

COMPARAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL: VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO NOS PARÂMETROS DO CONCRETO

Lucas Ramos Dantas ¹
Matheus Fernandes de Araújo Silva ²

RESUMO

Apesar de ser um material amplamente utilizado, a fragilidade do concreto pode afetar consideravelmente a durabilidade do elemento estrutural. A adição de fibras é uma das alternativas para alterar as características frágeis do concreto e prolongar sua vida útil. Entretanto, essa adição pode afetar consideravelmente as propriedades do material. O objetivo do trabalho é comparar propostas analíticas, em relação a parâmetros do concreto e curvas tensão *versus* deformação, com os dados experimentais de ensaios uniaxiais de compressão, verificando as principais divergências e a eficiência das fibras de aço na matriz de cimento. Serão abordados conceitos sobre o comportamento a compressão do concreto comum e com adição de fibras, o funcionamento do mecanismo fibra-matriz, efeitos da duração da carga em ensaios axiais e os modelos matemáticos analíticos propostos na literatura. Os resultados evidenciaram a melhoria do comportamento frágil do concreto para os teores de fibras analisados, mas também alteram parâmetros importantes como resistência a compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Curvas tensão-deformação, Comportamento, Fibras de aço.

INTRODUÇÃO

Visando preencher as deficiências do concreto, incorporou-se fibras de aço como reforço. O comportamento frágil do material foi modificado, fazendo-o se tornar pseudo-dúctil, pois o compósito formado dessa associação apresenta maiores deformações quando submetido aos mesmos estados de carregamento. Em situações que o elemento estrutural corresponde insatisfatoriamente perante suas condições de serviço, é de muita utilidade que a peça deforme o suficiente, antes da ruptura, para que providências possam ser tomadas em tempo hábil, tendo em vista que rupturas bruscas são catastróficas e põem a segurança dos usuários em risco. Outro ponto importante é com relação a durabilidade, a adição de fibras diminui a fissuração, não permitindo que agentes externos agressivos prejudiquem o aço das armaduras e o interior do concreto, aumentando a vida útil da estrutura.

¹ Graduado do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - RN, lucasramosdantas9@gmail.com;

² Professor Orientador: Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - RN, matheus.silva@ufersa.edu.br.

Daí surge a necessidade de se estudar a influência da adição de fibras ao concreto, não apenas em sua característica frágil, mas também no comportamento mecânico do elemento estrutural. De acordo com a porcentagem em relação ao volume da matriz, as adições de fibras podem tanto aumentar a resistência a compressão do concreto, como também prejudicar essa grandeza. Credita-se o decréscimo de resistência ao teor de ar incorporado a mistura ou a adição de mais água para garantir boa trabalhabilidade

O presente estudo teve como base os resultados experimentais contidos no trabalho de SILVA (2018). Foram pesquisadas curvas analíticas de tensão versus deformação e parâmetros de projeto na literatura e comparados aos resultados experimentais citados. O foco do trabalho será o comportamento à compressão de concretos com adição de fibras de aço.

Dessa forma, a pesquisa tem como objetivo verificar a influência da adição de fibras de aço nos parâmetros do concreto, deformação de pico, módulo de elasticidade e resistência a compressão. Para isto, foi necessário pesquisar no meio técnico parâmetros de projeto e diagramas tensão versus deformação, comparar os propostos teóricos com o dados experimentais obtidos por SILVA (2018) e revisar sobre o comportamento mecânico a compressão do concreto com e sem fibras de aço.

Verificou-se, para os corpos de prova dosados para uma resistência maior, influência significativa na propriedade principal do concreto, com redução da tensão de pico. Já para resistências menores, não houve alteração sensível desse parâmetro. Com relação a deformação de pico, foi possível constatar um aumento dessa grandeza em função do teor de fios. Já o módulo de elasticidade é inversamente proporcional ao percentual de adição, com exceção do grupo 2, em que o elemento com 0,50% teve o menor valor entre os demais do mesmo grupo de dosagem.

