

Influence of steel fibers and mineral additions on cracking behavior of reinforced concrete tension members

Influência das fibras de aço e das adições minerais na fissuração de tirantes de concreto armado

L. A. OLIVEIRA JÚNIOR ^a
lualvaro@sc.usp.br

D. L. ARAÚJO ^b
dlaraujo@eec.ufg.br

R. D. TOLÉDO FILHO ^c
toledo@labest.coc.ufrj.br

E. M. R. FAIRBAIRN ^d
eduardo@coc.ufrj.br

M. A. S. ANDRADE ^e
masa@furnas.com.br

Abstract

In this work the influence of steel fibers and mineral additions (silica fume and fly-ash) on cracking behavior of reinforced concrete tension members was investigated. Hooked-end steel fibers with aspect ratio of 65 were used in volumes of 0.75%, 1.00% e 1.50%. Sixteen tension tests were performed in tension members 800 mm long with square cross section of 150 mm of side reinforced with single bar of CA-50 steel with diameter of 20 mm for determining crack widths. The results showed that steel fibers reduced the average crack width up to 75% and mineral additions improved cracking behavior of concrete. Crack widths were compared with suggested values by Brazilian, American and European recommendations, which were unsuitable for estimating crack width in steel fiber reinforced concrete.

Keywords: *tension specimen, reinforced concrete, steel fiber, cracking behavior, silica fume, fly-ash.*

Resumo

Neste trabalho é investigada a influência das fibras de aço e das adições minerais (sílica ativa e cinza volante) na fissuração de tirantes de concreto armado. Fibras de aço com gancho nas extremidades e relação de aspecto igual a 65 foram usadas nas frações volumétricas de 0,75%, 1,00% e 1,50%. Dezesesseis tirantes de 800 mm de comprimento e seção transversal quadrada de 150 mm de lado reforçados com uma barra de aço CA-50 de 20 mm de diâmetro foram submetidos à tração axial para determinação das aberturas das fissuras. Os resultados mostraram que as fibras reduziram a abertura média de fissuras em até 75% e que as adições minerais melhoraram o comportamento do concreto na fissuração. As aberturas de fissuras foram comparadas aos valores sugeridos pelas recomendações das normas brasileira, americana e europeia, que se mostraram inadequadas para estimar a abertura de fissuras em concretos reforçados com fibras.

Palavras-chave: *tirante, concreto armado, fibras de aço, fissuração, sílica ativa, cinza volante.*

^a Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, lualvaro@sc.usp.br, Av. Trabalhador Sancarlenense, n. 400, São Carlos, SP, Brasil;

^b Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, dlaraujo@eec.ufg.br, Av. Universitária s/n, Praça Universitária, Goiânia, GO, Brasil.

^c Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Centro de Tecnologia, Bloco B, toledo@labest.coc.ufrj.br, Caixa Postal 68506, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

^d Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Centro de Tecnologia, Bloco B, eduardo@coc.ufrj.br, Caixa Postal 68506, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^e Furnas Centrais Elétricas, Departamento de Apoio e Controle Técnico, Laboratório de Concreto, BR 153, km 1290, CEP 74001-970, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil.

1. Introdução

A fissuração é um fenômeno não linear que ocorre nas estruturas de concreto simples e armado e que pode comprometer a durabilidade e a utilização dessas estruturas. Conseqüentemente, após a fissuração o material mostra um comportamento não linear que se intensifica com o aumento da força aplicada.

No concreto simples, quando a resistência à tração é alcançada, surgem fissuras que levam o material ao colapso, o que ocorre pelo amolecimento do concreto. Entretanto, quando fibras são adicionadas ao concreto, o material apresenta maiores deformações antes da ruptura e dissipa quantidades maiores de energia neste processo. Nos concretos reforçados com fibras, estas concentram tensões nos pontos de contato entre a fibra e a matriz, reduzindo a concentração de tensões na ponta da fissura e, conseqüentemente, a velocidade de propagação das fissuras, melhorando assim o processo de controle da fissuração.

A fissuração no concreto depende do número de fissuras ativas para dissipar a energia de fraturamento. De acordo com Noghabai [1], além das fissuras visíveis, fissuras internas também podem ser ativas e contribuir para a dissipação da energia de fraturamento. No concreto simples, somente as fissuras dissipam a energia de fraturamento. Entretanto, nos concretos com fibras, a energia dissipada pelas fissuras deve ser somada a energia dissipada no processo de arrancamento das fibras. Desta forma, a energia liberada na fissuração do concreto reforçado com fibras é sempre maior que a energia liberada na fissuração do concreto simples. Esta diferença na quantidade de energia dissipada está relacionada ao modo de ruptura de ambos os materiais: ruptura frágil para o concreto simples e ruptura dúctil para o concreto reforçado com fibras.

De acordo com Ezeldin e Balaguru [2], as fibras também melhoram a aderência entre aço e concreto, tanto sob cargas monotônicas quanto cíclicas, particularmente após a ocorrência de fissuras. Em concretos contendo sílica ativa e cinza volante, estas adições tendem a melhorar ainda mais a aderência na interface aço-concreto, reduzindo as fissuras de fendilhamento que ocorrem em função de tensões elevadas aplicadas pelas nervuras das barras da armadura.

Outro aspecto importante diz respeito ao efeito da presença de adições minerais com atividade pozolânica no concreto, sobretudo a sílica ativa. Tais adições, por meio de vários mecanismos que não serão des-

critos aqui por não fazerem parte do escopo deste trabalho, tendem a tornar o concreto menos poroso e, portanto, mais denso e resistente. A este fenômeno está associado o aumento da fragilidade da matriz, que se torna mais quebradiça, apesar da maior resistência. Contudo, é sabido da Literatura Técnica que em matrizes de alta resistência a incorporação de fibras tem efeitos ainda mais benéficos que em matrizes de resistência normal, principalmente no que diz respeito à capacidade de absorção de energia e controle da fissuração.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência das fibras de aço e das adições minerais na fissuração do concreto armado.

1.2 Justificativa

Este trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa que visa a utilização de fibras de aço em caixas espirais de usinas hidrelétricas e se justifica pela necessidade de restringir a níveis além daqueles praticados nas obras civis o processo de fissuração em estruturas desse tipo. Neste sentido, as fibras de aço surgem como uma saída para o problema da fissuração, haja vista a sua grande capacidade de retardar o surgimento e a propagação das fissuras no concreto. Ainda, a utilização de adições minerais em substituição de parte do cimento, em particular aquelas com elevada atividade pozolânica, reduz o custo total do concreto, pois são materiais mais baratos que o cimento.

