

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE GRAMPOS METÁLICOS EM CONCRETO DE TRAÇO COM BAIXA RELAÇÃO ÁGUA-CIMENTO

Gabriel Pavini Cardoso¹
Gustavo Dias de Oliveira²
Fabio Braga da Fonseca³

RESUMO

A tecnologia do concreto vem evoluindo, através do desenvolvimento de aditivos e adições que possuem a capacidade de melhorar o desempenho das estruturas de concreto, bem como as fibras de aço, que quando adicionadas ao concreto, elevam sua ductilidade e tenacidade, controlando a fissuração. Esta pesquisa tem por objetivo a análise da influência da adição de grampos metálicos em concreto com baixa relação água-cimento, como variante de fibras de aço, observando principalmente a influência sobre sua trabalhabilidade e o aumento da tenacidade. Para tanto, foi adotado o mesmo traço-base de ARIF (2014) para preparação de corpos de prova, e inserido sobre este, grampos metálicos em diferentes concentrações (0,50%, 1,00% e 1,50% em volume), realizando-se ensaios de compressão e tração indireta. Foi constatado que a utilização dos grampos resultou num aumento na tenacidade do concreto, elevando a deformação média até a ruptura dos traços com a presença de grampos em aproximadamente 3 vezes quando comparada ao traço-base, porém, houve uma redução na sua trabalhabilidade e resistências. Concluiu-se que os grampos se mostraram eficazes como uma variante de fibras de aço e foi evidenciado a necessidade de se evitar a utilização de traços com reduzido consumo de água para adição dos grampos.

Palavras-chave: Concreto. Grampos Metálicos. Tenacidade. Trabalhabilidade.

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, concreto é o nome dado a qualquer produto ou massa obtido através da combinação macroscópica entre uma matriz aglomerante e agregados. Normalmente, essa matriz é obtida através de um cimento hidráulico em contato com

¹ Graduação em Engenharia Civil – Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro SP. E-mail: gabriel.pavini@outlook.com

² Graduação em Engenharia Civil – Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro SP. E-mail: gustavodias_bha@hotmail.com

³ Professor Mestre no Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro SP. E-mail: fabio.fonseca@prof.unifafibe.edu.br

a água, e os agregados são materiais que têm como principal finalidade elevar o módulo de elasticidade do concreto (NEVILLE, BROOKS, 2010; MEHTA, MONTEIRO, 2014).

A maior deficiência do concreto é a resistência à tração, que representa em torno de 10% a 15% da resistência à compressão, sendo este, motivo responsável pela fissuração do concreto. O que leva a abertura de vias de acesso para possíveis agentes agressivos, que, ao se tratar de elementos estruturais, pode levar à corrosão da armadura principal, diminuindo a vida útil da estrutura (MEHTA, MONTEIRO; 2014).

Devido a esta deficiência, o concreto necessita ser complementado antes da sua utilização como elemento estrutural, e este complemento se dá na forma de barras contínuas de aço, nomeadas de armaduras longitudinais, que, posicionadas nos locais apropriados, são capazes de auxiliar o concreto a resistir aos esforços de tração (BENTUR; MINDESS, 2007).

O autor aponta ainda que estas armaduras não são capazes de impedir o surgimento de fissuras localizadas, e diante disso, começou-se a estudar a inserção de fibras descontínuas e dispostas aleatoriamente na matriz cimentícia. Estas têm como principais objetivos o controle de fissuração do concreto e a melhoria em seu comportamento pós-fissuração, aumentando sua capacidade de absorção de energia e ductilidade. Além disso, sua utilização pode resultar em pequenos aumentos nas resistências à tração e compressão do concreto.

As fibras podem ser produzidas em diferentes formas e tamanhos, e no geral, são elementos que possuem a dimensão do seu comprimento muito maior quando comparada com a sua seção transversal, podendo ser produzidas de materiais naturais, artificiais ou sintéticos. Além de possuir uma grande variedade de comprimentos, algumas fibras, tais como as de aço, costumam ter em suas pontas uma dobradura em forma de gancho, com o intuito de aumentar sua ancoragem e aderência junto ao concreto (FIGUEIREDO, 2011; MEHTA, MONTEIRO; 2014).

De acordo com um estudo feito por Krenchel (1974) apud Mehta e Monteiro (2014), a incorporação de 0,9% a 2% de fibras de aço por volume de concreto aumentou a resistência à flexão em, aproximadamente, 15% e 30%, respectivamente, quando comparado com o traço sem fibras. Sobretudo, em ambos os casos, a deformação até o momento da ruptura foi de 9 a 10 vezes superior em comparação ao concreto convencional.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é analisar a influência da adição, em diferentes quantidades, de grampos metálicos em concreto com baixa relação água-cimento, como uma variante de fibras de aço, a fim de analisar sua influência sobre o concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção retrata sobre os conceitos e mecanismos que regem as propriedades obtidas através da adição de fibras de aço no concreto, tendo como principal finalidade o controle de fissuração, melhorando seu desempenho.