METODOLOGIA

Inicialmente, Realizou-se uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de obter estas curvas analíticas de tensão *versus* deformação propostas por autores e referencias normativas, como: CEB-FIP (Comité Euro-International du Béton – Fédération Internationale du Béton) e CEN (European Committee for Standardization), por exemplo. As equações propostas por estas instituições podem ser consultadas no material proposto por SHEHATA, Ibrahim e SHEHATA, Lidia (2016).

Após a pesquisa bibliográfica, foi feita uma síntese e organização dos dados experimentais. SILVA (2018) rompeu 18 corpos de prova em ensaios uniaxiais de compressão, seguindo as recomendações da NBR 5739:2007. Por haver divergências entre os resultados, foi executado a média aritmética entre os exemplares sob as mesmas condições de dosagem, esses valores estão exibidos na Tabela 1

Tabela 1 – Grupos de dados.

Grupo 1	Grupo 2
$f_{cm} = 48,35$ MPa Teor de Fibras = 0,00%	$f_{cm} = 60,16$ MPa Teor de Fibras = 0,00%
$f_{cm} = 47,31$ MPa Teor de Fibras = 0,50%	$f_{cm} = 54,02$ MPa Teor de Fibras = 0,50%
$f_{cm} = 46,60$ MPa Teor de Fibras = 0,75%	$f_{cm} = 52,67$ MPa Teor de Fibras = 0,75%

Fonte: DANTAS (2017).

Os resultados foram divididos em grupo 1, de menor resistência e grupo 2, de maior resistência. A Tabela exhibe esses dados, divididos por grupo e caracterizados de acordo com a resistência média a compressão e o teor de fibras incorporado na mistura, 0,00% (concreto simples), 0,50% e 0,75%.

Desses resultados, extraiu-se parâmetros importantes, como a resistência média a compressão, a deformação referente a tensão máxima e o módulo de elasticidade inicial, calculado utilizando o trecho ascendente do diagrama até 30% da tensão máxima, representando o concreto antes do estágio de fissuração. Em seguida foram comparados com as propostas analíticas.

Com o intuito de comparar e verificar a variabilidade dos resultados, foi calculado o erro percentual entre o valor teórico (analítico) e o valor experimental, de acordo com a equação (1).

$$\text{Erro \%} = \frac{\text{Experimental} - \text{Teórico}}{\text{Teórico}} \times 100 \quad (1)$$

Por fim, foram aplicados os resultado experimentais nas equações analíticas e construídos gráficos de tensão *versus* deformação, com isso, foi possível analisar o efeito da adição das fibras de aço nas resistência a compressão do concreto.

DESENVOLVIMENTO

Os compósitos são materiais constituídos de uma matriz e um reforço em forma de fibras. No caso do concreto com adição de fibras de aço, tem-se uma matriz a base de cimento, também chamada de matriz cimentícia, reforçada com a incorporação de fibras de aço, dispostas aleatoriamente.

O objetivo principal da adição de fibras não é o de aprimorar o comportamento a compressão do concreto. O foco é melhorar o seu comportamento frágil. Entretanto, o desempenho frente as solicitações de compressão podem ser alteradas pela incorporação dos fios de aço e por ser a mais importante característica do concreto, sendo seu controlador de qualidade, fica evidente a importância de se estudar o quanto esse fator é alterado.

Segundo BASTOS (1999), para baixos teores volumétricos de fibras, há um efeito pequeno na resistência a compressão, com mínima variabilidade entre os resultados. Já para teores maiores, o ganho de resistência e tenacidade é considerável. Essa relação é ilustrada na Figura .

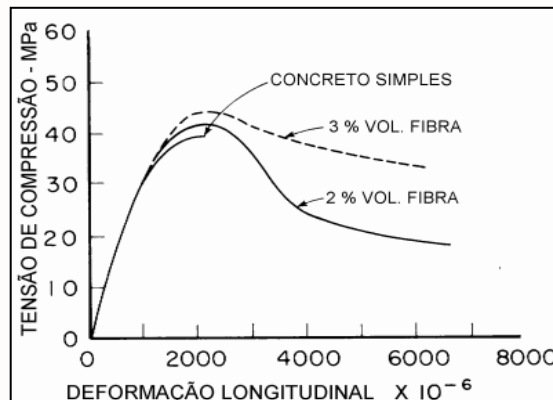


Figura 1 – Efeito da adição de fibras de aço
Fonte: BASTOS (1999)

Ao observar a Figura , percebe-se uma modificação no comportamento frágil do concreto simples, tornando-se um material pseudo-dúctil, pois apresenta maior energia de deformação.

