3
Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço

Este capítulo destina-se a apresentar a relevância da utilização do concreto autoadensável fibroso (CAAF), os ensaios para caracterização deste material e suas propriedades mecânicas. Vale ressaltar que o compósito aqui abordado tem como referência os estudos realizados por Marangon (2011). Desta forma, quatro seções são apresentadas. A primeira seção apresenta a motivação pelo material estudado. A segunda seção descreve os materiais constituintes do concreto reforçado com fibras de aço. A terceira seção apresenta a descrição dos ensaios experimentais. A quarta seção aborda as propriedades físicas obtidas nos ensaios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.1
Motivação para o estudo do CAAF

A construção civil tem exigido cada vez mais dos materiais empregados nas estruturas civis, pois com edificações cada vez mais esbeltas, sabe-se que a quantidade de material empregada é menor, mas a eficiência deve ser maior, tanto do ponto de vista de resistência quando do ponto de vista de serviço quando comparado à concretos tradicionais.

Nesse âmbito surge então o CAAF, este material tem como característica o fato de no estado fresco se espalhar e preencher o máximo dos espaços vazios homogeneamente sob seu próprio peso, sem nenhuma necessidade de energia de compactação adicional. A utilização de fibras no concreto propicia melhorias nas propriedades mecânicas.

Neste contexto, as misturas autoadensáveis fibrosas podem gerar um concreto mais homogêneo no estado endurecido, uma vez que ocorre uma melhor dispersão das fibras. As fibras têm como uma de suas funções diminuírem as fissuras do concreto no estado endurecido. Logo, o concreto autoadensável fibroso combina os benefícios do concreto autoadensável no estado fresco com o melhor desempenho do concreto fibroso no estado endurecido.

Outro detalhe muito importante é que para a fabricação de CAAF é necessária a utilização de uma grande quantidade de materiais finos, o que melhora consideravelmente o comportamento do concreto em relação às propriedades ao longo do tempo, tais como retração e fluência, propriedades relevantes no projeto de estruturas, estando diretamente relacionadas com a durabilidade e segurança das construções.

No que se refere ao processo construtivo das estruturas de concreto, em geral, uma das etapas mais trabalhosas é a montagem das armaduras, principalmente quando estas são muito densas ou quando as peças são pouco espessas. Pois no momento do lançamento do concreto no estado fresco o mesmo pode vir a não preencher todos os espaços vazios devido à alta densidade de armadura, o que pode comprometer a qualidade do elemento estrutural.

Assim, o uso do concreto autoadensável fibroso pode possibilitar a diminuição da taxa de armadura de elementos estruturais densamente armados e favorecer o aumento da mecanização e da produtividade, com possíveis vantagens em relação ao custo e qualidade final da obra.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.2
Caracterização dos materiais constituintes do CAAF

Apresenta-se nesta seção a caracterização física dos materiais utilizados na produção do concreto autoadensável com fibras de aço utilizado no trabalho de Marangon.

3.2.1
Agregados

Foram utilizados dois agregados graúdos, o primeiro dos quais com dimensão máxima de 9,5 mm, e o segundo com dimensão máxima de 19 mm. Os agregados graúdos empregados são de origem natural, resultados do britamento de rocha do tipo litológico granito, proveniente da pedreira Brita Brás, localizada na cidade do Rio de Janeiro.

A Figura 3.1 mostra as curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo utilizados na preparação dos concretos. A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada por peneiramento, de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7217.