2.1 CONCRETO

O concreto é um compósito feito basicamente de material aglomerante, agregados e água. Esta última reage com o aglomerante, resultando em uma reação química denominada hidratação, que transforma a mistura em uma massa sólida com considerável resistência mecânica, sendo dependente da proporção dos componentes, como a relação água-cimento, onde maior quantidade de água resulta em menor resistência (GUPTA, 2014).

Pois, com o aumento da relação água/cimento na mistura, eleva-se a quantidade de vazios presentes na região da superfície do agregado graúdo ocasionado pela película de água acumulada ao redor do mesmo. Esta região com elevada porosidade, demonstrada na Figura 01, é denominada zona de transição e é o ponto fraco do conjunto, reduzindo a capacidade do concreto em resistir a esforços de tração e deixando-o suscetível à fissuração mesmo com baixos carregamentos, ou ainda, pela sua retração (KAEFER, 2002; MEHTA, MONTEIRO, 2014)

A tecnologia do concreto tem evoluído nas últimas décadas devido ao desenvolvimento de aditivos e adições de origem naturais ou sintéticas, que possuem a capacidade de melhorar seu desempenho. Algumas destas adições, como as fibras, proporcionam certa dificuldade com relação à trabalhabilidade por gerar maior atrito com os demais componentes do concreto, impedem sua fluidez, e aumentam a probabilidade de segregação (PEREIRA, 2017).

A trabalhabilidade do concreto é definida, principalmente, pela coesão e coexistência entre os materiais utilizados. Desta forma, alguns fatores, como dimensões dos agregados superiores ao máximo estipulado, razões entre os volumes

de agregado e cimento, além da sua forma e textura, podem interferir neste processo (LI, 2011).

Conforme explica Brant (2019), a existência de fissuras em estruturas de concreto armado é inevitável, podendo ser geradas mesmo sem a influência de carregamentos externos, através da retração plástica térmica ou por reações químicas internas do elemento. Porém devem ser controladas pela correta definição do traço e o acompanhamento do processo de cura do concreto. Desta forma, mesmo em situações de serviço há o surgimento de aberturas que podem comprometer a proteção das armaduras, permitindo a entrada de agentes corrosivos, bem como a percepção sensorial dos usuários. Portanto, deve-se possuir um controle de fissuração a fim de garantir a vida útil da estrutura, além de proporcionar maior segurança e conforto para os ocupantes.

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

De acordo com Figueiredo (2007) a utilização de concreto reforçado com fibras de aço ocorre, principalmente, em concreto projetado e pavimentos. De modo geral, seu uso é considerado adequado em elementos de pequena espessura, porém, um estudo feito por Lopes (2005) mostrou que a substituição de parte da armadura de flexão de elementos estruturais pelo reforço de fibras de aço é possível em concretos convencionais. Já Haitang et al. (2018) concluíram que a influência da adição de fibras de aço em concretos de alta resistência não tem valor significativo no aumento de sua capacidade resistente, porém teve contribuição considerável no aumento do controle da deformação e abertura de fissuras.

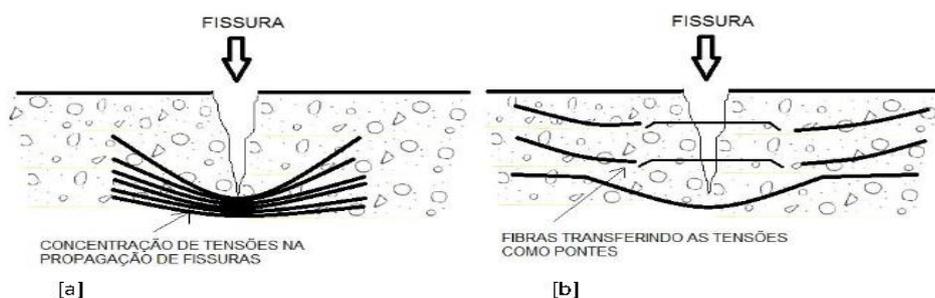
Sobretudo, para Garcez (2005) a principal função da adição de fibras no concreto é o controle de fissuração do mesmo, alterando o comportamento do compósito após o surgimento da primeira fissura, uma vez que, segundo a lei da evolução do dano, fundamentada inicialmente por Griffith em 1921, a propagação da fissura se dá quando a energia disponível para a fissuração alcança o valor essencial para a extensão da fissura. Para tanto, é necessário que haja uma diminuição da energia total da estrutura, tendo em vista a dispersão energética para o incremento e a formação de novas fissuras no concreto (BRANT, 2019).

Chen, Mindess e Morgan (1994) explicam ainda que as fissuras tendem a se propagar na direção da máxima tensão principal ocasionando um estado degenerativo estrutural, desenvolvido pela união de fissuras geradas no elemento em seu processo

de cura com as desenvolvidas devido ao carregamento solicitado, levando a uma redução abrupta da capacidade de resistência.