Com relação ao comportamento do concreto a compressão, BARROS (2009) relata que há uma sensível alteração de sua tensão última devido à adição de fibras, variando ente 0 a 15% para frações volumétricas superiores a 1,5%.

GÓIS (2010) afirma que, na literatura, muitos trabalhos evidenciam um aumento pouco considerável na resistência a compressão do concreto devido a adição de fibras de aço,

mas cita experimentos realizados por Williamson, juntamente com a ACI.544.4R-88, em 1974, onde constataram acréscimo de 23% na resistência para uma fração volumétrica de 2%, agregado graúdo de 19mm e fator de forma 100. O autor também relata o observado por Fannella and Naaman (1985), onde as características do diagrama tensão-deformação permanecem quase inalteradas, com mudanças consideráveis na inclinação da parte descendente da curva, trazendo benefícios para o comportamento a compressão do material compósito, pois previne a ruptura brusca e explosiva.

JUNIOR (2012) expõe os resultados de BALAGURU e SHAH (1992) para concretos com 120kg/m³ de fibras, aproximadamente 1,5%, com variação de 25% na resistência a compressão, tanto para um ganho, como para uma perda. O autor também cita o trabalho de SONG e HWANG (2004) em que os resultados mostraram um aumento de 15,3% para uma adição de 1,5% de fios e 12,9% em relação a um acréscimo de 2%, utilizando fibras com gancho nas extremidades.

As proporções de fibras, em relação ao volume de concreto, abaixo de 2%, não induzem melhorias significativas na resistência a compressão do compósito, podendo até diminuí-la (GÓIS, 2010).

É declarado por FIGUEIREDO (2000) que a adição pode até piorar a resistência do material, diminuindo a tensão última devido um processo deficiente de compactação. JÚNIOR (2012) também contribui: “Credita-se a diminuição da resistência à compressão ao aumento do teor de ar incorporado ao concreto, o que, aparentemente, provocaria uma redução na resistência à compressão superior ao aumento de resistência produzido pelas fibras”. Já GÓIS (2010) cita que o acréscimo de água para garantir uma boa trabalhabilidade, perdida em parte pela adição dos fios, também pode ser responsável por esse decréscimo de resistência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A CEB-FIP propôs na Model Code 1990, conhecida por MC90, um modelo matemático constitutivo visando abranger concretos de f_{ck} até 80MPa. As equações referentes a esse modelo podem ser encontradas em Ibrahim SHEHATA e Lidia SHEHATA (2016)

É fixado o valor de 2,2‰ para a deformação referente a tensão máxima (ϵ_{co}), independente da resistência média a compressão, fato que não se repete nos resultados

experimentais. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam os valores de deformação de pico obtidos experimentalmente em comparação ao proposto.

Tabela 2 – Deformações de pico, grupo 1 (G01) e grupo 2 (G02)

Exemplar G01	ϵ_{co} Ensaio	ϵ_{co} Analítico	Erro %	Exemplar G02	ϵ_{co} Ensaio	ϵ_{co} Analítico	Erro %
48,35 MPa 0,00%	2,603 ‰	2,200 ‰	18,32 %	60,16 MPa 0,00%	2,596 ‰	2,200 ‰	18,00 %
47,31 MPa 0,50%	2,770 ‰		25,91 %	54,02 MPa 0,50%	2,655 ‰		20,68 %
46,60 MPa 0,75%	2,632 ‰		19,64 %	52,67 MPa 0,75%	2,627 ‰		19,41 %

Fonte: Adaptado de DANTAS (2017).

Analisando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível notar que a deformação de pico experimental varia em função da resistência média a compressão, diferindo-se do estabelecido pelo MC90. Percebe-se que os valores experimentais são maiores que os analíticos. Com relação a adição de fibras, é notável que f_{cm} diminui com o aumento da porcentagem de fios. Além disto, vale destacar que a adição de 0,50% de acarretou em um maior valor de ϵ_{co} , em relação ao concreto simples e ao exemplo com 0,75% de fibras de aço em relação ao volume de concreto, tanto para o grupo 1, como para o grupo 2.