2. Programa experimental

2.1 Materiais

Nesta investigação, duas matrizes típicas foram produzidas: matriz de cimento Portland sem adições minerais e matriz de cimento Portland com adição de 10% de sílica ativa e 30% de cinza volante, ambas com resistência alvo de 40 MPa aos 28 dias. Na produção dessas matrizes foram empregados cimento Portland de alto forno resistente a sulfatos (CP III 40 RS), agregado graúdo de origem granítica com dimensão máxima de 25 mm, areia natural com dimensão máxima de 4,75 mm,

Tabela 1 - Composição dos concretos com e sem adições minerais (kg/m³)

Composição	Sem adições minerais					Com adições minerais				
	0,00%	0,00%*	0,75%	1,00%	1,50%	0,00%	0,00%*	0,75%	1,00%	1,50%
Cimento	439,05	436,83	425,68	428,69	423,01	261,46	265,24	260,84	259,40	256,53
Sílica ativa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,74	32,20	31,67	31,49	31,15
Cinza volante	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,43	101,88	100,19	99,64	98,54
Areia	870,10	873,67	849,37	857,38	846,02	871,53	884,13	869,46	864,66	855,11
Brita	870,10	873,67	849,37	857,38	846,02	871,53	884,13	869,46	864,66	855,11
Água	173,50	172,70	167,24	168,82	166,58	172,28	174,77	171,20	170,25	168,37
Fibra	0,00	0,00	58,87	78,50	117,75	0,00	0,00	58,87	78,50	117,75
Aditivo	3,29	3,28	4,25	4,29	4,23	3,27	3,32	4,35	4,32	4,28

*Segunda concretagem.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos concretos estudados

Matriz	V _f (%)	f _{cm} (MPa)	f _{ctm,sp} (MPa)	E _{cm} (GPa)
		NBR 5739 (4)	NBR 7222 (5)	NBR 8522 (6)
Sem adições minerais	0,00	44,37	4,20	52,95
	0,75	56,90	6,15	38,93
	1,00	45,48	6,12	62,13
	1,50	52,17	8,28	52,37
Com adições minerais	0,00	41,40	4,25	49,82
	0,75	44,37	4,73	44,90
	1,00	42,63	6,48	49,90
	1,50	49,90	7,09	69,10

água, aditivo superplastificante de terceira geração Glenium 3010, sílica ativa e cinza volante, ambas com atividade pozolânica constatada experimentalmente por Oliveira Júnior [3]. Nesses concretos, a relação água/cimento foi fixada em 0,40, embora para os concretos com adições minerais a relação água cimento tenha sido calculada em relação ao cimento equivalente, isto é, uma mistura de materiais cimentícios que possui a mesma massa específica que o cimento. A trabalhabilidade do concreto fresco foi controlada pela adição de 1,00% de aditivo superplastificante, exceto nos concretos sem fibras, nos quais a quantidade de aditivo adicionada foi de 0,75%. Aos concretos com e sem adições minerais foram adicionadas fibras de aço com ganchos nas extremidades do tipo DRAMIX RC 65/60 BN. As fibras possuíam 60 mm de comprimento e 0,92 mm de diâmetro e apresentavam resistência à tração igual a 1000 MPa e módulo de elasticidade igual a 200 GPa. As fibras foram empregadas em volumes de 0,75% (58,8 kg/m³), 1,00% (78,5 kg/m³) e 1,50% (117,8 kg/m³). A Tabela 1 apresenta a composição dos concretos empregados na moldagem dos tirantes. A Tabela 2 apresenta os valores médios das resistências à compressão e à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade dos traços empregados na confecção dos tirantes. Estes valores foram obtidos considerando resultados de duas concretagens distintas.

2.2 Concretagem e armazenamento dos corpos-de-prova

Os concretos sem fibras (concretos de referência) foram produzidos

em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 200 L enquanto os concretos reforçados com fibras foram produzidos em betoneira de eixo vertical com mistura forçada com capacidade de 500 L. A concretagem foi realizada com condições de temperatura e umidade controladas. Após o lançamento do concreto nas fôrmas foi feito o seu adensamento utilizando um vibrador de imersão. Os corpos-de-prova permaneceram na sala de dosagem sob as mesmas condições de temperatura e umidade em que o concreto foi produzido e lançado até o endurecimento. Depois disto, os corpos-de-prova foram transportados para a câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio, quando o concreto atingiu 28 dias com umidade mínima de 95% e temperatura em torno de 20 °C.

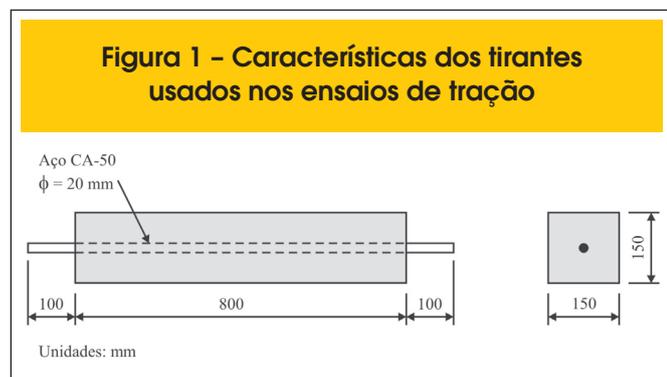
2.3 Tirantes

Dezesseis tirantes foram produzidos para ensaios de tração. Eles possuíam 800 mm de comprimento e seção transversal quadrada com 150 mm de lado (ver Figura 1). Eram armados com uma única barra de aço CA-50 com 20 mm de diâmetro, 494 MPa de tensão de escoamento e 210 GPa de módulo de elasticidade.

2.4 Procedimento de ensaio

Os tirantes foram ensaiados em uma máquina universal servo-hidráulica com controle de deslocamentos. A taxa de deslocamento adotada no ensaio foi de 0,30 mm/min. Durante os ensaios, a abertura das fissuras foi medida por um fissurômetro com precisão de 0,02 mm. A abertura de fissura foi medida em intervalos de 10 kN e a cada nova fissura formada. Em cada medida, a abertura de todas as fissuras era medida em vários pontos de uma determinada fissura, sendo então determinada a abertura média para cada fissura. A análise foi feita com a abertura média da fissura principal, isto é, a fissura de maior abertura. O ensaio foi conduzido até uma força de 200 ± 5 kN.

Figura 1 – Características dos tirantes usados nos ensaios de tração

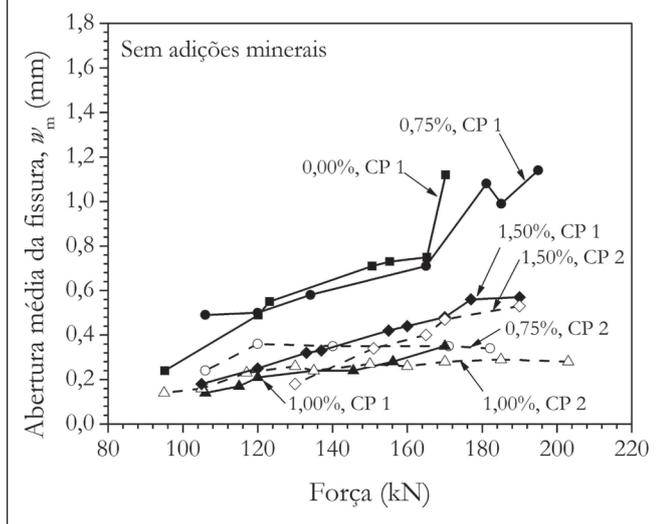


3. Resultados e discussões

3.1 Abertura de fissuras

Na Figura 2 são apresentados os valores médios da abertura da fissura principal, medidos em tirantes com diferentes volumes de

Figura 2 – Abertura média da fissura principal para os traços sem adições minerais



fibras e sem adições minerais, em função da força resistida pelo tirante. A máxima abertura de fissura medida foi de 1,12 mm para tirantes sem adições minerais e de 1,56 mm para tirantes com adições minerais.