De acordo com Nunes e Agopyan (1998), o surgimento de fissuras ocasiona o impedimento da capacidade de transferência de tensões ao longo do comprimento do elemento estrutural, fazendo com que as tensões se concentrem na extremidade das fissuras (Figura 1 [a]). Ao se inserir o reforço de fibras no concreto, elas atuam como uma ponte de transferência de tensões permitindo que estas continuem se propagando de maneira uniforme no elemento (Figura 1 [b]). Frente a isto, a eficácia do CRFA é totalmente dependente da boa aderência entre a fibra e a matriz cimentícia (RUANO, et al., 2014).

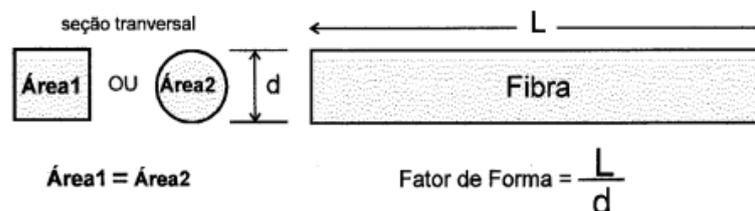
FIGURA 1 - Transferência de tensões através das fibras



Fonte: NUNES; AGOPYAN (1998)

Outro fator de grande importância para a eficácia do CRFA é a geometria da fibra a ser utilizada. A norma ABNT NBR 15530:2019 classifica as fibras de aço por meio de sua seção longitudinal, podendo ser retas, deformadas com corrugações ou deformadas com ancoragem em suas extremidades. Além disso, também define um parâmetro de análise chamado “fator de forma”, que é a proporção entre o diâmetro equivalente da fibra e o seu comprimento, sendo representado pela Figura 2 (NUNES; AGOPYAN, 1998).

FIGURA 2 - Conceituação do fator de forma da fibra



Fonte: NUNES; AGOPYAN (1998)

Nunes e Agopyan (1998) realizaram ensaios com o CRFA utilizando concentrações de fibras de 20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³ de comprimentos equivalentes, porém com diferentes fatores de forma. Foi concluído que aquelas com maior fator de forma apresentaram um aumento considerável na tenacidade do CRFA quando submetido à flexão, devido a uma maior quantidade de fibras presente na matriz por unidade de volume. Todavia, foi ressaltado que a influência do fator de forma é menos relevante que o teor de fibras utilizado na mistura.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como finalidade verificar, através de ensaios experimentais, o comportamento do CRFA utilizando o mesmo traço-base que o utilizado por Arif (2014), com a inserção de grampos metálicos como uma variante de fibras de aço. A escolha do traço para esta pesquisa se deu a fim de comparar a influência da inserção de fibras em um concreto com pouca trabalhabilidade antes mesmo da utilização destas, as quais tendem a interferir diretamente nesta característica

O método adotado consiste na preparação de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, como é orientado pela norma ABNT NBR 5738:2015. Os corpos de prova são ensaiados utilizando o mesmo traço de referência, porém, com e sem a adição de fibras, a fim de comparar a influência sobre as propriedades mecânicas do CRFA.

3.1 DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto produzido para o estudo será composto por:

- Cimento CP II-F;
- Agregado miúdo: areia média;
- Agregado graúdo: brita 1.

Conforme Tabela 1, o traço a ser utilizado é 1 : 2 : 3 : 0,4 e serão acrescentados grampos metálicos nas proporções de 0,5%, 1,0% e 1,5% sobre o volume total de concreto, representando uma concentração de 32 kg/m³, 63 kg/m³ e 94 kg/m³, respectivamente, apresentando valores superiores aos utilizados por Nunes e Agopyan (1998).

TABELA 1 - Traços a serem ensaiados

Proporções	Material	Traços			
		T I	T II	T III	T IV
Proporção em massa	Cimento	1	1	1	1
	Areia	2	2	2	2
	Brita	3	3	3	3
	Água	0,4	0,4	0,4	0,4
Proporção em volume	Grampo	-	0,50%	1,00%	1,50%
Concentração		0	32 kg/m ³	63 kg/m ³	94 kg/m ³

Fonte: Próprio autor

Os grampos a serem utilizados nas misturas são da marca *Jocar Office*, do tipo 26/6 galvanizado, de diâmetro igual a 0,476 mm, que resultaram no fator de forma 26,68, conforme dimensões do grampo de papel ilustrada na Figura 3.

FIGURA 3 – Grampo *Jocar Office* tipo 26/6



Fonte: Próprio autor

3.2 PREPARAÇÃO DO CONCRETO E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Para a preparação do concreto de cada traço, serão colocadas primeiramente as quantidades totais de agregado graúdo e de água na betoneira por um tempo de mistura mecânica de 1 minuto. Em seguida, adiciona-se o cimento, que é misturado por mais 1 minuto, e por fim coloca-se o agregado miúdo para um tempo de mistura de todos os materiais em torno de 5 minutos (ARIF, 2014).

