

Análise estatística do comportamento mecânico de concreto híbrido reforçado com aço e fibras de polipropileno

Statistical analysis of the mechanical behavior of hybrid concrete reinforced with steel and polypropylene fibers

DOI:10.34117/bjdv7n1-183

Recebimento dos originais: 10/12/2020

Aceitação para publicação: 10/01/2021

Welton Raiol de Assunção

Mestre em Engenharia de Materiais

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: wra_engenharia@yahoo.com.br

Marco Antonio Barbosa de Oliveira

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará/Campus Belém

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: marco.barbosa@ifpa.edu.br

Gyselle Maciel de Almeida

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará/Campus Breves

Endereço: Rua Antônio Fulgêncio da Silva, s/n – Bairro: Parque Universitário – CEP: 68.800-000 Breves – Pará, Brasil

E-mail: gysellealmeida@gmail.com

Laércio Gouveia Gomes

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: laercio.gomes@ifpa.edu.br

Ritermayer Monteiro Teixeira

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970), Belém, Pará, Brasil

E-mail: ritermayer@ufpa.br

Alcebíades Negrão Macêdo

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970), Belém, Pará, Brasil

E-mail: anmacedo@ufpa.br

RESUMO

A hibridização de fibras é uma das alternativas construtivas que consiste na combinação racional de diferentes tipos de fibras para produzir um concreto com benefícios provenientes de cada uma das fibras, através de uma resposta sinérgica. Este trabalho tem por objetivo avaliar estatisticamente o comportamento mecânico de concreto híbrido produzido com fibras de aço e de polipropileno. A metodologia utilizada consistiu em um planejamento fatorial 2^2 completo, com níveis de incorporação de fibra de 0,5 % e 0,75 % para ambas as fibras, cujo variável de resposta foi a resistência, o que resultou em quatro grupos de amostras que foram ensaiados à compressão axial e tração na flexão, sendo os resultados posteriormente analisados através de ANOVA e teste de Tukey, para determinação da significância das respostas obtidas. Os resultados estatísticos mostraram que ambas as fibras, assim como a interação entre elas, atuaram significativamente para um melhor desempenho no ensaio à compressão axial, enquanto que para ensaio de tração na flexão o único fator determinante na variação das resistências foi o teor de fibras de aço.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras, Concreto híbrido, Fibras de aço, Fibras de Polipropileno.

ABSTRACT

Fiber hybridization is one of the constructive alternatives that consists of the rational combination of different types of fibers to produce a concrete with benefits from each fiber, through a synergistic response. This work aims to statistically evaluate the mechanical behavior of hybrid concrete produced with steel and polypropylene fibers. The methodology used consisted of a complete 2^2 factorial design, with fiber incorporation levels of 0.5% and 0.75% for both fibers, whose response variable was resistance, which resulted in four groups of samples that were tested for axial compression and flexion traction, the results being subsequently analyzed using ANOVA and Tukey's test, to determine the significance of the responses obtained. The statistical results showed that both fibers, as well as the interaction between them, acted significantly for a better performance in the axial compression test, while for flexural tensile test the only determinant factor in the resistance variation was the fiber content of steel.

Keywords: Fiber reinforced concrete, Hybrid concrete, Steel fibers, Polypropylene fibers.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concretos melhorados com fibras tem gradativamente aumentado, e inúmeras pesquisas já comprovaram os benefícios das fibras como reforço. No concreto reforçado com fibras (CRF), as fibras são incorporadas ao volume de concreto de forma aleatória, conferindo-lhe características similares aos materiais isotrópicos, o que modifica seu regime de ruptura. A adição de fibras, nos teores e módulos de elasticidade apropriados, proporciona um aumento da capacidade de absorção de energia, desacelerando a propagação e abertura de fissuras, capacitando o concreto a suportar maiores deformações, quando comparado ao concreto sem reforço [1, 2].

Estudos tem comprovado que, a adição de fibras com alto módulo de elasticidade, como as fibras de aço (FA), pode efetivamente aumentar a resistência à tração e tenacidade do concreto, melhorando a absorção de energia necessária para ruptura, atuando como pontes de transferência de tensões após o início do processo de fissuração. O mesmo não ocorre quando se utiliza fibras de baixo módulo, como as de polipropileno (PP), que não apresentam ganhos relevantes a longo prazo na resistência. No entanto, misturas com esse tipo de fibra trouxeram benefícios na contenção de fissuras de retração plástica, estabilizando a abertura de fissuras nas primeiras idades, quando a resistência do concreto ainda é baixa, servindo de obstáculo a perda de água capilar, o que diminui a fissuração por retração, ocasionada por secagem precoce, durante o período de cura. Além disso as fibras de PP, são quimicamente inertes, podendo ser usadas em ambientes com maior nível de agressividade. [3, 4, 5].

A hibridização constitui em uma das possibilidades pouco exploradas na produção de CRF. Em um sistema híbrido, diferentes tipos de fibras são combinados racionalmente para produzir um compósito com o intuito de obter benefícios provenientes de cada uma das fibras individuais, resultando em uma resposta sinérgica de ambas, o que possibilita o aperfeiçoando das propriedades do concreto, principalmente quando empregado em locais onde suas características convencionais não são suficientes para combater condições de solicitação específicas exigidas [5, 6, 7].

O presente trabalho, foi realizado com o objetivo de verificar, através de análise estatística, a influência dos tipos de fibras no desempenho mecânico, em concreto híbrido, produzido com fibras de aço e de polipropileno, com teores de incorporação que variam entre 0,5% e 0, 75%. Os grupos de corpos de prova produzidos, foram obtidos através de planejamento fatorial completo 2², posteriormente ensaiados à compressão axial e tração na flexão, sendo os resultados posteriormente analisados através de análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, para determinação da significância das respostas obtidas

2 CONCRETO HÍBRIDO

Segundo SKAZLIĆ [6] e MOGHIMI [7], o concreto híbrido, oferece uma nova oportunidade de engenharia, pois, a presença de uma fibra, permite alcançar de forma mais eficaz, as propriedades potenciais das outras fibras incorporadas a matriz. Como nenhum CRF tem as propriedades mecânicas perfeitas e, considerando que, cada tipo de fibra tem diferentes efeitos nas propriedades do concreto fresco e endurecido, o uso do concreto híbrido melhora as propriedades gerais e otimiza o desempenho do composto,

em todos os níveis. DAWOOD; RAMLI [8] e BANYHUSSAN *et al.* [9] concordam, afirmando que, a combinação de maneira apropriada, de duas ou mais fibras com propriedades diferentes, pode tirar o máximo proveito para o produto resultante, com os benefícios individuais de cada fibra, podendo ser obtidos simultaneamente em um único compósito cimentício híbrido.