A abertura máxima da fissura observada no final do ensaio variou de 0,28 mm a 1,14 mm em função do volume de fibras presentes na matriz. Essa variação corresponde a reduções de até 75% em comparação com a abertura máxima da fissura medida em tirantes de concreto simples. Foi observado que a fissuração diminuiu com o aumento do volume de fibras, como esperado, devido ao melhor controle do processo de fissuração proporcionado pelas fibras quando estas são adicionadas em volumes elevados. O tirante CP1 do concreto reforçado com 0,75% de fibras mostrou aumento considerável da abertura de fissuras. Entretanto, foi um caso isolado, uma vez que o tirante CP2 do mesmo concreto mostrou resultados satisfatórios.

A Figura 3 mostra a abertura média da fissura principal, medida em tirantes de concreto com adições minerais, em função da força resistida pelo tirante. A abertura máxima das fissuras variou de 0,36 mm a 0,87 mm em função do volume de fibras, o que representa uma redução de 77% na abertura das fissuras em relação ao valor médio obtido para o concreto simples. Os valores obtidos mostraram alta dispersão, mas, em geral, a abertura das fissuras diminuiu com o aumento do volume de fibras.

É importante enfatizar que a trajetória seguida pela fissura é aleatória e que os valores medidos da abertura de fissuras não foram medidos no mesmo ponto. Os valores apresentados nestas figuras estão relacionados à média das leituras feitas em vários pontos da fissura (preferencialmente nos cantos), o que significa que a abertura de fissuras não é uniforme ao longo de sua trajetória, sobretudo nos concretos com fibras.

Durante a concretagem, a armadura pode sofrer pequenos desvios em relação à sua posição inicial, seja pelo lançamento de concreto no interior da fôrma seja pela vibração. Os efeitos das excentricidades provocadas por esses pequenos desvios se tor-

nam significativos quando a força atinge valores elevados, gerando tensões de flexão no tirante. A ocorrência de flexo-tração nos tirantes justifica as reduções de abertura de fissuras para determinados níveis de carregamento.

A vibração também pode influenciar os valores de abertura de fissuras em tirantes de concreto armado reforçado com fibras ao afetar a distribuição de fibras na matriz. Soroushian e Lee [7] investigaram a variação do número de fibras por unidade de área na seção transversal e concluíram que as fibras se concentram mais na base da fôrma que nas regiões próximas à superfície do concreto. A partir da superfície para a base, o fator de orientação das fibras, de acordo com Soroushian e Lee [7], aumentou em 28%. Entretanto, este aumento não teve efeito estatístico significativo no número de fibras por unidade de área. Apesar desse fato, Soroushian e Lee [7] concluíram que a vibração parece alterar o fator de orientação das fibras, tendendo a orientá-las em planos horizontais.

A despeito da dispersão observada nas leituras de abertura de fissuras e dos fatores que podem influenciar a leitura, nota-se facilmente nas Figuras 2 e 3 que a adição de fibras reduziu significativamente a abertura de fissuras. Comparando o limite máximo de abertura de fissuras estabelecido pela NBR 6118 [8] de 0,40 mm para estruturas em ambiente de agressividade classe I, observa-se que para o concreto simples, este limite foi alcançado para uma força ligeiramente maior que a força de primeira fissura. Em tirantes de concreto reforçado com fibras, esse limite foi alcançado para forças próximas da força de escoamento e, em alguns casos, nem foi alcançado.

Os valores experimentais da abertura média da fissura principal foram comparados aos valores calculados pelas recomendações da NBR 6118 [8], do ACI 224R [9] e do Eurocode 2 [10]. Das Figuras 4 a 6 é mostrada uma comparação gráfica entre os valores experimentais e obtidos dessas recomendações. Foram empregados, nas expressões das recomendações, a resistência à tração e o módulo de elasticidade obtidos experimentalmente para cada

Figura 3 – Abertura média da fissura principal para os traços com adições minerais

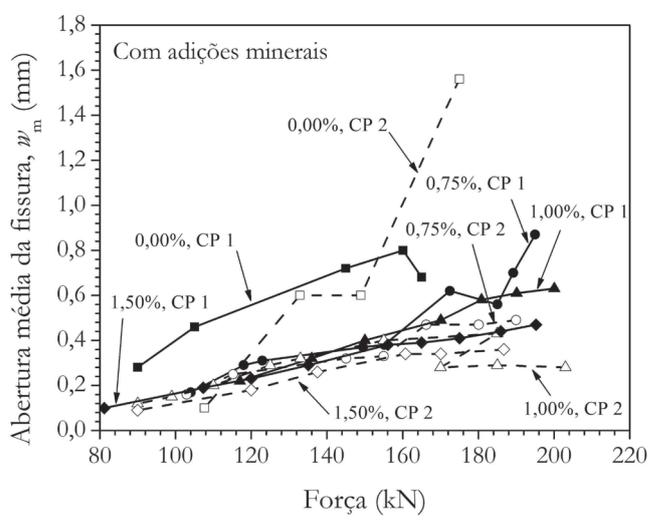
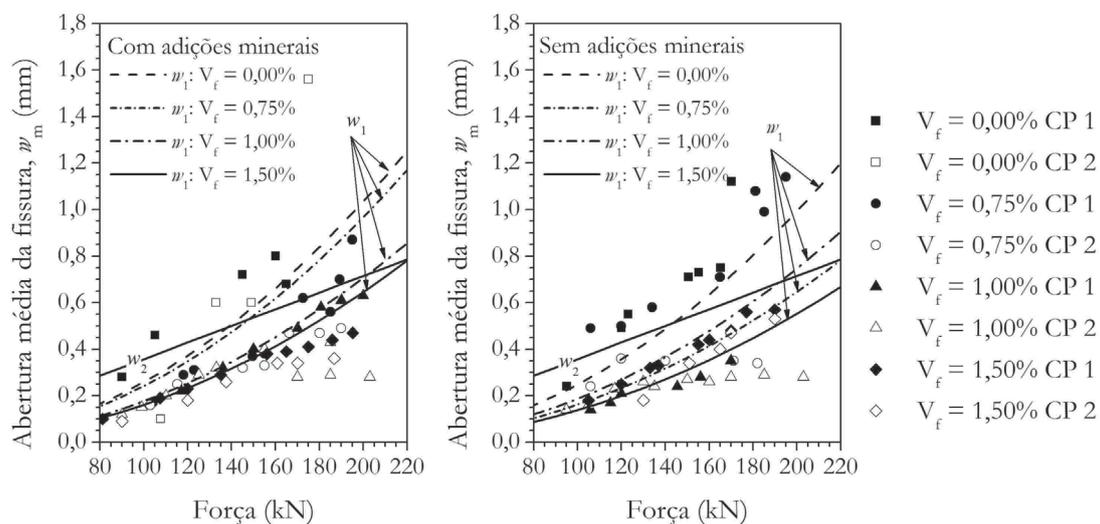


Figura 4 - Abertura média da fissura principal - comparação entre os valores experimental e calculado de acordo com a NBR 6118 para concretos com e sem adições minerais



tirante. Estes valores estão apresentados na Tabela 2. O módulo de elasticidade do aço foi adotado igual a 210 GPa.