Então adiciona-se, para cada traço, a quantidade respectiva de grampos metálicos e após tempo de mistura de aproximadamente 5 minutos avalia-se a

consistência do concreto, retirando uma parte da mistura para realização do ensaio de abatimento de tronco de cone segundo a ABNT NBR 16889/2020.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos adotados para caracterizar o concreto no estado endurecido foram através dos ensaios de módulo de elasticidade (E_{ci}), resistência à compressão (f_c) e resistência à tração por compressão diametral (f_{ct}), definidos pelas normas ABNT NBR 8522-1:2021, 5739:2018 e 7222:2011, respectivamente, bem como ensaio de módulo de tenacidade, baseado na pesquisa de Serighelli, Turra e José (2016). Em todos os casos a idade dos corpos de prova ensaiados deve ser de 28 dias.

3.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A norma técnica brasileira que prescreve os procedimentos para o ensaio de compressão do concreto é a ABNT NBR 5739:2018. A tensão à compressão é determinada dividindo-se a carga máxima obtida pela área da seção transversal do corpo de prova, conforme a Equação 1.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Em que:

f_c = Resistência à compressão (MPa);

F = Força de compressão (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

A determinação da resistência à compressão (f_c) para cada um dos traços estudados compreenderá na moldagem de 6 corpos de prova para cada concentração de fibra, resultando em 24 corpos de prova para este ensaio. Com isso, serão realizados os cálculos para determinação do f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto), conforme a Equação 2, definida com controle estatístico por amostragem parcial, utilizada para número de amostras entre 6 e 20 (NBR 12655:2015).

$$f_{ck, est} = 2 \times \frac{(f_1 + f_2 + \dots + f_{(m-1)})}{m-1} - f_m \quad (2)$$

Em que:

$f_{ck,est}$ = resistência característica à compressão do concreto (MPa);

f_1, f_2, \dots, f_m = valores das resistências dos corpos de prova, em ordem crescente (MPa);

$m = n/2$ (se ímpar, adotar o menor valor);

n = número de corpos de prova ensaiados (no mínimo 6).

3.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral serão utilizados os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7222/2011. O corpo de prova cilíndrico deve ser colocado de forma que fique em repouso ao longo da sua geratriz sobre o prato da máquina de compressão. Entre os pratos da máquina de ensaio e o corpo de prova é necessário colocar duas tiras de chapa de madeira com base equivalente a pelo menos 15% do diâmetro do corpo de prova e espessura mínima de 3,5 mm.

A determinação da resistência por compressão diametral compreenderá na moldagem de 6 corpos de prova para cada traço estudado, resultando em 24 corpos de prova para este ensaio. A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela Equação 3 e para determinação do f_{tk} será utilizado o mesmo método do f_{ck} .

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (3)$$

Em que:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração (MPa);

F = força de ruptura (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = comprimento do corpo de prova (mm).

3.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE E TENACIDADE

A determinação do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) pode ser realizada por meio de coeficiente angular formado pelo intervalo de tensões em razão do intervalo de deformações específicas médias. Para tanto, a fim de caracterizar este ensaio, será adotada a tensão (σ_b) correspondente a 30% da tensão de ruptura (σ_f) obtida nos ensaios de compressão, segundo a ABNT NBR 8522-1:2021.

A deformação será mensurada através da instalação de um relógio comparador no corpo de prova durante seu rompimento, e então, será acompanhado a variação da deformação conforme a intensidade da força aplicada aumenta.

O módulo de tenacidade, que é definido como a área abaixo da curva tensão-deformação, obtido pelos ensaios de compressão e módulo de elasticidade, será calculado baseando-se no método desenvolvido por Serighelli, Turra e José (2016) descrito pela Equação 4.

$$U_t = \frac{(\sigma_e + \sigma_m) \times \varepsilon}{2} \quad (4)$$

Em que:

U_t = área abaixo da curva (módulo de tenacidade em MPa);

σ_e = tensão de escoamento, sendo adotada como a tensão correspondente ao início da deformação plástica (MPa);

σ_m = tensão de ruptura (MPa);

ε = deformação específica do corpo de prova (ruptura).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste item são oriundos dos ensaios realizados a partir da metodologia supracitada. Tais dados expõem os resultados das verificações de resistências à compressão axial e à tração indireta por compressão diametral, bem como a verificação da variação da consistência e trabalhabilidade do concreto com a adição de fibras metálicas.