Para SUN; QIAN; CHEN [10], YAO; CAI; CHEN [11], e XU [12], os efeitos da utilização de diferentes tipos de fibras, no desempenho do concreto híbrido, atuarão no local e momento adequado, tirando o melhor proveito das características de cada fibra. No caso de concretos híbridos reforçados com fibras de aço e de polipropileno, as fibras melhoraram a condição da interface entre o cimento e o agregado, restringindo a ocorrência e o desenvolvimento de fissuras no concreto e melhorando o comportamento mecânico do concreto, durante toda sua vida útil.

WANG; ZHANG; WANG [13], estudaram o efeito na resistência e tenacidade do concreto reforçado com fibra híbrida de aço e polipropileno, com baixos teores de incorporação. Os autores chegaram à conclusão que, a capacidade de absorção de energia, das amostras com fibras, aumentou significativamente, ao mesmo tempo que, o espaçamento médio de rachaduras diminuiu notavelmente. A resistência à compressão diminuiria com o aumento do teor de fibra de polipropileno.

CHEN; LIU [14], verificaram a contribuição das fibras híbridas de aço, carbono e polipropileno nas propriedades de trabalhabilidade, mecânica e de retração, em concreto leves. Os resultados indicaram que ao se misturar fibras ao concreto, houve uma tímida redução na sedimentação dos agregados, melhorando a homogeneidade da mistura. O concreto híbrido mostrou melhorias no desempenho nas propriedades mecânicas e do comportamento frágil, em comparação com concretos produzidos com um único tipo de fibra. Os pesquisadores chegaram à conclusão de que as fibras de aço e carbono, proporcionaram um aumento na resistência a compressão e à tração, no entanto, as fibras de polipropileno reduziram um pouco a resistência à compressão.

ESWARI; RAGHUNATH [15], analisaram a resistência à flexão e a tenacidade de concreto híbrido reforçado com fibras de aço e polipropileno através de método de regressão. Os dados mostraram que a resistência à flexão e a tenacidade puderam ser aumentadas 81,0% e 31,42%, respectivamente, em comparação com o concreto de referência normal. Os autores afirmam que, o concreto misturado com fibra híbrida pode aumentar a resistência à tração e flexão, devido à resistência à ruptura das fibras.

A literatura mostra os benefícios obtidos com a hibridização de fibras como reforço em concretos. No entanto, ainda se faz necessário, mais pesquisas com esse material para avaliar seu desempenho e tentar entender mais sobre seu comportamento, analisando os efeitos que a presença de uma fibra pode exercer sobre a outra, e nas propriedades do concreto.

3 PLANEJAMENTO FATORIAL

A avaliação da influência dos fatores sobre as respostas obtidas, se estabelece como um dos problemas mais comuns para quem realiza experimentos. O planejamento fatorial, é uma das principais técnicas utilizadas, quando se busca compreender, a relação de dependência existente entre as respostas obtidas em um experimento, e os fatores utilizados no processo [16]. É amplamente empregado, em experimentos que envolvam diversos fatores, nos quais se pretende conhecer seus efeitos sobre uma ou mais respostas [17]. Na execução de um planejamento fatorial, se deve especificar, os níveis que cada fator assumirá, durante os experimentos, sendo um planejamento fatorial completo, aquele que abrange todas as combinações possíveis entre os fatores. O planejamento fatorial, mais frequentemente utilizado é denominado de planejamento fatorial 2^k , onde existe o emprego de k fatores com dois níveis cada [18].

4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Os valores das médias amostrais, por si próprios, não são suficientes para afirmar, que os resultados alcançados correspondem à realidade, somente podendo fazer inferências, após uma análise mais aprofundada. Portanto, é imprescindível, a realização de análise das médias, para determinar se, a diferença observada nos resultados amostrais são: em consequência de causas reais (diferença significativa factual), ou se são devido a fatores circunstanciais aleatórios (acaso) [18].

Um dos procedimentos mais utilizados para realizar comparações de médias, verificando se elas possuem médias iguais ou não, permitindo fazer conclusões, a partir de dados amostrais, é a Análise de Variância, ou ANOVA (que provém do acrônimo do termo em inglês, *Analysis of Variance*). A ANOVA Consiste em um teste de hipóteses, que permite tomar fazer inferências, através dos dados observados, atuando essencialmente, na verificação da existência, de ao menos, uma diferença significativa entre as médias, possibilitando a comparação de vários grupos ao mesmo tempo, evidenciando se as respostas sofrem influência dos fatores [17].

O primeiro passo para a realização da ANOVA é: definir a hipótese nula, que consiste na suposição de que não há nem uma diferença entre os grupos amostrais ensaiados; e a hipótese alternativa, de que existe, ao menos uma diferença estatística. Através da ANOVA se determina o valor-P, que é definido como, a probabilidade de se observar uma estatística de teste igual ou maior, que aquela obtida em uma amostra, sob a hipótese nula. Geralmente, se esperado que, sob a hipótese nula, o valor de estatística de teste seja pequeno, demonstrando, através dos dados obtidos, uma forte evidência contra as afirmações da hipótese nula, significando que a probabilidade de se conseguir um valor da estatística de teste como o observado seja muito improvável, sendo o suficiente para a rejeição da hipótese nula. Tradicionalmente, se pré-estabelece um limite, ou nível de significância (α), para o valor-P, usualmente com valor de 0,05, ou seja, se assume que haja apenas uma probabilidade de 5% de que a diferença encontrada não seja verdadeira [17, 18].