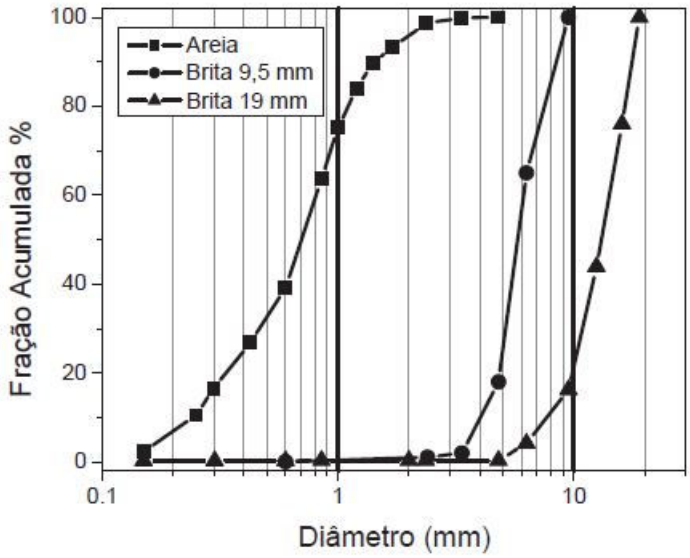


Figura 3.1: Curvas granulométricas dos agregados.
Fonte: Marangon, 2011.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.2.2
Aglomerantes

Para a produção dos concretos, utilizou-se o cimento CP III 40. As distribuições granulométricas deste cimento e da cinza volante foram obtidas por granulometria a laser, utilizando-se o equipamento Malvern do laboratório de cimentação do CENPES/Petrobrás. A distribuição granulométrica da sílica ativa foi determinada no laboratório do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral - UFRJ), utilizando sedigrafia, técnica baseada na velocidade de sedimentação de partículas. As curvas granulométricas da sílica ativa, da cinza volante e do cimento CP III 40 são mostradas na Figura 3.2.

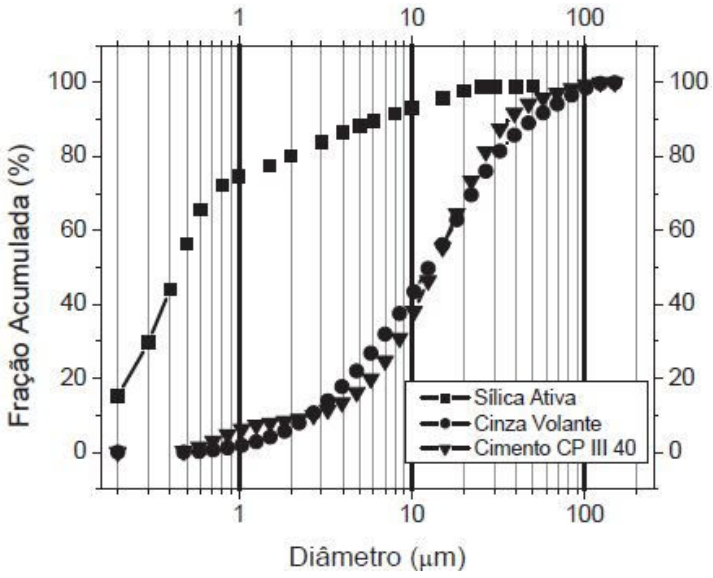


Figura 3.2: Curvas granulométricas da sílica ativa, da cinza volante e do cimento CP II 40.

Fonte: Marangon, 2011.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.2.3
Superplastificantes

Plastificantes Aceleradores de Pega Característica: Os aditivos plastificantes aceleradores de pega para concreto são produtos isentos de cloreto que promovem a dispersão do material cimentício, possibilitando a produção de concretos com maiores índices de consistência e/ou a redução da água de amassamento. Simultaneamente, estes produtos propiciam a aceleração das reações iniciais de hidratação do cimento e de endurecimento do concreto, resultando em rápido ganho de resistência inicial.

São prontos para uso e atendem a norma NBR-11768, sendo classificados como Tipo PA. Como vantagens deste aditivo tem-se a promoção do ganho de resistência em baixas temperaturas, redução dos tempos de início e fim de pega e a resistência inicial do concreto mais elevada.

Foi utilizado em Marangon um dispersante do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51), com teor de sólidos de 31,2 %, massa específica de 1,073 kg/m³ e pH 6,2.

3.2.4
Agente Modificador de Viscosidade

Para evitar a exsudação e a segregação, e manter a coesividade do concreto autoadensável é utilizado nos CAAF agentes modificadores de viscosidade. O agente modificador usado por Marangon foi o de nome comercial Rheomac UW 410, fabricado pela empresa BASF. O Rheomac UW 410 é um produto com base química de polímeros de celulose de alto peso molecular, em forma de pó e de cor branca. O agente modificador de viscosidade foi adicionado à mistura úmida durante a produção dos concretos, e a dosagem utilizada foi de 0,1 % em relação a massa de cimento. A Figura 3.3 mostra o agente modificador de viscosidade utilizado.