O MC90 propôs uma expressão para E_{ct} , módulo de elasticidade inicial, também denominado de tangente. A equação foi elaborada para concreto composto por agregado graúdo de quartzito e para casos em que sejam utilizados basalto, calcário e arenito, deve-se multiplicar a expressão por 1,2, 0,9, 0,7, respectivamente. Como os exemplares ensaiados por SILVA (2018) foram moldados com agregados de basalto, os módulos de elasticidade resultantes foram multiplicados por 1,2. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** contém os resultados analíticos e experimentais, correspondentes a cada exemplar.

Tabela 3 – Módulo de Elasticidade MC90, grupo 1 (G1) e grupo 2 (G2).

Exemplar G1	E_{ct} Ensaio	E_{ct} Proposto	Erro %	Exemplar G2	E_{ct} Ensaio	E_{ct} Proposto	Erro %
48,35 MPa 0,00%	34620,33 MPa	43397,17 Mpa	20,22 %	60,16 MPa 0,00%	41187,33 MPa	46645,18 Mpa	11,70 %
47,31 MPa 0,50%	33882,67 MPa	43088,18 Mpa	21,36 %	54,02 MPa 0,50%	36771,33 MPa	45016,27 Mpa	18,31 %
46,60 MPa 0,75%	32409,33 MPa	42874,52 Mpa	24,41 %	52,67 MPa 0,75%	40116,33 MPa	44642,31 Mpa	10,13 %

Fonte: Adaptado de DANTAS (2017).

Observa-se, para os resultados referentes as amostras do grupo 1, erros acima dos 20%, inclusive o concreto desprovido de fibras de aço. É perceptível, nesse caso, que o aumento do teor de fibras gerou uma redução no módulo de elasticidade, causando divergências maiores entre os dados calculados e experimentais. Já para o grupo 2, o mesmo padrão não foi observado nos valores de ensaio. O exemplo com adição de 0,50% de fibras teve o menor módulo de elasticidade o maior erro percentual, 18,31%.

A partir dos resultados experimentais correspondentes ao grupo 1, foram geradas curvas analíticas a partir das equações propostas pelo MC90 para deformações específicas de até 6 %, Figura .

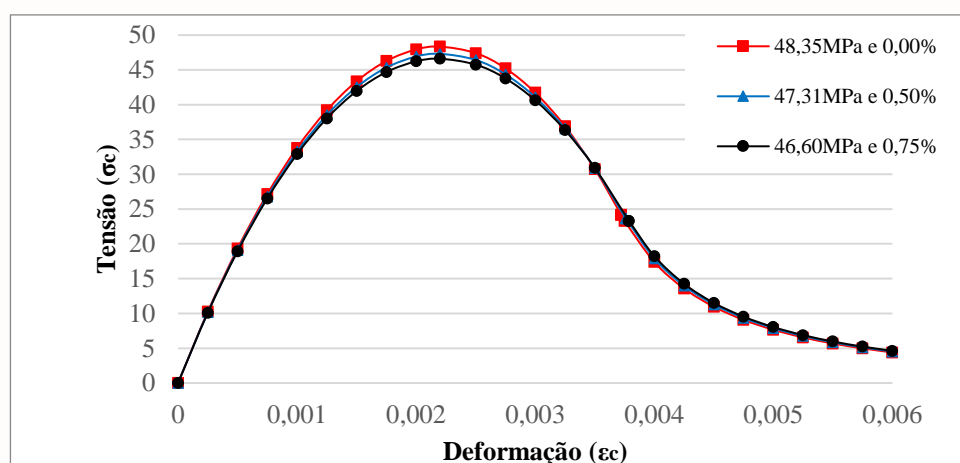


Figura 2 – Diagramas tensão *versus* deformação do MC90 para grupo 1
Fonte: DANTAS (2017)

Examinado os diagramas da Figura é notável pouca variabilidade entre os resultados. O concreto simples tem maior tensão de pico, que vai reduzindo com o teor de aço, confirmando o que muitos autores afirmaram.