A Figura 4 compara os valores experimentais da abertura média da fissura principal com os valores obtidos da aplicação da recomendação da norma brasileira. Nesse caso, os dois critérios dessa norma foram empregados. Dessa comparação, observou-se que as equações propostas na norma brasileira não foram adequadas para avaliar a abertura de fissuras, uma vez que os valores obtidos foram sistema-

ticamente inferiores aos medidos durante os ensaios e a dispersão é similar à abertura de fissuras (da ordem de décimos de mm).

De acordo com Almeida [11] a equação da norma brasileira NBR 6118 que fornece o valor de w_1 (equação 1) não considera a influência do cobrimento do concreto na fissuração, pois assume uma relação constante entre o cobrimento do concreto e o diâmetro da armadura. No caso da equação que fornece o valor de w_2 (equação 2), Almeida [11] relata que não são consideradas

Figura 5 - Abertura média da fissura principal - comparação entre valores experimental e calculado de acordo com o Eurocode 2 para concretos com e sem adições minerais

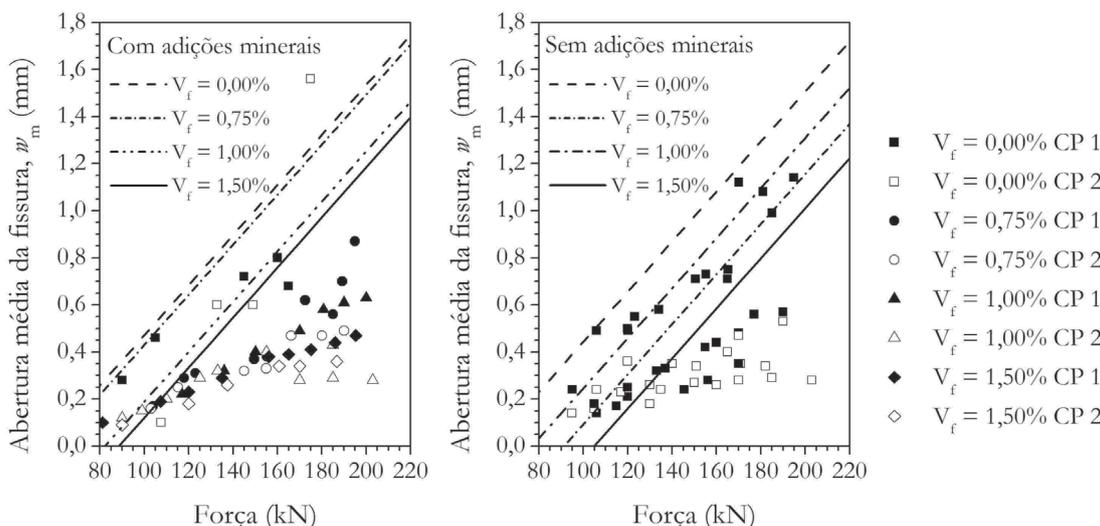
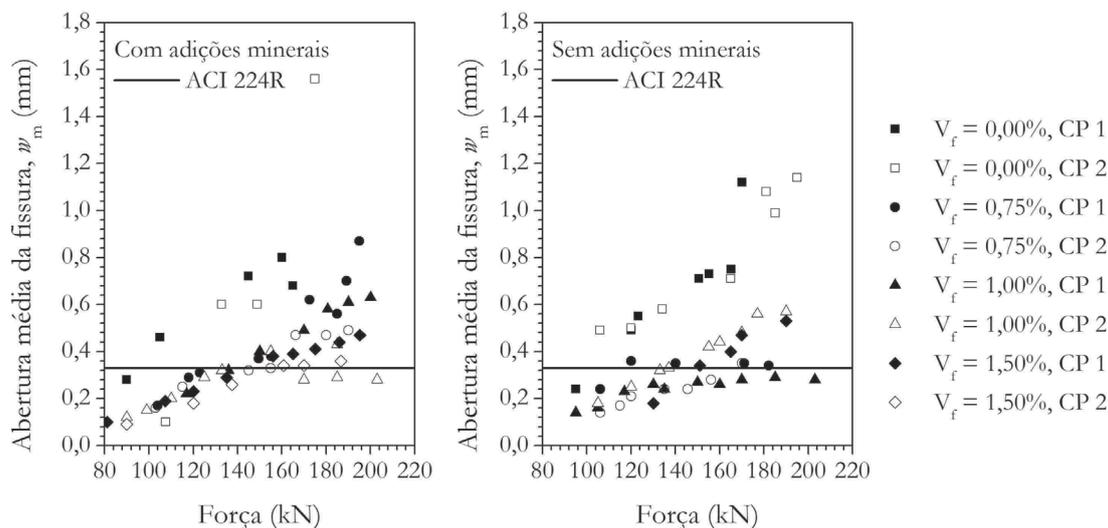


Figura 6 – Abertura média da fissura principal – comparação entre valores experimental e calculado de acordo com o ACI 224R para concretos com e sem adições minerais



as influências do diâmetro e da área de concreto que envolve a armadura, do cobrimento de concreto e da curvatura do elemento estrutural (para o caso de elementos fletidos). Todos estes fatores justificam a dificuldade das expressões mencionadas em avaliar valores confiáveis de abertura de fissuras.

$$w_1 = \frac{\phi}{12,5\eta} \frac{\sigma_s}{E_s} \frac{3\sigma_s}{f_{ctm}} \quad (1)$$

$$w_2 = \frac{\phi}{12,5\eta} \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{4}{\rho} + 45 \right) \quad (2)$$

em que w_1 e w_2 são as aberturas de fissuras, ϕ é o diâmetro da armadura, η é o coeficiente de conformação superficial da armadura, σ_s e E_s são a tensão e o módulo de elasticidade da armadura, f_{ctm} é a resistência média do concreto à tração e ρ é a taxa de armadura.

Em tirantes de concreto reforçado com fibras, observa-se que as equações da norma brasileira também não são adequadas para avaliar a abertura de fissuras, como era esperado, levando em conta que tais equações não foram originalmente desenvolvidas para esse tipo de material.