4.1 CONSISTÊNCIA E TRABALHABILIDADE

Ao realizar a concretagem dos corpos de prova utilizando o T I e realizando o ensaio de abatimento do tronco de cone, obteve-se valor de *slump* igual a 5 mm (Figura 4 [a]), porém para os traços T II, T III e T IV, os *slumps* foram nulos, ou seja, sem abatimento (Figura 4 [b]). Desta maneira, notou-se que as fibras proporcionaram uma redução no índice de trabalhabilidade do concreto, por gerar mais atrito com os demais componentes da mistura.

FIGURA 4 - *Slumps* obtidos



Fonte: Próprio autor

Embora o valor do *slump* não tenha relação direta com a resistência do concreto, os valores nulos dos traços T II, T III e T IV representam um mau indicativo para a estimativa da resistência, uma vez que os mesmos se apresentaram demasiadamente secos.

4.2 SEGREGAÇÃO

Ao romper os corpos de prova e analisar seu interior, percebeu-se que houve a presença de aglomerados de fibras, gerando segregações, como apresentado na Figura 5. Estas geraram espaços vazios no interior do concreto, que atuaram como elo fraco entre o aglomerante e os materiais sólidos, sendo possível notar a fissuração generalizada.

FIGURA 5 – Segregação encontrada em corpo de prova do T IV



Fonte: Próprio autor

Um dos principais motivos para estas segregações se deve ao processo de lançamento das fibras no concreto acontecer de forma manual, uma vez que, mesmo que o lançamento tenha ocorrido aos poucos, o fato de os grampos metálicos possuírem um formato favorável ao entrelaçamento mútuo, fez com que a separação manual das fibras para lançamento na betoneira tenha ocorrido de forma imperfeita, aumentando a possibilidade de que um aglomerado de fibras seja depositado na massa, elevando a probabilidade da ocorrência de segregações no interior do concreto.

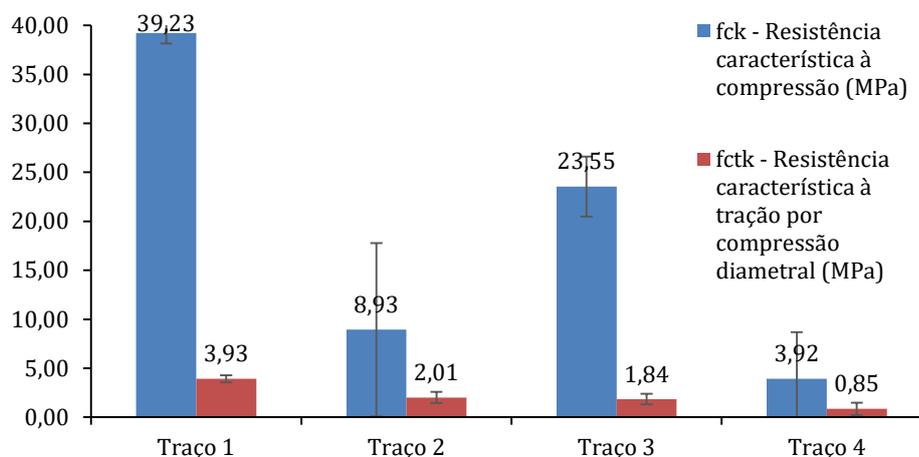
Outro fator a se considerar é o formato da fibra utilizada. Como foi escolhido um tipo de fibra com formato “U”, pode-se dizer que mesmo utilizando uma mesa vibratória para o adensamento do concreto, os agregados graúdos não tiveram muita liberdade de movimentação interna para melhor preenchimento de todo o espaço dos corpos de prova, visto que a abertura do grampo é menor do que a dimensão média dos agregados. Tal fato não permitiu a entrada dos agregados graúdos nestas áreas, o que gerou grandes espaços vazios dentro dos corpos de prova, causando reduções consideráveis na resistência do concreto.

Vale ressaltar ainda que alguns corpos de prova, devido às segregações das fibras, apresentaram espaços vazios na superfície, podendo ser considerados como porta de entrada para agentes agressivos, que por sua vez podem se infiltrar nas aberturas, provocando outros tipos de manifestações patológicas como corrosão da armadura e carbonatação.

4.3 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Assim como consta no Gráfico 1, os resultados obtidos para os valores de resistência característica à compressão para os traços T I, T II, T III e T IV foram de 39,23, 8,93, 23,55 e 3,92 MPa, respectivamente, enquanto os valores de resistência característica à tração foram de 3,93, 2,01, 1,84 e 0,85 MPa.

GRÁFICO 1 - Resistências características obtidas



Fonte: Próprio autor

O gráfico acima apresenta ainda os desvios padrão para cada traço de concreto, demonstrando a amplitude da variação das resistências, em que valores elevados desta indicam baixo controle tecnológico.

Ao analisar os resultados apresentados, notou-se que o T I atingiu valores de resistência à compressão condizentes com o esperado. Em contrapartida, constatou-se que a presença de fibras nos demais traços levou a uma drástica queda nas resistências. Pode-se notar ainda que a resistência à compressão dos traços não reduziu de forma proporcional ao aumento da concentração de fibras, enquanto a resistência à tração diminuiu conforme o aumento do volume de fibras.