O mesmo procedimento foi repetido para o grupo 2 e as curvas constitutivas podem ser observados na Figura para deformações variando de 0 até 6 % e suas respectivas tensões.

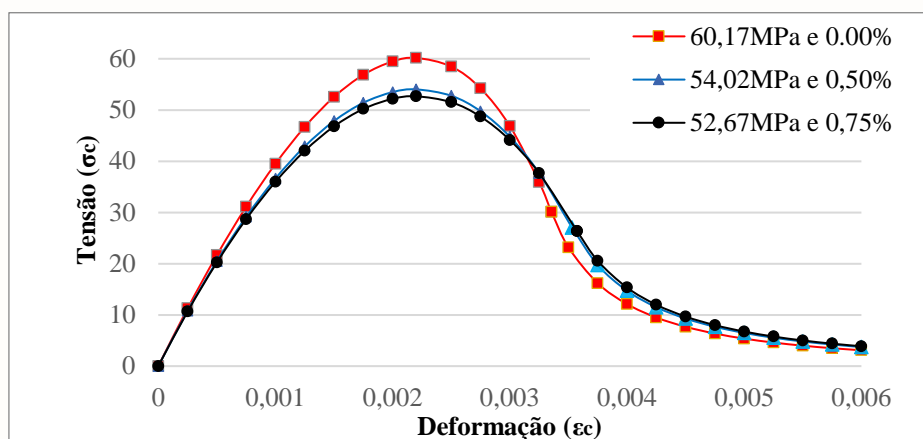


Figura 3 – Diagramas tensão *versus* deformação do MC90 para o Grupo 2.
Fonte: DANTAS (2017)

Nesse caso, para o grupo 2, de maior resistência, percebe-se melhor a influência da incorporação de fios de aço no diagrama. Houve uma redução significativa de resistência e uma pequena elevação do ramo ascendente, em comparação ao concreto simples. Em relação ao teor de 0,5%, a percentagem de 0,75% trouxe alterações poucos significativas.

Em 1995, no boletim CEB 228, foram propostas modificações para algumas expressões do MC90 para agregar concretos de f_{ck} até 100MPa.

O MC90 estabeleceu que a deformação de pico seria sempre o mesmo valor, 2,2‰. No entanto, os ensaios mostram que há dependência direta com resistência média a compressão do material e essa foi uma das modificações do boletim CEB 228. Uma comparação entre os experimentos e os valores analíticas estão expostos nas Tabela 4.

Tabela 4 – Deformações de pico CEB228, grupo 1 (G1) e grupo 2 (G2).

Exemplar G1	ϵ_{co} Ensaio	ϵ_{co} Proposto	Erro %	Exemplar G2	ϵ_{co} Ensaio	ϵ_{co} Proposto	Erro %
60,16MPa 0,00%	2,596 ‰	2,493 ‰	4,13 %	48,35MPa 0,00%	2,603 ‰	2,329 ‰	11,76 %
54,02MPa 0,50%	2,655 ‰	2,411 ‰	10,12 %	47,31MPa 0,50%	2,770 ‰	2,314 ‰	19,71 %
52,67MPa 0,75%	2,627 ‰	2,392 ‰	9,82 %	46,60MPa 0,75%	2,632 ‰	2,303 ‰	14,29 %

Fonte: Adaptado de DANTAS (2017).

Os valores analíticos de deformação de pico são proporcionais a resistência média a compressão. As alterações do CEB 228 aproximaram os dados propostos e experimentais, reduzindo o erro associado. A incorporação de fibras eleva ϵ_{co} , destacando-se a percentagem de 0,5%.

A equação de módulo de elasticidade inicial também sofreu alterações, onde os cálculos dessa grandeza estão expostos na Tabelas 55. Da mesma forma como já mencionado, os valores finais foram multiplicados por 1,2, pois os agregados utilizados na moldagem foram de origem basáltica.

Tabela 5 – Módulos de Elasticidade CEB 228, grupo 1.