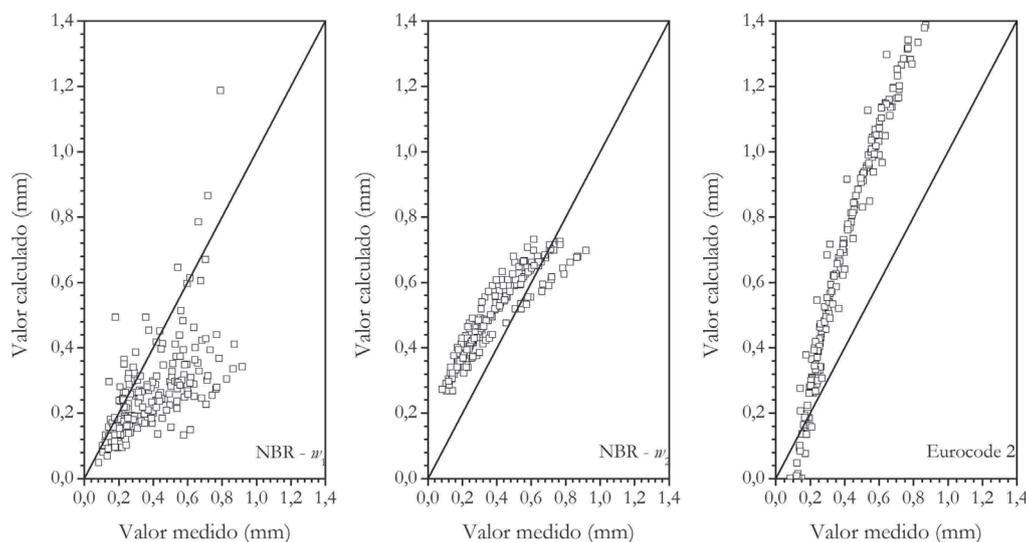
A Figura 5 compara os valores experimentais e teóricos da abertura de fissuras de tirantes com e sem adições minerais empregando a recomendação do Eurocode 2 [10]. Foi observado, em geral, que a equação proposta pelo Eurocode 2 [10] se aproximou razoavelmente bem dos valores experimentais dos tirantes de concreto sem fibras. Isso acontece devido à consideração da abertura de

fissura como sendo uma função linear da tensão na armadura, o que é uma simplificação a favor da segurança, uma vez que, mesmo em serviço, as estruturas de concreto armado não se comportam linearmente. Em tirantes de concreto reforçado com fibras, principalmente com elevado volume de fibras, os valores teóricos foram bem maiores que os valores observados nos ensaios, o que torna evidente a dificuldade da equação proposta pelo Eurocode 2 [10] em avaliar a abertura de fissuras para concreto reforçado com fibras. Isso é natural, uma vez que a equação proposta foi desenvolvida apenas para concreto simples. Este comportamento foi observado nos tirantes de concreto com e sem adições minerais.

A Figura 6 compara os valores experimental e teórico da abertura de fissuras de tirantes com e sem adições minerais empregando a recomendação do ACI 224R [9]. Observa-se, em geral, que a recomendação do ACI 224R [9] para avaliação da abertura de fissuras não foi adequada para o concreto armado reforçado com fibras, pois, assim como as recomendações da norma brasileira e do Eurocode 2, tal recomendação foi desenvolvida apenas para concreto simples. A equação da recomendação do ACI 224R [9] foi definida com base na taxa de armadura, no cobrimento de concreto e na tensão correspondente a 40% da tensão de escoamento da armadura. Dessa forma, sempre se obtém um valor constante da abertura de fissuras, independentemente do nível de tensões na armadura ou do estágio de fissuração alcançado. Essas considerações tornam a equação do ACI 224R [9] inadequada para avaliar satisfatoriamente a abertura de fissuras, principalmente para concreto armado reforçado com fibras, para o qual a equação mencionada não foi desenvolvida.

A comparação entre os valores experimental e teórico da abertura de fissuras nos tirantes com e sem adições minerais é reforçada na Figura 7, que demonstra que o valor calculado da abertura de fissuras foi maior que o obtido experimentalmente usando a expressão de w_1 da norma brasileira e menor quando se usa a expressão de

Figura 7 – Comparação entre valores experimental e calculado da abertura de fissuras de acordo com as recomendações de norma brasileira e européia



w_2 da norma brasileira e Eurocode 2. Os gráficos são meramente ilustrativos e não são suscetíveis de correlação, pois não consideram as diferenças entre concreto simples e concreto reforçado com fibras. Nos gráficos da Figura 7, os pontos representam os resultados experimentais e a linha representa a igualdade entre os valores teóricos e experimentais. A recomendação do ACI 224R calcula a abertura de fissuras para uma tensão correspondente a 40% da tensão de escoamento, então, como as aberturas de fissuras não foram medidas neste nível de tensão, a comparação entre valores experimentais e teóricos segundo o ACI 224R não se justifica neste caso.

3.2 Espaçamento de fissuras

Em tirantes de concreto simples, é fácil determinar o espaçamento máximo de fissuras, uma vez que elas geralmente surgem nas quatro faces do tirante. Entretanto, isto não acontece nos tirantes de concreto reforçado com fibras. Devido à múltipla fissuração, é comum a ocorrência de fissuras em apenas uma face do tirante, principalmente quando altos volumes de fibras são utilizados. Além

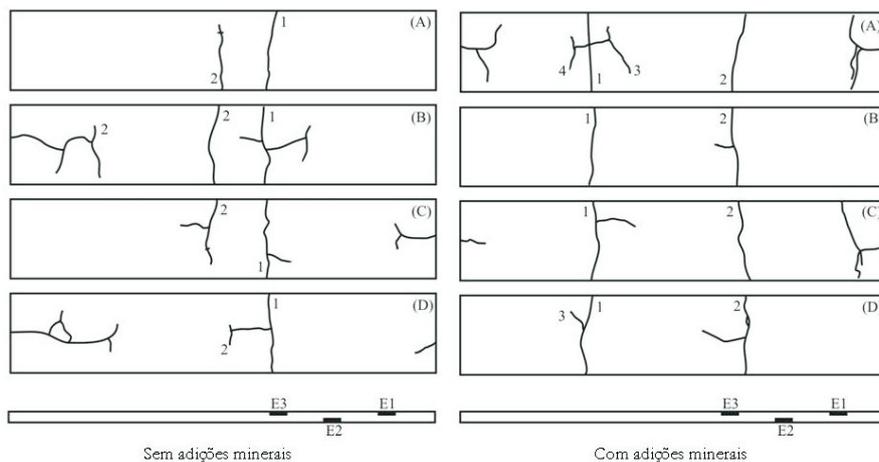
disso, às vezes as fissuras surgem de outras fissuras e formam ramificações, o que dificulta ainda mais a identificação do espaçamento máximo de fissuras. Levando em conta esses aspectos, é necessário estabelecer critérios para determinar o máximo espaçamento entre fissuras no concreto reforçado com fibras.