5 TESTE DE TUKEY

Apesar da ANOVA, ser um procedimento poderoso no teste da homogeneidade de um conjunto de médias, ao se rejeitar a hipótese nula, e conseqüentemente adotar a hipótese alternativa, não é possível ainda saber, entre quais das médias populacionais são iguais ou diferentes, ou seja, não podemos concluir qual o melhor tratamento empregado em um experimento [17]. A investigação de hipóteses, são empregadas nas mais diversas áreas do conhecimento, sendo a comparação múltipla entre as médias dos tratamentos experimentais, uma das ferramentas mais empregada, devendo ser realizada após a ANOVA. Dentre os testes de comparações múltiplas mais empregados, está o teste de Tukey, que se destaca ao fazer comparações entre todos os pares de tratamentos, e também por ser de fácil aplicação [16].

O teste de Tukey consiste na comparação de todos os possíveis pares de médias, permitindo criar intervalos de confiança (IC) para todas as diferenças. Ao contrário de fazer a estimativa de um parâmetro da população, como a média, por um único valor, um IC se configura em um intervalo de estimativas prováveis, que o valor verdadeiro do parâmetro pode assumir. No teste de Tukey, para um nível de significância de 5%, teremos 95% de probabilidade do IC, conter valor da média verdadeira. Os IC's são utilizados para representar a confiabilidade de uma estimativa, indicando o quanto os resultados de um experimento são confiáveis. Além disso, um IC para a diferença entre

as médias pareadas que contém o valor zero, indica que a diferença não é significativa, ou seja, que não existe diferença entre as médias [17].

6 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.1 MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA

Na produção do concreto, empregou-se como aglomerante hidráulico o cimento CP II-E-32 RS. Os agregados utilizados foram os comumente encontrados na cidade de Belém-Pará. A água foi proveniente da rede pública do município. As fibras de aço usadas foram a do Tipo C (corrugada), Classe I (proveniente de arame trefilado a frio), classificadas de acordo com a NBR 15530 [19], possuindo comprimento médio (l_f) de 38 mm, diâmetro equivalente de 1,28 mm, fator de forma (λ) igual à 30 e massa específica de 7850 kg/m³. Enquanto, as macrofibras de polipropileno foram a do tipo frisadas com comprimento médio (l_f) de 54 mm, diâmetro equivalente de 1 mm, fator de forma (λ) igual à 54 e massa específica de 920 kg/m³.

Utilizou-se também aditivo superplastificante, a base de polímeros policarboxilatos, objetivando melhorar a trabalhabilidade do concreto com incorporação de fibras, sem que houvesse alteração na relação água/cimento, sendo a quantidade utilizada igual para todas as dosagens com o intuito de manter como únicas variáveis de controle, as fibras de aço e de polipropileno.

6.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.2.1 Caracterização dos Materiais

Para a caracterização dos agregados foram realizados os ensaios de granulometria, seguindo os critérios da NBR 248 [20], massa unitária, conforme NBR 45 [21] e massa específica de acordo com as NBR 52 [22] e NBR 53 [23]. As características, utilizadas na pesquisa, do aglomerante e das fibras de aço e de polipropileno, foram aquelas fornecidas por seus respectivos fabricantes.

6.2.2 Seleção de Fatores e Organização do Planejamento Experimental

O método adotado, para o planejamento foi do tipo fatorial completo 2², onde foi realizado experimentos com todas as possíveis combinações. Os fatores adotados foram os teores de fibras de aço (FA) e fibra de polipropileno (PP), enquanto para as variáveis de resposta, foram escolhidas as resistências do concreto híbrido à compressão axial e sua resistência à tração na flexão. Os níveis escolhidos para os teores de fibra foram de 0,5%

e 0,75%, codificadas como níveis inferior (-) e superior (+), respectivamente. Para estimativa do erro experimental, foram realizadas repetições dos experimentos. É apresentado na Tabela 1 a matriz de planejamento do experimento.

Tabela 1 – Matriz fatorial 2² usada para o experimento.

Combinações de dosagens	Fatores	
	Fibra de aço	Fibra de polipropileno
FA0,50-PP0,75	-	+
FA0,50-PP0,50	-	-
FA0,75-PP0,50	+	-
FA0,75-PP0,75	+	+

Para realizar análise através da ANOVA, se adotou um nível de significância (α) para o valor-P igual a 5%. Para hipótese nula (H_0) se adotou o pressuposto que: a média (μ) dos grupos de concretos híbridos produzidos são todas iguais. Enquanto que, se considerou para a hipótese alternativa (H_1) o pressuposto de que: haverá, ao menos, uma diferença entre as médias dos grupos ensaiados.

$$H_0 \rightarrow \mu = \text{Para todos os grupos ensaiados}$$

$$H_1 \rightarrow \mu \neq \text{Para, ao menos, um dos ensaiados}$$

Para complementar a análise feita pela ANOVA, foi executado testes de comparações múltiplas das médias, onde foi aplicado o teste de Tukey, se adotando o mesmo um nível de significância de 5%, utilizado para a ANOVA, o que permitiu a construção de intervalos com 95% de confiança.

6.2.3 Determinação da dosagem do concreto

O método de dosagem usado foi o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que consiste na obtenção de um diagrama de dosagem para o concreto, a partir da correlação de parâmetros obtidos experimentalmente [24]. O abatimento considerado foi de 100 ± 20 mm. Para a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) aos 28 dias, se adotou o valor de 25 MPa, com valor de desvio padrão igual à 4,0. Utilizando-se NBR 12655 [25], se obteve o valor estimado de 31,6 MPa para a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias (f_{cmj}). Através do diagrama de dosagem obtido pelo método IPT, se determinou consumo de materiais para produção de 1 m³ de concreto (sem adição de fibras), sendo necessários 449,06 kg/m³ de cimento, 633,17 kg/m³ de agregado miúdo, 1037,33 kg/m³ de agregado graúdo e 220,04 litros de água. A apresentação da

dosagem ficou da seguinte forma (1:1,41:2,31:0,49). Os teores de incorporação de fibras foram de 39,45 kg/m³ e 59,32 kg/m³, para as FA, e de 6,95 kg/m³ e 4,62 kg/m³, para as de PP, respectivamente para as porcentagens de 0,5% e 0,75%, valores atingidos através da regra das misturas para materiais compósitos.

6.2.4 Produção, moldagem e cura dos corpos de prova

O preparo do concreto seguiu as seguintes etapas: umidificação da betoneira, posteriormente se colocou todo o seixo e metade da água, seguido do cimento, areia e restante da água com o aditivo, com a betoneira sempre em movimento, até se alcançar uma mistura homogênea, se adicionando por último as fibras, de forma a não criar “ouriços” (aglomerado de fibras formando uma bolha). Após completa homogeneização dos materiais, se procedeu com o ensaio de trabalhabilidade conforme NBR 67 [26].