Exemplar G1	E_{ct} Ensaio	E_{ct} Proposto	Erro %	Exemplar G2	E_{ct} Ensaio	E_{ct} Proposto	Erro %
48,35MPa 0,00%	34620,33 MPa	42355,96 Mpa	18,26 %	60,16MPa 0,00%	41187,33 MPa	45228,31 Mpa	8,94 %
47,31MPa 0,50%	33882,67 MPa	42081,71 Mpa	19,48 %	54,02MPa 0,50%	36771,33 MPa	43790,15 Mpa	16,03 %
46,60MPa 0,75%	32409,33 MPa	41891,97 Mpa	22,64 %	52,67MPa 0,75%	40116,33 MPa	43459,32 Mpa	7,69 %

Fonte: Adaptado de DANTAS (2017).

Os comentários feitos para as Tabelas 3 são válidos neste caso. Entretanto, os resultados experimentais e analíticos ficaram mais próximos, com menor erro, devido as alterações do CEB 228.

A EN 1992-1-1 (2004), Eurocode 2, publicou um modelo de curvas tensão *versos* deformação para concretos de f_{ck} até 90 MPa. A expressão para o ramo ascendente é a mesma recomendada no MC90. Já a deformação de pico é igual ao proposto no CEB 228, mas com um limite superior determinado. No entanto, a Eurocode propõe um módulo elasticidade secante, é relativo à tensão de 40% de f_{cm} e é idêntica ao módulo tangente na origem sugerido no CEB 228. A principal diferença entre as sugestões da EN e as demais citadas anteriormente, é fato de existir uma deformação última, representando a ruptura do material, que depende de f_{ck} e f_{cm} .

Na Figura 4 é ilustrado curvas elaboradas a partir das sugestões do EN 1992-1-1, em 2004, utilizando os dados do grupo 1.

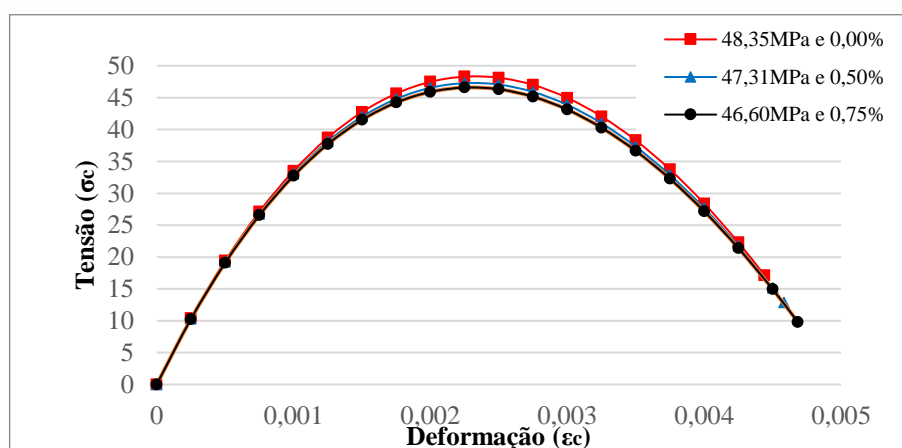


Figura 4 – Diagramas para grupo 1, EN 1992-1-1
Fonte: DANTAS (2017)

O diagrama é semelhante ao exposto na Figura 2, diferindo-se apenas por apresentar uma deformação última, de forma que os comentários feitos anteriormente são válidos para esse caso.

O mesmo procedimento foi repetido, mas agora para o grupo 2. Os resultados podem ser observados na Figura .