A Tabela 3 mostra os valores máximos do espaçamento entre fissuras para tirantes de concreto simples e de concreto reforçado com fibras. Os valores mostrados nessa tabela, relacionados ao concreto com fibras, correspondem ao maior espaçamento observado entre duas fissuras adjacentes que ocorreram em, pelo menos, duas faces do tirante. Analisando a tabela observa-se, em geral, que o espaçamento entre fissuras diminuiu com a adição de fibras, o que mais uma vez confirma os benefícios proporcionados pela adição de fibras ao concreto, entre eles a redução do comprimento de ancoragem das barras da armadura. Observa-se, ainda, que os tirantes de concreto simples com adições minerais mostraram maiores valores de espaçamento entre fissuras, o que indica uma piora da aderência na interface aço-concreto e uma abertura de fissuras maior. Estes aspectos são confirmados pelas Figuras 2 e 3. Entretanto, parece

Tabela 3 – Espaçamento máximo entre fissuras (mm)

V_f (%)	Sem adições minerais		Com adições minerais	
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
0,00	213	-	275	-
0,75	103	116	167	173
1,00	197	156	149	130
1,50	154	161	100	106

Figura 8 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto sem fibras



não haver influência das adições minerais no espaçamento entre fissuras em tirantes de concreto reforçado com fibras, mesmo um pequeno acréscimo de abertura de fissura devido às adições minerais tendo sido observado.

Analisando a influência do volume de fibras no espaçamento máximo entre fissuras, observa-se a impossibilidade do estabelecimento de uma relação clara entre o espaçamento de fissuras e o volume de fibras, o que se deve a natureza aleatória das trajetórias seguidas pelas fissuras durante seu desenvolvimento e

à introdução de subjetividade com o estabelecimento de critérios sem embasamento matemático.

3.23 Panoramas de fissuração

Os panoramas finais de fissuração dos tirantes de concreto sem fibras, apresentados na Figura 8, revelam duas fissuras transversais que estavam mais espaçadas no tirante de concreto com adições minerais, sugerindo uma piora da aderência

Figura 9 – Aspecto das fissuras de fendilhamento na seção transversal

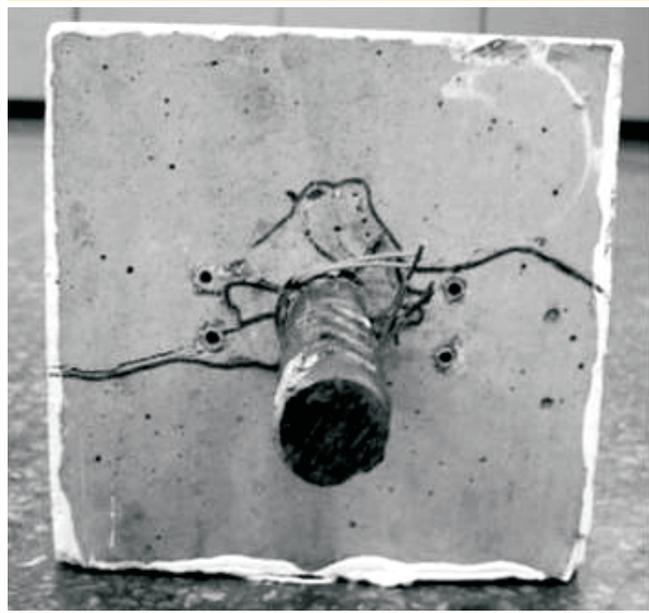
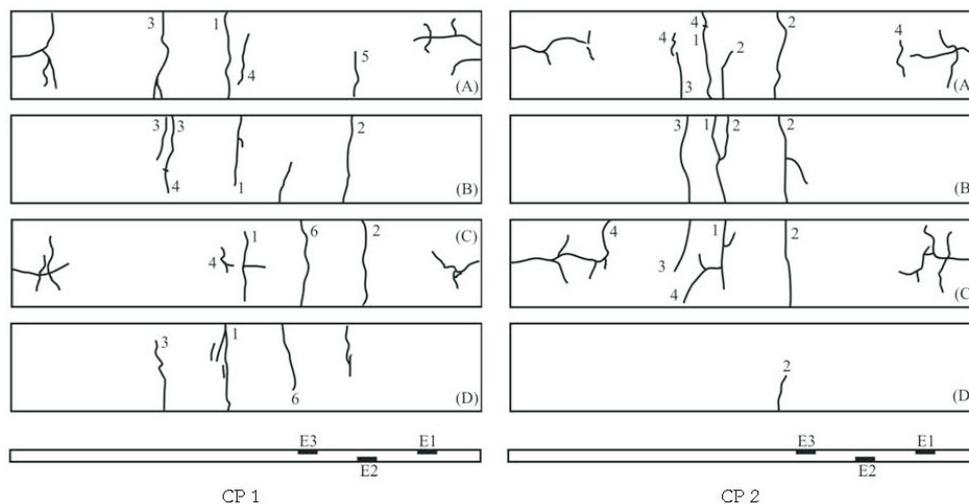


Figura 10 – Núcleo de cisalhamento originado no arrancamento da armadura



Figura 11 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 0,75% de fibras sem adições minerais



entre aço e concreto. Após a formação das fissuras principais (fissuras 1 e 2), surgiram fissuras em três faces do tirante de concreto sem adições minerais e nas quatro faces do tirante de concreto com adições minerais, ambas aproximadamente na metade da largura da seção transversal, na qual se pôde observar fissuras de fendilhamento, como as mostradas na Figura 9. Outro aspecto notado foi a ramificação das fissuras de fendilhamento, as quais reduzem a rigidez à tração do concreto. No entanto, Abrishami e Mitchell [12] verificaram que a fissuração de fendilhamento tem efeito deletério significativo quando a relação entre o cobrimento de concreto e o diâmetro

da armadura é inferior a 2,5. Assim, as fissuras de fendilhamento não devem ter influenciado a resposta obtida, já que para os tirantes ensaiados essa relação é igual a 3,25. Também foi observada a formação de um núcleo de cisalhamento decorrente do processo de arrancamento da armadura com uma fissura contornando a armadura (ver Figura 10), característica típica desse processo.