A moldagem e a cura dos corpos de prova seguiram os procedimentos descritos na NBR 5738 [27]. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em duas camadas, sendo cada uma delas adensadas manualmente com 12 golpes de haste metálica. Os prismáticos também foram moldados em duas camadas, com adensamento manual, porém utilizados 75 golpes.

Ao total foram produzidas quatro grupos de dosagens, com variações dos teores de fibras de aço e polipropileno. Os corpos de prova, cilíndricos e prismáticos, após os períodos de 24 h e 48 h, respectivamente, foram desmoldados, identificados e armazenados em tanque com água saturada com hidróxido de cálcio, até o momento do ensaio. Foram produzidos 32 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm (8 para cada grupo), e 12 corpos de prova prismáticos com as dimensões de 100 mm x 100 mm x 300mm (3 para cada grupo), totalizando 44 unidades produzidos para a pesquisa.

6.2.5 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial foi realizado seguindo os parâmetros estabelecidos na NBR 5739 [28]. O aparelho de ensaio utilizado foi uma prensa hidráulica do tipo universal, de marca Emic, com capacidade de carga de 200 toneladas e indicador de carga da marca Weightech, modelo WT21-LCD. Os corpos de prova foram rompidos à compressão axial, sobre o regime de carregamento contínuo de (0,45 ± 0,15) MPa/s na idade específica de 28 dias, contadas a partir do momento da moldagem.

6.2.6 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos de concreto, foi feito obedecendo os parâmetros descritos na ASTM C293M-16 [29]. A resistência de tração na flexão, denominada na norma de módulo de ruptura, e obtida através de carregamento aplicado no meio do vão de uma viga simples. O ensaio foi realizado em uma prensa universal da marca AROTEC, modelo WDW-100E. Os corpos de prova utilizados no ensaio possuíam a idade específica de 28 dias, e sobre eles foi aplicado uma taxa de carregamento constante, com valor de 0,2 mm/min, até a ruptura.

6.2.7 Análise da superfície de fratura

Para a análise da superfície de fratura, se utilizou amostras retiradas dos corpos de prova rompidos no ensaio de tração na flexão. As amostras foram retiradas com auxílio de disco de corte, posteriormente lavadas em água corrente e secas em estufa à temperatura de 50° C por um período de 4 horas. O aparelho utilizado para obtenção das imagens foi um estereoscópio óptico da marca Zeiss, modelo Stemi 508, que possui um poder de ampliação de até 50x.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

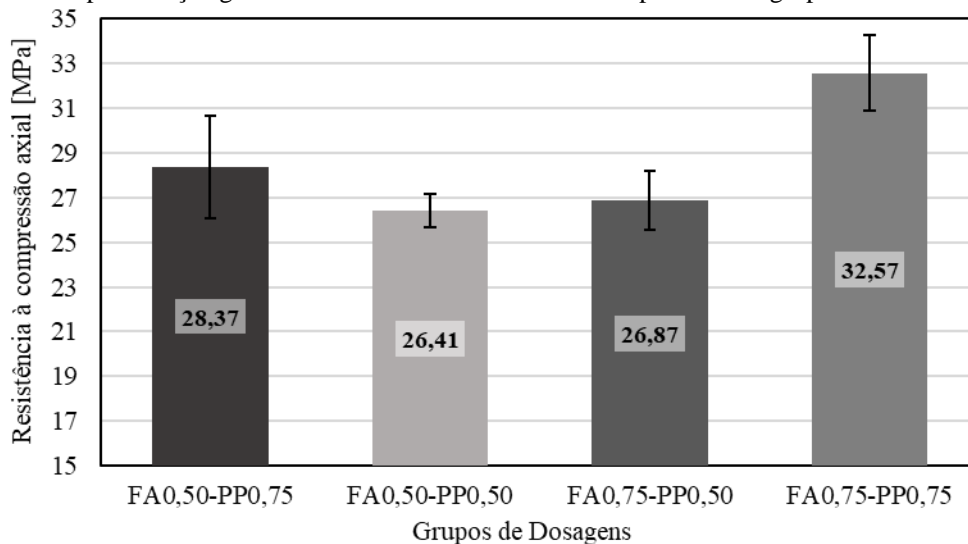
7.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS

Os resultados encontrados nos ensaios de caracterização, para o agregado miúdo, indicam que a dimensão de grão com maior frequência na amostra é de 0,30 mm, enquanto seu diâmetro máximo característico é de 1,18 mm, o módulo de finura está no intervalo de 1,55 a 2,20, que segundo a NBR 7211 [30], corresponde a zona utilizável inferior. Para agregado graúdo o maior percentual de grãos retidos foram os com dimensão de 12,5 mm, seu diâmetro máximo característico é de 19 mm, com relação a distribuição granulométrica, se observa que o agregado graúdo não se enquadra em nenhuma zona especificada pela da norma NBR 7211 [30], no entanto, se aproxima mais do que seria a classificação para Brita nº 1, ficando com os grãos retidos acima da malha 12,5 mm (quase 47,9 %), dentro dos limites da zona 9,5/25, e com as demais porcentagens bem próximas do limite inferior da referida zona. Os valores obtidos de massa unitária e massa específica foram, respectivamente de 1480,2 kg/m³ e 2610 kg/m³, para o agregado miúdo e de 1520,8 kg/m³ e 2640 kg/m³, para o agregado graúdo.

7.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

As resistências médias para cada grupo de dosagens, obtidas através do ensaio de compressão axial, podem ser observadas graficamente na Figura 2.