Figura 3.3: Agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410.
Fonte: Marangon, 2011.

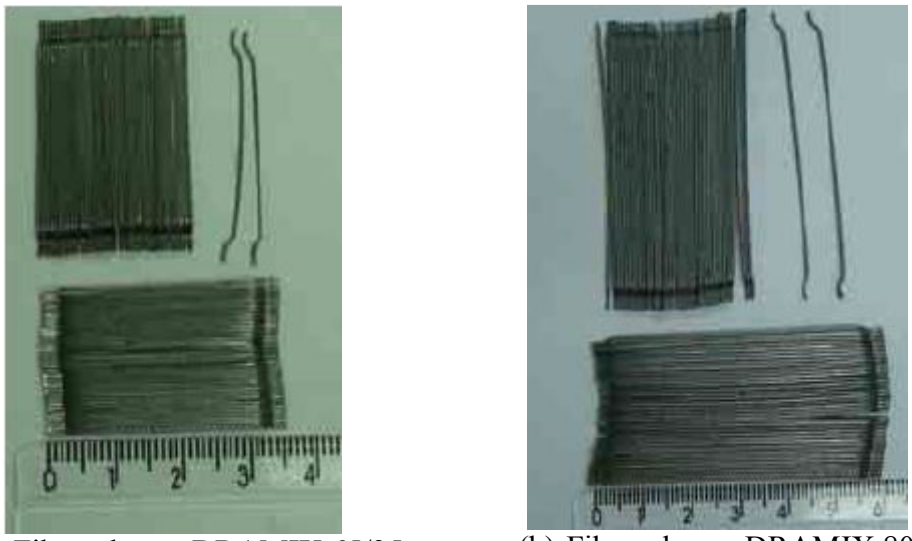
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.2.5
Fibras de Aço

Para a produção dos CAAF's foram utilizados dois tipos de fibra de aço, ambas com ganchos em suas extremidades: Dramix 65/35 e Dramix 80/60. A primeira fibra tem comprimento de 35 mm e diâmetro de 0,54 mm (relação de aspecto 65), enquanto que, para a segunda, estes valores respectivos são de 60 mm e 0,75 mm (relação de aspecto 80). As fibras são comercializadas no Brasil pela ArcelorMittal. A Tabela 1 lista as propriedades dos dois tipos de fibra de aço. Na Figura 3.4 são mostradas as fibras utilizadas.

Tabela 1: Características das fibras de aço utilizadas, Marangon (2011).

Especificação	Dramix RC 65/35	Dramix RC 80/60
Comprimento (mm)	35	60
Diâmetro (mm)	0,54	0,75
Relação de Aspecto (1/d)	65	80
Quantidade de fibras/kg	14500	4600
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	200
Resistência à Tração (Mpa)	1150	1100



(a) Fibras de aço DRAMIX 65/35. (b) Fibras de aço DRAMIX 80/60.

Figura 3.4: Fibras de aço utilizadas

Fonte: Marangon, 2011.

3.3
Produção e Métodos de Ensaios

No estudo de Marangon (2011) foram produzidas várias misturas de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço. Estas misturas diferenciam-se essencialmente nos tipos fibras de aço, nas porcentagens de fibras utilizadas nas misturas e nos dois tipos de agregados. Dentre as misturas realizadas por Marangon a mistura utilizada no presente trabalho para as modelagens numéricas que serão exploradas nos capítulos subsequentes foi a denominada naquela referência por C2.1%65. O caractere inicial C2 significa que a mistura contêm agregado de diâmetro máximo 19 mm. Os caracteres subsequentes da nomenclatura de uma mistura referem-se ao teor volumétrico de fibra de aço (1%), e por fim, o ultimo caractere especifica a relação de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

aspecto do tipo de fibra de aço utilizada como reforço. A fibra utilizada de relação de aspecto 65 indica o comprimento da fibra de 35 mm e diâmetro 0,54 mm.