Esta não linearidade na redução apresentada indica que o seu motivo pode ser produto de vários fatores, sendo um deles o notável aumento do consumo de água dos traços com a presença das fibras. No momento da concretagem, os 4 traços apresentaram consistências secas, com *slumps* nulos nos traços com presença de fibras, porém, ao colocar os corpos de prova do T I na mesa vibratória por 1 minuto, a água presente no interior do concreto espalhou-se, preenchendo todo o molde, mudando seu aspecto de seco para plástico. Por outro lado, ao realizar este procedimento com os corpos de prova dos traços T II, T III e T IV, o mesmo não ocorreu, e quanto maior a concentração de fibras presente, mais seco o aspecto do concreto ficou, conforme apresentado na Figura 6.

FIGURA 6 – Aspecto visual dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a razão entre as resistências à tração e as resistências à compressão obtidas, percebeu-se que o T I atingiu o valor de 10,01%, estando na faixa de estimativa estipulada por Mehta e Monteiro (2014). Já para T II e T IV, esta proporção aumentou para 22,50% e 21,58%, respectivamente, enquanto para T III houve a redução desta relação para 7,82%, quando comparadas com o traço T I. Desta forma, notou-se que há uma tendência nas fibras em elevar a relação tração-compressão do concreto, porém, esta elevação não foi percebida no T III, devido ao baixo controle tecnológico evidenciado no Gráfico 1 e a possível segregação formada em seu interior.

De maneira oposta à pesquisa de Quinino (2015), em que se obteve ganhos consideráveis nas resistências à compressão e à tração, sendo estas em torno de 10 a 19% para compressão e de 5 a 8% para tração por compressão diametral, quando comparadas com as do traço-base. Além disso, a presente pesquisa apresentou redução em ambas as resistências dos corpos de prova, resultando em valores em torno de 39 a 90% e 48 a 78%, respectivamente, em relação ao T I, uma vez que Quinino (2015) realizou sua pesquisa a partir do traço 1 : 2,9 : 3,6 : 0,66, com slump de 75 a 125mm e concentrações de fibras equivalentes a 0,6%, 0,8% e 1,15%, em que houve uma maior trabalhabilidade quando comparada com esta pesquisa.

Dois pontos a se considerar para esta adversidade são o adensamento do concreto e o fator de forma das fibras. Neste primeiro, o material de Quinino (2015) se mostrou homogêneo, enquanto esta pesquisa apresentou segregações de fibras em alguns traços, o que reduziu consideravelmente o f_{ck} do concreto. Quanto ao fator de forma das fibras, Quinino (2015) utilizou fibras de carbono e de polipropileno com fatores de forma iguais a 2.500.000 e 500, respectivamente, enquanto as fibras utilizadas para este estudo possuíam fator de forma igual a 26,68, com o diferencial

do formato das fibras utilizadas. Desta forma, nota-se que o maior diâmetro das fibras acarretou uma maior película de água ao redor da superfície da fibra, gerando uma maior zona de transição.

4.4 TENACIDADE

Após os ensaios de compressão e tração foram realizados novos rompimentos nos resíduos dos corpos de prova, a fim de analisar sua macroestrutura interna. Com isto, percebeu-se que os corpos de prova sem fibra apresentaram boa homogeneização e romperam de forma frágil, enquanto os corpos de prova com fibras apresentaram certa resistência à separação das partes, devido à ponte de ligação gerada pelos grampos. Ao realizar a separação destas, notou-se que as fibras se deformaram, ou seja, tentaram resistir às aberturas geradas no momento da compressão (Figura 7).

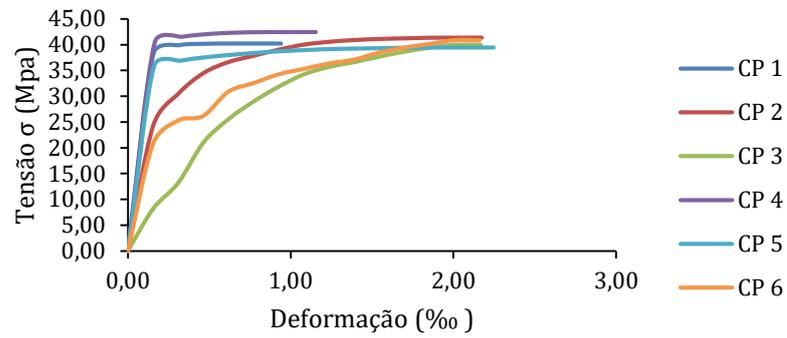
FIGURA 7 – Fibras deformadas após rompimento