Figura 2 – Representação gráfica das médias da resistência à compressão dos grupos ensaiados



Pode-se verificar que o grupo (FA0,75-PP0,75), que corresponde a dosagem com teor máximo de incorporação, para ambas as fibras, obteve o melhor resultado, tendo ganhos de resistência, em torno de 14,80%, 23,32% e 21,21%, respectivamente, em relação aos grupos (FA0,50-PP0,75), (FA0,50-PP0,50) e (FA0,75-PP0,50). Nota-se também, que o segundo grupo com melhor desempenho foi o (FA0,50-PP0,75), com valores de resistência 7,58% e 5,58% maiores que as dosagens (FA0,50-PP0,50) e (FA0,75-PP0,50), nessa ordem. A diferença entre as resistências dos grupos (FA0,50-PP0,50) e (FA0,75-PP0,50), foi de apenas 1,90 %. As informações obtidas pelo ensaio de compressão axial, no que se refere ao concreto híbrido, produzido nas dosagens estabelecidas neste trabalho, indicam que, para níveis diferentes de teores de fibra, a resistência aumenta com maiores porcentagens de fibra de PP, o que contraria os trabalhos de WANG; ZHANG; WANG [13] e CHEN; LIU [14], que afirma que, a resistência à compressão diminuiria com o aumento do teor de fibra de PP. No entanto, os ganhos mais evidentes de resistência, foram observados com aumento em conjunto dos teores de FA e PP, com valores de incorporação de 0,75%, proporcionam um aumento na resistência à compressão mais pronunciado, o que evidência uma possível sinergia entre as fibras, onde as FA, são mais eficazes na presença de maiores quantidade de fibras de PP, o que está em coerência com os estudos de SKAZLIĆ [6] e MOGHIMI [7].

Apesar, dos dados obtidos, se faz necessário a verificação da sua significância, através da ANOVA, para confirmar se os valores obtidos são de fato proveniente das variações nos níveis dos fatores adotados, ou devido fatores externos que não se tinha controle durante a realização do ensaio. A Tabela 2 mostra os resultados da ANOVA.

Tabela 2. ANOVA para resistência à compressão axial

Fonte de Variação	GL	Soma Quadrática (Variações)	Contribuição na Variação Total	Quadrado Médio (Variâncias)	Valor-F	Valor-P
Fibra de Aço	1	43,44	16,62%	43,441	16,74	0,000
Fibra de Polipropileno	1	117,30	44,88%	117,297	45,21	0,000
Interação Entre Fatores	1	27,97	10,70%	27,965	10,78	0,003
Variação Dentro do Grupo (Resíduos)	28	72,65	27,80%	2,595		
Total	31	261,35	100%			

Nota: GL – Grau de liberdade

Percebe-se pelos dados da Tabela 2, que os fatores FA e PP, assim como a interação entre eles, apresentam valor-P menores que o nível de significância (α) adotado no trabalho, que é igual a 5 %, o que segundo BARROS NETO *et al.* [16], representa que a variação nos níveis em cada um dos fatores estudados, e a interação entre eles, provocar alterações na variável de interesse, nesse caso a resistência à compressão, de forma significativa, com um nível de confiança de 95%. Entretanto, se percebe que a alteração na resistência à compressão, é maior ao variar os níveis do fator PP, que possui uma contribuição na variação total da média de 44,88%. Pela ANOVA, somente é possível identificar a existência de uma diferença significativa entre os grupos analisados, o método não especifica entre quais grupos ocorre essa diferença. Para isto, foi utilizado o teste de Tukey, apresentado na Tabela 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Teste Simultâneos de Tukey para compressão (Fator FA)

Diferença entre Níveis (Fator FA)	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,75 % e 0,50 %	2,330	0,569	(1,164; 3,497)	4,09	0,000

Tabela 4 – Teste Simultâneos de Tukey para compressão (Fator PP)

Diferença entre Níveis (Fator PP)	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,75 % e 0,50 %	3,829	0,569	(2,663; 4,996)	6,72	0,000

Tabela 5 – Teste Simultâneos de Tukey para compressão (Efeitos de interação)

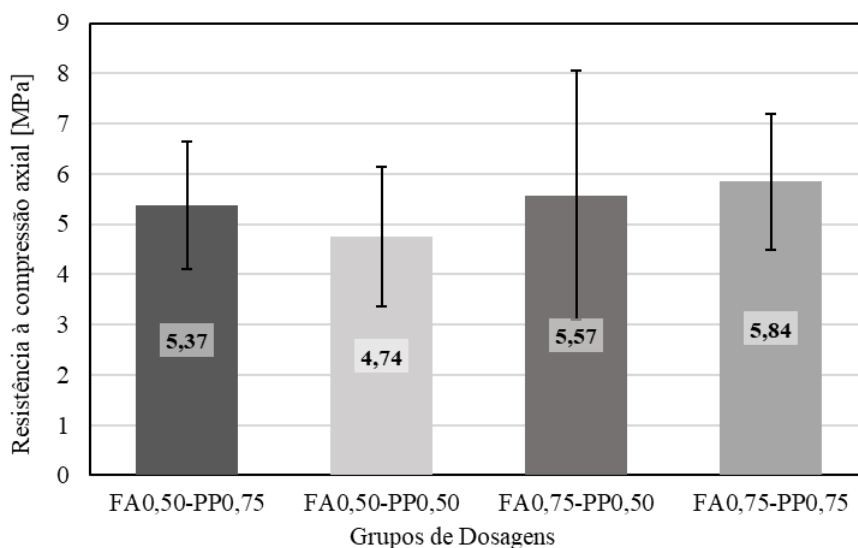
Diferença entre Tratamentos (Comparação entre Grupos)	Diferença entre Médias	Erro P.D.	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
(FA0,50-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50)	1,959	0,805	(-0,239; 4,158)	2,43	0,094
(FA0,75-PP0,50) e (FA0,50-PP0,50)	0,461	0,805	(-1,738; 2,659)	0,57	0,940
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50)	6,159	0,805	(3,961; 8,358)	7,65	0,000
(FA0,75-PP0,50) e (FA0,50-PP0,75)	-1,499	0,805	(-3,697; 0,699)	-1,86	0,267
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,75)	4,200	0,805	(2,002; 6,398)	5,21	0,000
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,75-PP0,50)	5,699	0,805	(3,501; 7,897)	7,08	0,000

Os IC fornecidos pelo teste de Tukey para os fatores FA e PP, ratificam que as alterações nos níveis de cada fator influenciam nas repostas observadas na variável de interesse, pois os IC apresentados nas Tabelas 3 e 4, não contém o valor zero, o que de acordo com MONTGOMERY; RUNGER [17], sinaliza a diferença entre as médias é significativa, outro indicativo são os valores-P observados, que estão abaixo de 5%. De forma análoga, o teste de Tukey para o efeito de interação entre os fatores (Tabela 5), mostra que há diferença significativa somente nos entre os grupos (FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50), (FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,75) e (FA0,75-PP0,75) e (FA0,75-PP0,50), onde demonstra que, uma variação individual nos níveis dos fatores, no concreto híbrido, não traz ganhos relevantes na resistência à compressão. Por outro lado, quando se varia os níveis de ambos os fatores, ao mesmo tempo, a interação entre os fatores passa a influenciar na resposta alcançada, havendo um ganho significativo nos valores de resistência à compressão axial do concreto híbrido, se soma as conclusões de DAWOOD; RAMLI [8] e BANYHUSSAN *et al.* [9], quanto aos benefícios da combinação de diferentes fibras para atingir o potencial máximo de cada uma no concreto.