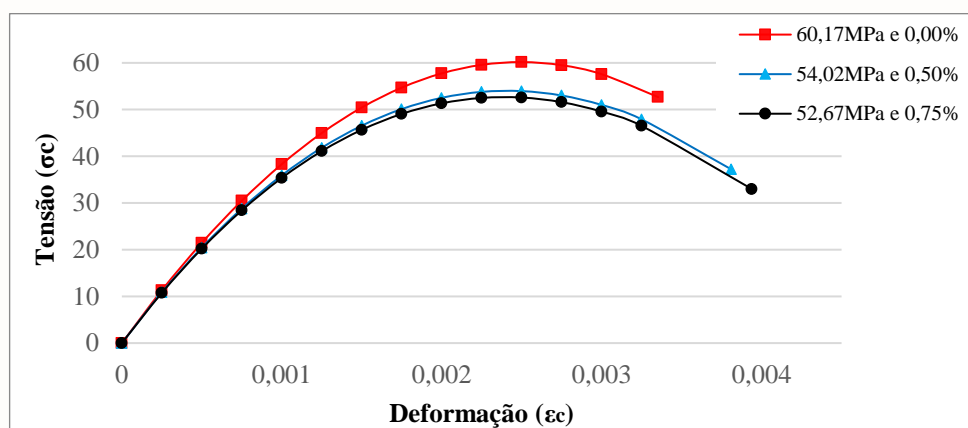


Figura 5 – Diagramas para grupo 2, EN 1992-1-1
Fonte: DANTAS (2017)

As características da Figura 5 são as mesmas da Figura 3, com exceção da deformação última. É nítido, ao analisar a Figura 4.4, que os exemplares com adição de fibras têm maiores deformações últimas, com alteração mínima entre 0,50% e 0,75.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propostas analíticas das referências internacionais e nacionais foram elaboradas para corpos de prova de concreto, sem adições de fibras de aço, logo, espera-se

que os erros percentuais, para as amostras com essas características, sejam menores que os demais. Considerando as deformações de pico e o módulo de elasticidade, a proposta do MC90 apresentou maiores divergências entre análise analítica e experimental. Com a chegada do CEB228, o erro percentual reduziu com os ajustes propostos. A Eurocode recomenda as mesmas equações, com diferencial de estabelecer uma deformação última.

Analisando os dados experimentais de deformação de pico, Tabelas 2 e 4, verifica-se os valores correspondentes aos exemplares com adição de fibras são maiores em relação ao concreto simples, evidenciando o efeito benéfico no comportamento frágil do material, tendo em vista que o corpo de prova deformou-se mais até atingir a tensão máxima. Destaca-se o teor de fibras de 0,50%, pois retornou resultados mais elevados de deformação de pico.

Ao examinar o diagrama da Figura 2, referente aos experimentos do grupo 1, dosado para uma resistência menor, fica claro que a adição de fibras não afetou significativamente a resistência a compressão do material. Já para as curvas da Figura 3, do grupo 2, observou-se redução considerável de tensão de pico, logo, para concretos de resistência elevados com adição de fibras, deve-se atentar para a redução de sua resistência. Os dois teores estudados tiveram, basicamente, os mesmo resultados.

Diante das discussões e dos resultados apresentados, propõe-se, para estudos futuros, a realização de mais ensaios nas condições apresentadas nesta pesquisa, com o intuito de comparar e corroborar com as conclusões propostas. Em outra perspectiva, pode-se elaborar experimentos com outros teores de fibras, para se ampliar o universo de estudo desse tipo de material compósito.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova**. Rio de Janeiro, p. 09. 2015.

BARROS, Alexandre Rodrigues de. **Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensáveis Reforçado com Fibras de Aço**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Análise Experimental de Dormentes de Concreto Protendido Reforçados com Fibras de Aço**. 1999. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DANTAS, Lucas Ramos. **Comparação analítica e experimental: Parâmetros de projeto e curvas tensão versus deformação para o concreto com fibras de aço.** 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2017.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto com Fibras de Aço.** 2000. 69 f. - Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GÓIS, Fernanda Alves Pinto. **Avaliação Experimental do Comportamento de Concreto Fluido Reforçado com Fibras de Aço: Influência do Fator de Forma e da Fração Volumétrica das Fibras nas Propriedades Mecânicas do Concreto.** 2010. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

JÚNIOR, Luiz Álvaro de Oliveira. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análise estática e dinâmica.** 2012. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SHEHATA, Ibrahim e SHEHATA, Lidia. **Curvas Tensão Normal de Compressão-Deformação Específica Para Concretos de Diferentes Resistências,** Notas de aula, Concreto armado, 2016, departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica/UFRJ.

SILVA, M.F.A. (2018), **Estudo da interação flexão-cisalhamento em vigas de concreto armado com adição de fibras de aço.** São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.