3.3.1
Comportamento à Tração Direta

O aparato utilizado para a realização dos ensaios de tração direta está ilustrado na Figura 3.5. Feito de aço maciço, ele é mantido preso entre as garras da máquina de ensaio, evitando o contato da amostra com a máquina e impedindo o esmagamento da mesma. Para fixar o aparato à amostra, foi desenvolvido um segundo acessório com placas de aço, ligado ao sistema rígido por três pinos de aço. A transferência de cargas para a amostra é feita através de placas de aço coladas na lateral da mesma por meio de um adesivo epóxi de alta resistência.

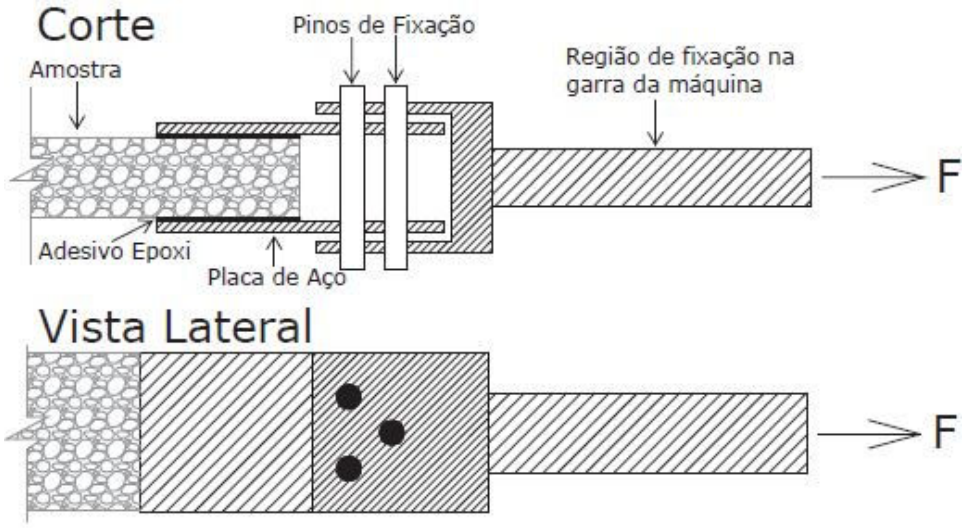


Figura 3.5: Sistema rígido utilizado para os ensaios de tração direta. Fonte: Marangon, 2011.

A amostra utilizada para os ensaios de tração direta é mostrada na Figura 3.6. O molde usado na confecção das amostras consiste de um prisma (100x100x400 mm).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

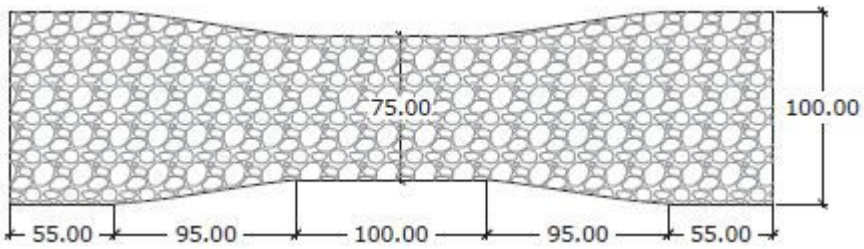


Figura 3.6: Tração direta, dimensões da amostra.

Fonte: Marangon, 2011.

A garantia do alinhamento da colagem foi feita por meio de um sistema de cantoneira com pinos guias, conforme mostrado na Figura 3.7.

Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,1 mm/min.