7.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Representação gráfica das médias da resistência à tração na flexão dos grupos ensaiados

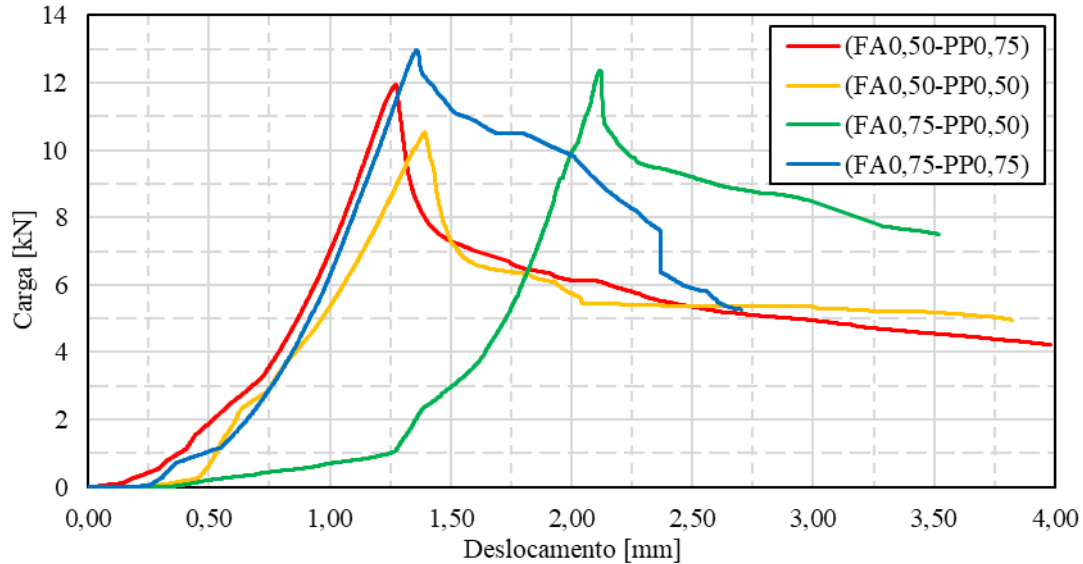


Os dados indicam que o grupo (FA0,75-PP0,75), atingiu valores de resistência à tração, com porcentagem de 8,63%, 23,29% e 4,77%, maiores que os grupos (FA0,50-PP0,75), (FA0,50-PP0,50) e (FA0,75-PP0,50), respectivamente. Diferente do que ocorreu com a resistência à compressão, o segundo grupo com maior resistência, foi o grupo (FA0,75-PP0,50), que possui maior teor de fibras de aço que de fibras de polipropileno, a resistência desse grupo é maior em relação aos grupos (FA0,50-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50), em torno de 3,69% e 17,68 %, nessa ordem. A diferença de resistência entre os grupos (FA0,50-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50) é de 13,50 %, sendo o grupo (FA0,50-PP0,50) o que teve menor desempenho. Os resultados estão em acordo com afirmação de ESWARI; RAGHUNATH [15], que diz que a mistura de fibras no concreto pode aumentar a resistência à tração e flexão, devido à resistência à ruptura das fibras e seu módulo de elasticidade. No entanto, o teor de fibras também é importante neste aspecto, pois com maiores quantidades de fibras incorporadas ao concreto maior será a probabilidade de as fibras interceptarem as fissuras em formação, o que pode explicar a diferença de apenas 3,69% entre os grupos (FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,75).

O gráfico de carga x deslocamento está ilustrado na Figura 4, onde se observa que o concreto teve comportamento de suavização de carga (*Softening*) conforme por FIGUEIREDO [4], onde após atingida a carga de formação da primeira fissura, que também será sua carga máxima, o concreto falha formando uma única fenda no meio de seu vão, onde deslocamentos seguintes são regidos pela progressão dessa única fissura. Neste caso o gráfico pode indicar que as fibras não puderam suportar mais carga após a

formação da primeira fissura, ou foram quebradas ou arrancadas (*Pullout*) das laterais da fissura.

Figura 4 – Gráfico Carga-Deslocamento obtidos no ensaio de tração na flexão



A ANOVA para ensaio de tração na flexão então representados na Tabela 6. Os dados apontam que há diferença significativa apenas quando se varia os níveis de teores de FA, sendo o único fator com valor-P, abaixo do nível de significância (α), o que indica que a variação no teor de fibras de polipropileno e o efeito de interação entre as fibras não atuam para a variação de resistência à tração na flexão. Este resultado está em conformidade com os trabalhos de BENTUR; MINDESS, [3] e FIGUEIREDO [4] e que afirmam que, as fibras com maior módulo de elasticidade, como as de aço, contribuem mais na resistência à tração e a abertura da fissura, que as de baixo módulo, como que as fibras de polipropileno, por atuarem como pontes de transferência de tensão após o início da fissuração.

Tabela 6. ANOVA para resistência à tração na flexão

Fonte de Variação	GL	Soma Quadrática (Variações)	Contribuição na Variação Total	Quadrado Médio (Variâncias)	Valor-F	Valor-P
Fibra de Aço	1	1,2545	35,81 %	1,2545	6,55	0,034
Fibra de Polipropileno	1	0,6165	17,60 %	0,6165	3,22	0,110
Interação Entre Fatores	1	0,1008	2,88 %	0,1008	0,53	0,489
Variação Dentro do Grupo (Resíduos)	8	1,5319	43,72 %	2,595		
Total	11	3,5038	100 %			

Nota: GL – Grau de liberdade

O teste de Tukey novamente foi realizado e seu resultado pode ser visto nas Figuras 7, 8 e 9, o que confirmam as análises anteriores. Como se observa nas Tabelas 7, 8, 9, não existe diferença significativa na interação entre os fatores, assim como não há diferença significativa quando se altera os níveis PP, sendo a influência na reposta, visualizada, apenas quando se altera os níveis de fibras de aço.