Nos tirantes de concreto com fibras, o cone de cisalhamento também se formou, mas sem apresentar a fissura típica do cone de cisalhamento. Esta forma de ruína indica que as dimensões escolhidas para os tirantes deveriam ter sido menores, assim como

Figura 12 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 1,00% de fibras sem adições minerais

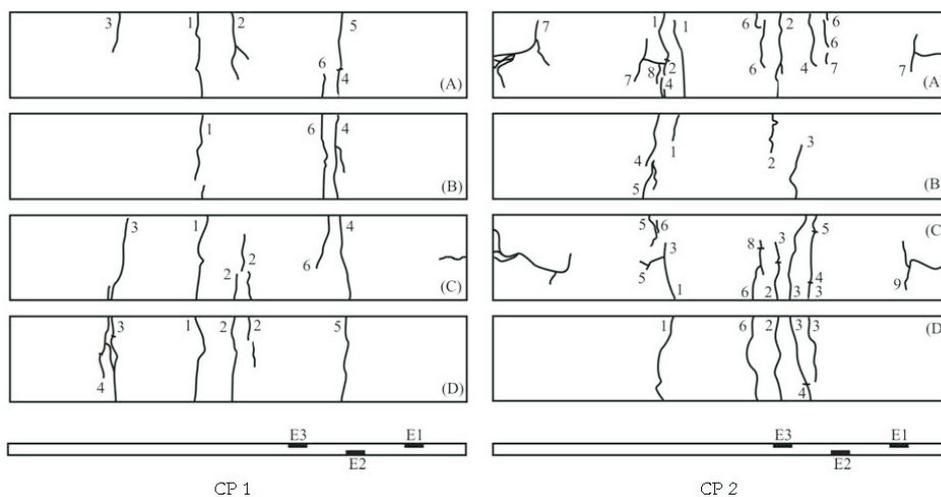
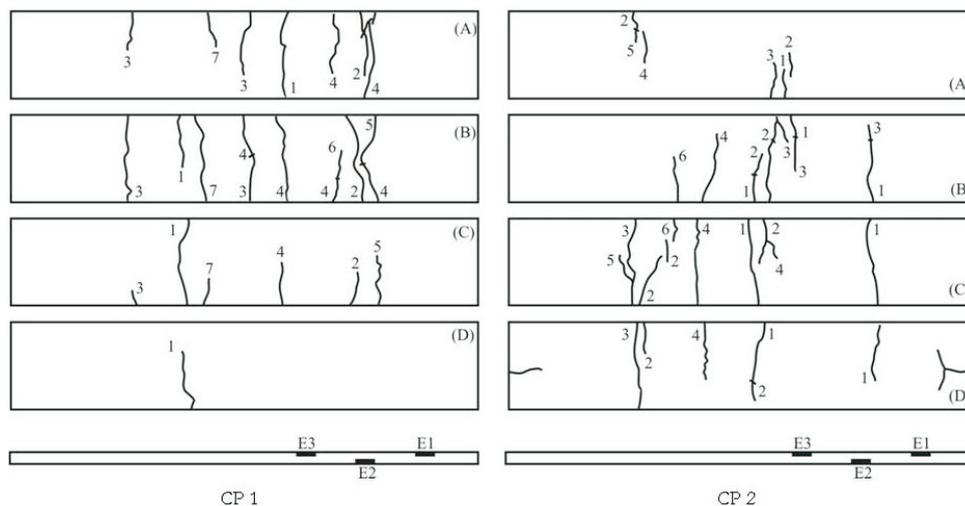


Figura 13 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 1,50% de fibras sem adições minerais



deveria ter sido menor o diâmetro da barra de aço. No entanto, o comprimento da fibra (60 mm) e o diâmetro da barra de aço (25 mm) limitaram as dimensões dos tirantes para evitar o alinhamento das fibras.

A incorporação de fibras ao concreto modifica totalmente os panoramas de fissuração, como se pode observar da Figura 11 a Figura 16. Nestas figuras, observa-se a múltipla fissuração proporcionada pelas fibras de aço, a qual contribui com a diminuição da abertura das fissuras. Como consequência da múltipla fissuração, tem-se o aumento do número de fissuras que se reflete na diminuição do espaçamento entre elas. As fissuras de fen-

dilamento não foram evitadas, mas elas se concentraram nas extremidades dos tirantes na maioria dos casos. Além disso, a presença da sílica ativa e da cinza volante parece ter auxiliado no controle da fissuração por meio da melhoria das aderências fibra-matriz e aço-concreto, resultando numa melhoria global da resposta do tirante.

A influência positiva das fibras de aço na fissuração do concreto foi evidenciada pelo número de fissuras, o qual aumentou bastante com a incorporação das fibras ao concreto. Este aumento, de forma geral, foi maior nos concretos reforçados com quantidades mais elevadas de fibras e sem adições minerais.

Figura 14 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 0,75% de fibras com adições minerais

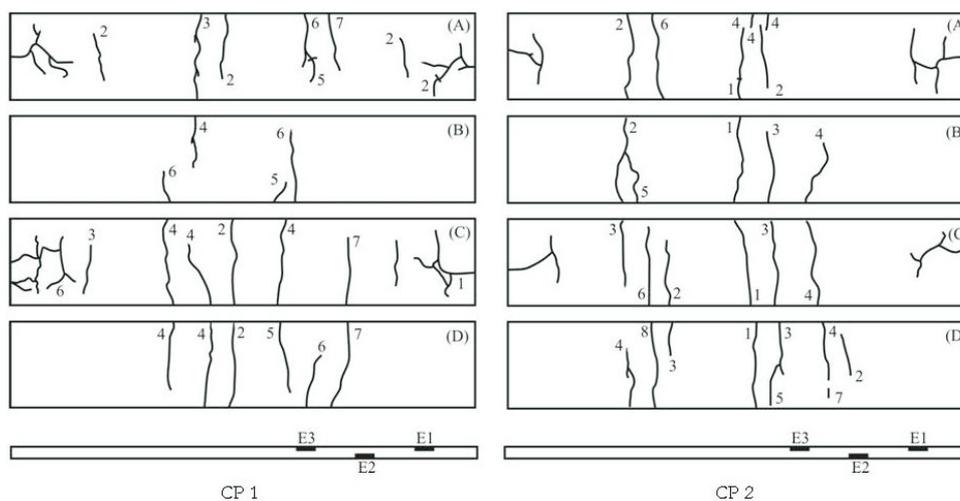
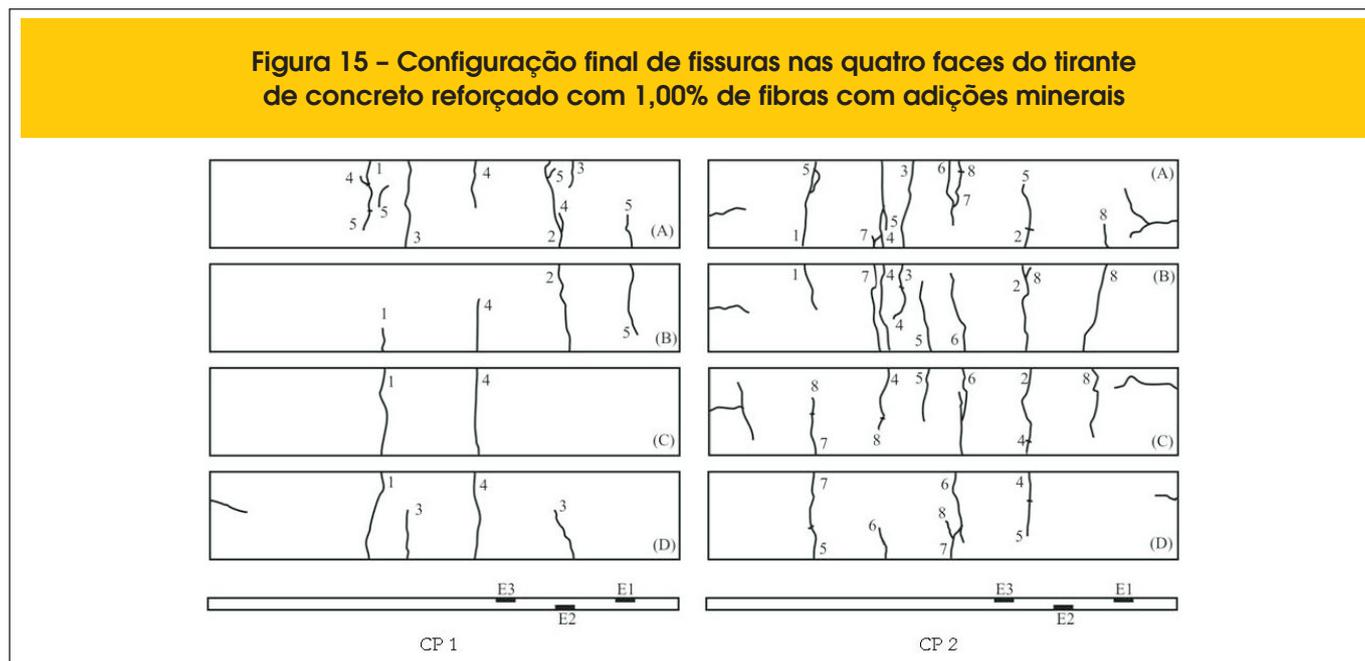