Fonte: Próprio autor

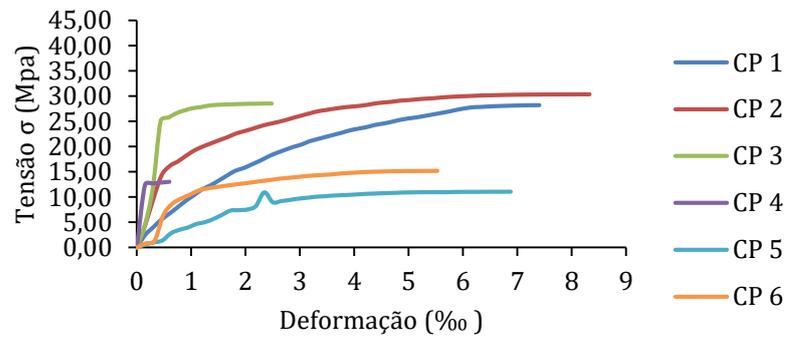
Constatou-se que, embora a resistência à compressão e tração dos traços com fibra tenha diminuído, a inserção das fibras resultou em um aumento considerável na tenacidade do concreto em relação ao T I, fazendo com que os corpos de prova dos traços com fibras suportassem grandes deformações antes do rompimento, conforme Gráficos 2, 3, 4 e 5, característica essa que já era esperada, por ser o principal motivo da utilização do concreto reforçado com fibras de aço.

GRÁFICO 2 – T I (0,0% fibras)



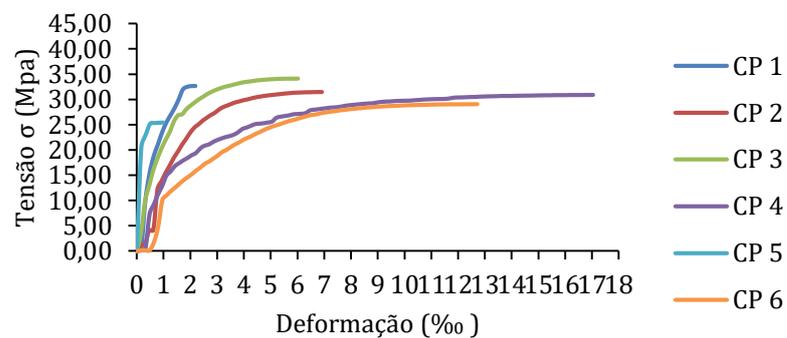
Fonte: Próprio autor

GRÁFICO 3 – T II (0,5% fibras)



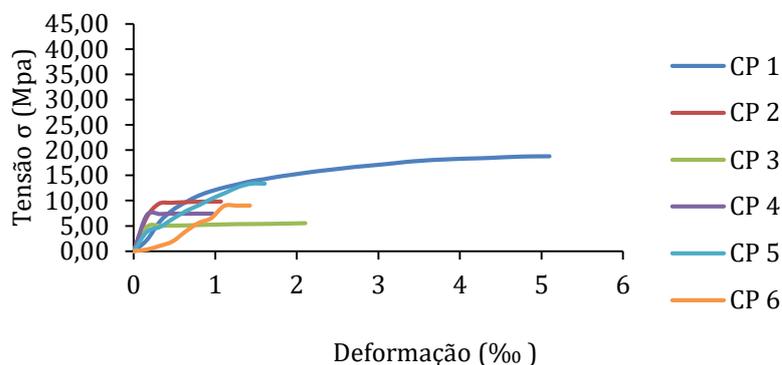
Fonte: Próprio autor

GRÁFICO 4 - T III (1,0% fibras)



Fonte: Próprio autor

GRÁFICO 5 – T IV (1,5% fibras)



Fonte: Próprio autor

Baseando-se nos gráficos obtidos através dos ensaios de resistência à compressão foi calculado o valor do módulo de elasticidade. Constatou-se que os traços com a presença de fibras obtiveram uma queda notável no módulo de elasticidade, representando valores médios de 86.291, 28.453, 37.809 e 10.104 MPa, para os traços T I, T II, T III e T IV, respectivamente.

De forma análoga foi calculado o valor do módulo de tenacidade, que compreende a capacidade de absorção de energia antes da ruptura do concreto. Notou-se que os traços com presença de fibras obtiveram maior tenacidade, em relação ao traço sem fibras, que resultaram em valores de 61,34, 74,85, 155,77 e 18,10 MPa, para os traços T I, T II, T III e T IV, respectivamente, podendo-se perceber que a elevada concentração de fibras no T IV, quando comparado com os demais traços, ocasionou uma redução na tenacidade possivelmente devido a quantidade elevada de segregação em seu interior.

Vale ressaltar ainda que a deformação até a ruptura dos traços com fibras apresentou valores médios de aproximadamente 3 vezes os obtidos no traço sem fibras.

