMERO, J.A. "Diagonal shear in thin-webbed reinforced concrete beams: fibre and stirrup roles at shear colapse". Magazine of Concrete Research, V48, N174, 1996, p.59-76.

DINH, H.H.; PARRA-MONTESINOS, J.; WIGHT, J.K. "Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement." ACI Structural Journal, V. 107, No 5. September, 2010.

EL-NIEMA, E.L. "Reinforced-concrete beams with steel fibers under shear". ACI Structural Journal, V88, N2, March-April, 1991, p.178-183.

Fenwick, R.C. & Paulay, T. 1968. Mechanisms of shear resistance of concrete beams. Proceedings of the ASCE (NST 10)94: 84–92.

FIGUEIREDO, A. D. (2000). Concreto com Fibras de Aço. Boletim Técnico – Série BT/PCC/260, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, Brasil.

FIGUEIREDO, A. D. (2005). Concreto com fibras. IBRACON. Concreto: ensino, pesquisa e realidade. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Cap. 39, p 1195- 1225.

FIGUEIREDO, A. D. “A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto”. ConcretoAnais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON., 2008.

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

FURLAN JR., S., HANAI, J.B. "Shear behavior of fiber reinforced concrete beams". Cement and Concrete Composites, V19, N4, 1997, p.359-366.

FUSCO, P.B. "Estruturas de Concreto: Solicitações Tangenciais". Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1984.

GUSTAFSSON, J., and K. NOGHABAI. 1997. Steel fibers as shear reinforcement in high strength concrete beams. International Journal of Nordic Concrete Research 22: 1- 18.

LIM, D.H., OH, B.H. "Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams". Engineering Structures, V21, N10, 1999, p.937-944.

LOBÃO, L. M. M.. Taxa de armadura longitudinal de tração mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LOPES, M. M. (2005) Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de PósGraduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

KWAK, Y. K. *et al.* Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups. **ACI Structural Journal**, Farmington Hills, 530-538. 2002

M. A. Mansur and K. C. G. Ong “Shear Strength of Ferrocement I-Beams”. Structural Journal, Vol. 88, 1991.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2014. 674p.

MINDESS, S. “Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials”. Toronto, Canada, 1995. Proceedings. P. 1-12.

MOBASHER, B.; YAO, Y.; SORANAKOM, C. "Analytical solutions for flexural design of hybrid steel fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*", p. 164-177, Junho 2015.

MORAES NETO, B.N. (2013). "Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico". Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, Brasília, 2013.

NARAYANAN, R.; DARWISH, I. Y. S. "Use of steel fibers as shear reinforcement". *ACI Structural Journal*, Detroit, p 216-226, maio - junho 1987.

NUNES, L (2006). " Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos, 2006.

OHTSU, M. "Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete". London: Woodhead Publishing, 2015. 291 p.

OLIVEIRA JUNIOR, L. A. **Ligação Viga-Pilar em Elementos Pré-Moldados de Concreto Solidarizados Por Concreto Reforçado Com Fibras de Aço**: análise estática e dinâmica. São Carlos, 2012. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PEREIRA, E. N. B.; BARROS, J. A. O.; CAMÕES, A. (2008) Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: experimental research and numerical simulation. *Journal of Materials in Engineering Civil*. Vol. 134, nº 8. p. 1310-1321.

RAMLI, M., DAWOOD, E. "Effect of Steel Fibers on the Engineering Performance of Concrete" 2011.

RCD Telles, AD Figueiredo (2006) Possibilidades de incorporação de novas tecnologias em anel de concreto pré-fabricado para túneis com tuneladora. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

ROSSI, C. "Aderência de armadura em concreto reforçado com fibra de aço", 2018.

SAHOO, D. R.; SHARMA, A. Effect of Steel Fiber Content on Behavior of Concrete Beams With and Without Stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 5, p. 1157-1167. 2014.

SINGH, B; JAIN, K. Apraisal of Steel Fibers as Minimum Shear Reinforcement in Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, Farmington Hills, v. 111, n. 5, p. 1191-1203. 2014

SHARMA, A.K. "Shear-strength of steel fiber reinforced-concrete beams". *Journal of the American Concrete Institute*, V83, N4, July-August, 1986, p.624

TAHENNI, T., CHEMROUK M., LECOMPTE T. "Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams". 2016.

XU, B. W.; SHI, H. S. "Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*", p. 3468- 3474, Agosto 2009.