Figura 15 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 1,00% de fibras com adições minerais



Nenhuma relação explícita entre o volume de fibras e o número de fissuras visíveis (fissuras ativas) foi observada nos concretos contendo adições minerais, o que provavelmente se deve à dispersão observada no número de fissuras. Aparentemente a relação de aspecto da fibra não influenciou o número de fissuras visíveis.

4. Conclusões

Com base nas análises e discussões apresentadas, pode-se concluir o seguinte:

1. Observou-se que as fibras de aço reduziram a abertura média de fissuras nos concretos sem adições minerais em até 75%. No caso dos concretos com adições minerais, a redução da abertura média de fissuras foi de até 77%. Esse fato mostra que as adições minerais não influenciaram significativamente a abertura de fissuras;
2. O espaçamento máximo entre fissuras diminuiu com o aumento do volume de fibras. Entretanto, a relação entre o espaçamento e o volume de fibras não ficou clara devido à múltipla fissuração da matriz e ao fato da fissura poder surgir em qualquer ponto do tirante, o que introduz elevada dispersão nos valores médios do espaçamento entre fissuras;
3. A avaliação da abertura de fissuras por meio das recomendações de norma (NBR 6118, ACI e Eurocode 2) mostrou que tais recomendações não podem ser aplicadas a estruturas de concreto reforçado com fibras. A principal razão para este fato é a origem das referidas recomendações, as quais foram desenvolvidas a partir de ensaios realizados em tirantes de concreto simples e, portanto, não permitem a consideração da influência das fibras;
4. A presença das fibras de aço promoveu a múltipla fissuração do concreto, o que contribuiu para o aumento da rigidez à tração do material. Este aumento foi mais pronunciado nos concretos contendo maiores quantidades de fibras.

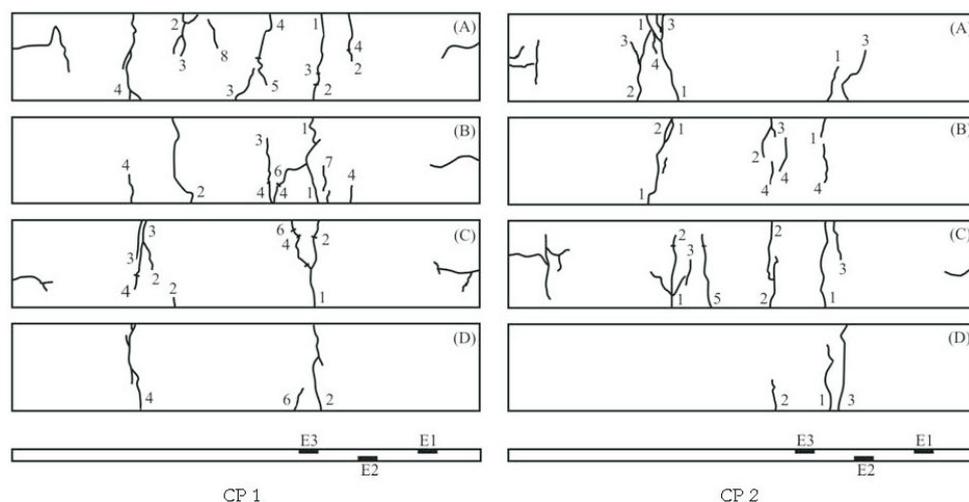
5. Agradecimentos

Este trabalho faz parte de uma pesquisa financiada pela Agência Nacional de Energia Elétrica que é um órgão regulador do sistema elétrico brasileiro. Os autores são gratos a essa agência pelo suporte financeiro bem como à empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. que disponibilizou seus laboratórios e pessoal técnico para a realização dos ensaios. Os autores agradecem também à CAPES pela concessão de bolsa de estudo durante a realização dessa pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- [01] NOGHABAI, K., Behavior of tie elements of plain and fibrous concrete and varying cross sections, *ACI Structural Journal*, v. 97, n. 2, March-April, 2000, p. 277-284.
- [02] EZELDIN, A. S. e BALAGURU, P. N, Bond behavior of normal and high-strength fiber-reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, v. 86, n. 5, Sept-Oct. 1989, p. 515-524.
- [03] OLIVEIRA JÚNIOR, L. A., A influência das fibras de aço e das adições minerais no enrijecimento à tração do concreto armado: análise experimental, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 288 f.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de prova cilíndricos – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994, 4 p.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7222 – Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994, 3 p.

Figura 16 – Configuração final de fissuras nas quatro faces do tirante de concreto reforçado com 1,50% de fibras com adições minerais



- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522 – Concreto – Determinação dos Módulos Estáticos de Elasticidade e Deformação e da Curva Tensão-Deformação, Rio de Janeiro, 1984, 9 p.
- [07] SOROUSHIAN, P. e LEE, C., Distribution and orientation of fibers on steel fiber-reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 5, September – October, 1990, p. 433-439.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro, 2003, 170 p.
- [09] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 224.2R-92 – Cracking of concrete members in direct tension, Detroit, 2005, 12 p.
- [10] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, EUROCODE 2 – Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Prestandard, DD ENV 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2002.
- [11] ALMEIDA, M. C. F., Eficiência das normas brasileiras NBR 6118/1980 (antiga) e NBR 6118/2003 (atual) no controle da fissuração em estruturas de concreto armado, *Engenharia Estudo e Pesquisa*, V. 8, n. 1, Rio de Janeiro, 2005, p. 74-82.
- [12] ABRISHAMI, H. H. e MITCHELL, D., Influence of splitting cracks on Tension Stiffening, *ACI Structural Journal*, V. 93, n. 6, November-December 1996, p. 703-710.