Sobretudo, é possível perceber visualmente nos gráficos que não somente a deformação em regime elástico, mas principalmente a amplitude da deformação em escoamento aumentaram, evidenciando a capacidade das fibras em continuar resistindo aos esforços mesmo após a fissuração, atuando como ponte de transferência de cargas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que os grampos, nas condições apresentadas durante este estudo, se mostraram como uma alternativa de fibras de aço para o aumento da tenacidade, visto que os traços T II e T IV apresentaram valores da relação tração-compressão superiores aos 15% estimados, conforme informações de Mehta e Monteiro (2014), e, embora o traço T III não tenha atingido tal valor, acredita-se que o motivo seja a imperfeição supracitada durante o lançamento manual das fibras na betoneira.

Porém, os resultados obtidos neste estudo, em relação ao aumento de resistência do concreto, não corroboraram com os resultados obtidos por Quinino (2015), devido às imprevisibilidades ocorridas durante a pesquisa. Entre tais imprevisibilidades, destacam-se a combinação entre o traço-base possuir baixa relação água-cimento e a tendência percebida que os grampos têm de aumentar o consumo de água; o lançamento das fibras ter ocorrido de forma manual, aumentando a chance de ocorrência de segregação devido a possibilidade de o lançamento ocorrer de forma imperfeita e a incompatibilidade entre a abertura das fibras e as dimensões dos agregados graúdos.

A fim de combater isto, sugere-se o estudo da inserção das fibras em água antes do lançamento na massa de concreto, com o objetivo de facilitar o desagrupamento entre si. Além disso, recomenda-se evitar a reprodução deste ensaio utilizando um traço-base com reduzido consumo de água, visando aumentar a capacidade de resistência do concreto, uma vez que foi constatado que os valores reduzidos de *slump* para o traço adotado demonstraram-se incompatíveis para a utilização de fibras de aço.

Desta forma os resultados obtidos não devem ser descartados na íntegra, uma vez que no presente estudo as fibras não tiveram o comportamento como esperado. Sugere-se, para pesquisas futuras, a análise da alteração da relação água-cimento ou a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes, a fim de melhorar a trabalhabilidade e tentar proporcionar melhor adensamento do concreto, bem como a utilização de agregado graúdo com menores dimensões, como brita 0, com o objetivo de se obter uma melhor homogeneização e reduzir a incorporação de vazios.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015 (versão corrigida 2016).

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NBR 8522-1: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015 (versão corrigida 2015).

_____. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ARIF, Mohammed Adel. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 2014. 156 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Civil – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Uberlândia, 2014.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites.** 2. Ed, Português (Brasil). London: Taylor & Francis, 2007, p. 624.

BRANT, Carlos Alberto Caldeira. **Formulação termodinâmica do acoplamento corrosão-fissuração em estruturas de concreto armado.** 2019. 161p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu, 2019.

CHEN, Lianrong; MINDESS, Sidney; MORGAN, Dudley R. **Specimen geometry and toughness of steel fiber-reinforced concrete.** 1994. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 6, n. 4, p. 529-541, nov. 1994.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** 2011. 248p. Livre docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Influência dos procedimentos experimentais na precisão dos resultados dos ensaios de tenacidade em CRFA.** Rio Grande do Sul: IBRACON, 2007.

GARCEZ, Estela Oliari. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, p. 113, 2005.

GUPTA, Ram S. **Principles of structural design: wood, steel and concrete**. 2. Ed. CRC Press, 2014, p. 289.

HAITANG, Zhu; SHENGZHAO, Cheng; DANYING, Gao; SHEIKH Md Neaz; CHUANCHUAN, Li. **Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars**. Construction and Building Materials, v. 161, p. 587–597, 2018.

KAEFER, Luís Fernando. **Considerações sobre a microestrutura do concreto**. 2002.

KRENCHER, Herbert. **Fiber reinforced concrete**, ACI SP-44, PP. 45–77, 1974.

LI, Zongjin. **Advanced Concrete Technology**. Edição 1ª. John Wiley & Sons, Inc, 2011, p. 506.

LOPES, Maira Moraes. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 130, 2005.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. Ed. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2014, p. 659.

NEVILLE, Adam Matthey; BROOKS, Jeffrey John. **Tecnologia do concreto**. 2. Ed. Bookman Editora LTDA, 2010, p. 468.

NUNES, Lucio Nunes; AGOPYAN, Vahan. **A Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico. São Paulo, p. 26, 1998.

PEREIRA, Eric Vallotti. **Influência de fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis**. 2017. 170p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2017.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 123-216p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de pós-graduação em engenharia civil. Porto Alegre, 2015.

RUANO, Gonzalo; ISLA, Facundo; PEDRAZA, Rodrigo Isas; SFER, Domingo; LUCCIONI, Bibiana. **Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel**

fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials, v. 54, p. 646–658, 2014.

SERIGHELLI, Pedro Henrique Gwiggner; TURRA, Cristiano José; JOSÉ, David Roza. **Método numérico para a determinação do módulo de tenacidade de materiais a partir de ensaios de tração.** SECITEC – Semana da Ciência e Tecnologia, Instituto Federal Catarinense, 2016.