Tabela 7 – Teste Simultâneos de Tukey para tração na flexão (Fator FA)

Diferença entre Níveis (Fator FA)	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,75 % e 0,50 %	0,647	0,253	(0,064; 1,229)	2,56	0,034

Tabela 8 – Teste Simultâneos de Tukey para tração na flexão (Fator PP)

Diferença entre Níveis (Fator PP)	Diferença entre Médias	Erro Padrão da Diferença	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,75 % e 0,50 %	0,453	0,253	(-0,129; 1,036)	1,79	0,111

Tabela 9 – Teste Simultâneos de Tukey para tração na flexão (Efeitos de interação)

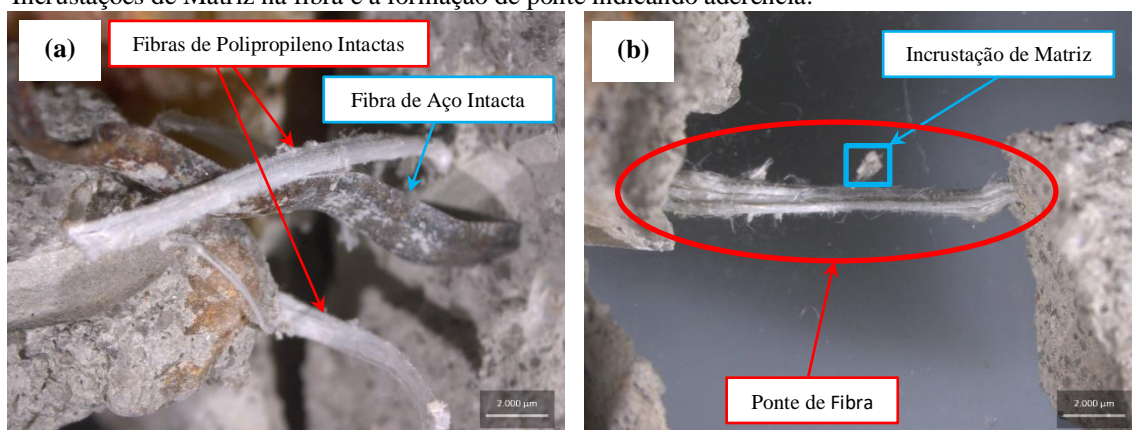
Diferença entre Tratamentos (Comparação entre Grupos)	Diferença entre Médias	Erro P.D.	IC de 95 % Simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
(FA0,50-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50)	0,637	0,357	(-0,508; 1,781)	1,78	0,347
(FA0,75-PP0,50) e (FA0,50-PP0,50)	0,830	0,357	(-0,314; 1,974)	2,32	0,172
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,50)	1,100	0,357	(-0,044; 2,244)	3,08	0,060
(FA0,75-PP0,50) e (FA0,50-PP0,75)	0,193	0,357	(-0,951; 1,338)	0,54	0,946
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,50-PP0,75)	0,463	0,357	(-0,681; 1,608)	1,30	0,590
(FA0,75-PP0,75) e (FA0,75-PP0,50)	0,270	0,357	(-0,874; 1,414)	0,76	0,872

7.4 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA FRATURA

As imagens da superfície da fratura, obtidas com o Estereoscópio com aproximação de 6,3x, mostram que há uma predominância de arrancamento das fibras (*Pullout*), caracterizado pelos espaços vazios e a presença de fibras intactas, não havendo o seu rompimento (Figura 9a). Observa-se também, o descolamento parcial entre a fibra e matriz. Segundo BENTUR; MINDESS, [3] e FIGUEIREDO [4], o processo de arrancamento das fibras, como observado nas imagens, pode representar um elevado índice de porosidade na zona de transição, devido ao acúmulo de água que comumente

ocorre nessa região, indicando a necessidade de alterações nas dosagens utilizadas, para que se alcance melhores desempenhos na aderência da fibra com a matriz do concreto. Esse fato sinaliza como a mistura fresca exercer importante influência na zona de transição uma vez que leva a formação de vazios, como os observados nos estudos de CHEN; LIU [22]. A zona de transição que ocorre nas vizinhanças das fibras é semelhante ao que ocorre entre a matriz e o agregado graúdo, e depende do tipo de fibra, da dosagem e processo de produção do concreto. Apesar disto se nota a presença de incrustações da matriz na superfície das fibras, e a formação de ponte de fibra (quando uma fibra liga dois fragmentos diferentes de matriz) (Figura 9b), comprovando que houve certo grau de aderência, com a tendência de arrancamento refletindo na dissipação de energia necessária para ruptura, o que ratificam o observado nos gráficos da Figura 4, que indicam o comportamento de suavização de carga (*Softening*). O arrancamento das fibras também pode ser explicado pelo concreto híbrido possui produzido para a pesquisa, possui um volume de incorporação e comprimento de fibras menores aos mínimos necessários para a perfeita ancoragem, resultando em tensões de cisalhamento e de atrito na interface fibra matriz insuficientes para que a ruptura ocorra no meio da fibra.

Figura 5 – Imagens da superfície da fratura obtidas com estereoscópio. (a) fibras arrancadas (*Pullout*); (b) Incrustações de Matriz na fibra e a formação de ponte indicando aderência.



8 CONCLUSÕES

O resultado do ensaio de compressão axial, realizado com as amostras de concreto híbridos produzidos para a pesquisa, mostrou que, o grupo que obteve a maior resistência foi o com teores máximos de incorporação de ambas as fibras (FA0,75-PP0,75), totalizando 1,5%, atingindo 32,52 MPa, valor 14,80% maior que o segundo grupo com melhor desempenho (FA0,50-PP0,75), que obteve uma resistência igual à 28,37 MPa. A

simples avaliação das médias, indicam que a presença de maiores teores de fibras PP ajuda no ganho de resistência a compressão. Porém, há evidência que a resistência do concreto híbrido à compressão cresce, com o aumento em conjunto de ambas as fibras, mostrando que seus potenciais como reforço são melhores aproveitados se utilizadas juntas. Através da análise estatística, utilizando ANOVA e teste de Tukey, pode-se constatar que o efeito de interação entre fibras existe e é importante no ganho de resistência à compressão axial no concreto híbrido, sendo estatisticamente significativo quando se aumenta na mesma proporção os teores de incorporação para ambas as fibras. Avaliando isoladamente o efeito de cada fibra sobre a resistência à compressão, conclui-se que variações nos teores das fibras de aço e de polipropileno são significantes para as repostas obtidas, no entanto, as variações nas respostas são maiores com a variação do teor de fibras de polipropileno.

Para o ensaio de tração na flexão o grupo que obteve maior resistência novamente foi o grupo com teores máximos de incorporação de ambas as fibras (FA0,75-PP0,75), alcançando 5,84 MPa, com uma diferença de apenas 4,47% o segundo melhor grupo, que para o ensaio de tração na flexão foi (FA0,75-PP0,50), que obteve uma resistência igual à 5,57 MPa, o que pode ser explicado pela maior porcentagem de incorporação de FA na mistura. As curvas de carga-deslocamento demonstram também, que o concreto híbrido produzido para a pesquisa, teve um comportamento de suavização da queda de carga pós-pico (*Softening*), caracterizando um comportamento menos frágil. As variações no teor de fibras de polipropileno e o efeito de interação entre as fibras não atuaram de forma relevante para alterações das respostas de resistência. Estatisticamente a única diferença significativa na resistência à tração na flexão das dosagens utilizadas para produção do concreto híbrido, ocorreu com a variação nos teores de fibras de aço

A análise da superfície da fratura, mostrou a presença de poros na matriz de concreto, descolamento na interface fibra-matriz e uma predominância no arrancamento progressivo das fibras, demonstradas por espaços vazios provocados pela retirada das fibras e presença de fibras intactas com alguns pontos de incrustações indicando certo grau de aderência. O arrancamento observado, pode ter sido provocado por tensões insuficientes de cisalhamento e atrito desenvolvidas nas superfícies das fibras, que mantém a aderência fibra-matriz, devido à volume e comprimento de fibras abaixo dos seus valores críticos.

Logo, os dados obtidos nos ensaios, analisados estatisticamente através da ANOVA e do teste de Tukey, possibilitaram avaliar melhor os benefícios obtidos com os

concretos híbridos produzidos dentro do escopo deste trabalho, permitindo a compreensão das variáveis envolvidas no processo, e quais eram de fato significantes para o objetivos pretendidos, assim como estimar os impactos provocados pela variação dos fatores escolhidos e sua interação nas variáveis de interesse, neste caso avaliado em termos de resistência a compressão axial e tração na flexão.

REFERÊNCIAS

- [1] RAMOS, F.M. Análise experimental de tubos de concreto reforçados com fibras de aço. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas: UNICAMP, 2012.
- [2] GOES, C.M.W.; FONTANINI, P.S.P.; PIMENTEL, L.L.; JACINTHO, A.E.P.G.A. “Análise da aplicação de concreto com adição de macrofibras estruturais sintéticas e microfibras de vidro anti-crack ar em pisos”. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. v. 12(1), 2016.
- [3] BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fiber reinforced cementitious composites*. 2th ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [4] FIGUEIREDO, A.D. Concreto Reforçado Com Fibras. Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: EPUSP, 2011.
- [5] MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. “Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto”. Revista Matéria, São Paulo, v. 19(2), p. 132-149, 2014.
- [6] SKAZLIĆ, MARIJAN. *Development and Application of Hybrid Fiber Reinforced Concrete*. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, 2010.
- [7] MOGHIMI, GOLNAZ. *Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete*. Eastern Mediterranean University. Gazimağusa, 2014.
- [8] DAWOOD, EETHAR THANON; RAMLI, MAHYUDDIN. *Influence of hybrid fibers on toughness behavior of high Strength flowing concrete*. Archives of Civil Engineering. 2011.
- [9] BANYHUSSAN, QAIS SAHIB; YILDIRIM, GÜRKAN; BAYRAKTAR, ENDER; DEMIRHAN, SERHAT; SAHMARAN, MUSTAFA. *Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content*. 125th ed. Construction and Building Materials. 2016.
- [10] SUN, W.; QIAN, H.; CHEN H. *The effect of the combination of hybrid fibers and expansive agente on the physical properties of cementitious composites*. Journal of the Chinese Ceramic Society. 2000.

- [11] YAO, W.; CAI, J.; CHEN B. *Study of high performance concrete reinforced hybrid fibers*. Journal of Three Gorges University. 2002.
- [12] XU Z. *Technology and Application of Fiber Reinforced Concrete*. China Building Industry Press. Beijing, 2003.
- [13] WANG K.; ZHANG Y.; WANG X. *Effect of smaller volume S-P hybrid fibers on mechanical properties of high performance concrete*. Journal of Harbin Industry of Technology. v. 10, 2003.
- [14] CHEN, BING; LIU, JUANYU. *Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability*. Cement and Concrete Research. v. 35(5), p. 913-917, 2005.
- [15] ESWARI, S; RAGHUNATH, P. N. *Regression modeling for strength and toughness evaluation of hybrid fiber reinforced concrete*. Journal of Engineering and Applied Sciences. v. 6(5), p. 1-8, 2011.
- [16] BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.
- [17] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [18] GLANTZ, S.A. *Primer in Biostatistics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [19] ABNT. NBR 15530: Fibras de aço para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 2007.
- [20] ABNT. NBR NM 248: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [21] ABNT. NBR NM 45: Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [22] ABNT. NBR NM 52: Agregado miúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [23] ABNT. NBR NM 53: Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [24] HELENE, P.R.L.; TUTIKIAN, B.F. "Dosagem dos Concretos de Cimento Portland". In: _____. *Concreto: Ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011.
- [25] ABNT. NBR 12655: Concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2010.

[26] ABNT. NBR NM 67: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

[27] ABNT. NBR 5738: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

[28] ABNT. NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

[29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C293M-16. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*. West Conshohocken: ASTM international, 2016.

[30] ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 2009.