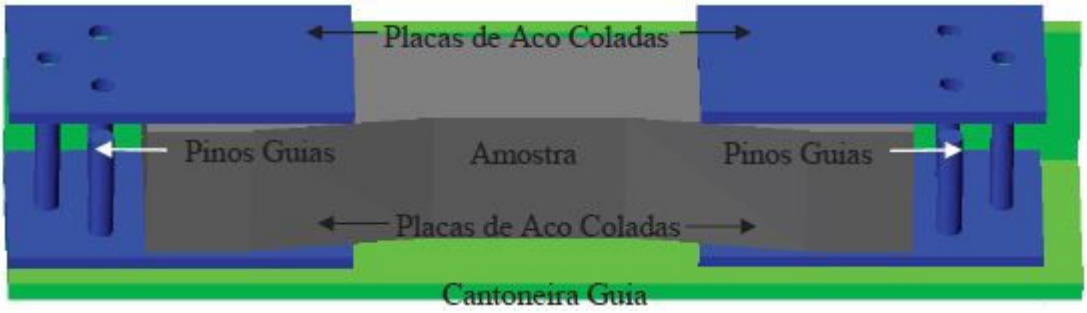


Figura 3.7: Sistema de colagem das amostras para garantir o alinhamento.

Fonte: Marangon, 2011.

Os deslocamentos axiais do corpo-de-prova foram medidos através de dois Transformadores Diferenciais Variáveis (*Linear Variable Differential Transformer* - LVDT) acoplados, por meio de anéis, à região central do mesmo. A Figura 3.8 ilustra a configuração para ensaios de tração direta. Com os dados de deslocamento axial, obtém-se a deformação axial do corpo-de-prova, sob uma base de leitura de 100 mm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

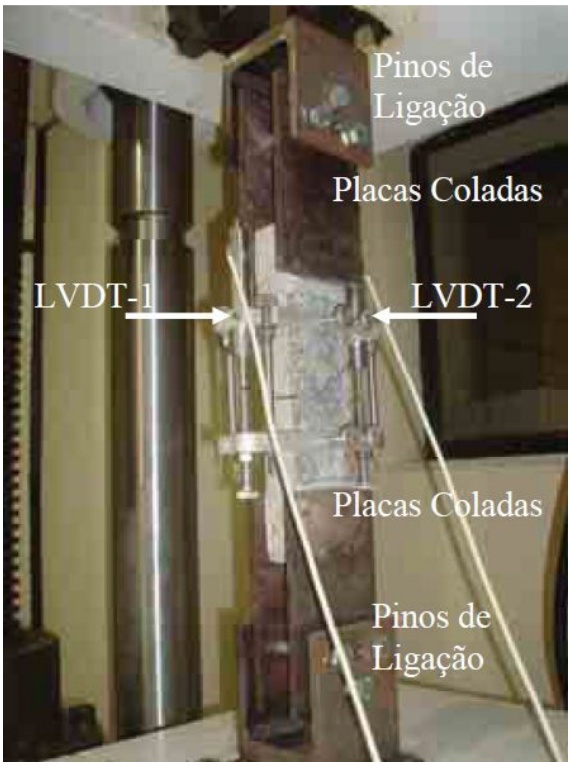


Figura 3.8: Configuração do ensaio de tração direta para amostras prismáticas.

Fonte: Marangon, 2011.

As amostras de cada tipo de concreto foram ensaiadas, a uma idade de 28 dias. Foram obtidas, a partir dos ensaios curvas tensão x deslocamento para os concretos fibrosos.

3.3.2
Comportamento ao Cisalhamento

O ensaio de resistência ao cisalhamento realizado por Marangon teve como base a proposta de Mirsayah e Banthia (2002), que se basearam na norma japonesa JSCE-SF6, e foi implementado na COPPE/UFRJ por Marangon (2006). Para a medição de deslocamentos, foram acoplados à mesma da maquina de ensaios duas bases magnéticas, contendo dois LVDT's, em ambos os lados da amostra a ser ensaiada. Fixou-se, no centro da amostra duas guias de aço, nas quais foram apoiados os LVDT's conforme a Figura 3.9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

Figura 3.9: Instrumentação dos corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento.

Fonte: Marangon, 2011.

As amostras utilizadas para o ensaio de resistência ao cisalhamento são prismáticas, com dimensões 100x100x400 mm. Foram feitos entalhes, utilizando-se uma serra de mármore, nas seções das amostras em que o cisalhamento se verifica, conforme pode ser visto na Figura 3.10. Os valores médios da profundidade e da largura do entalhe foram de, respectivamente, 10 e 2,4 mm.

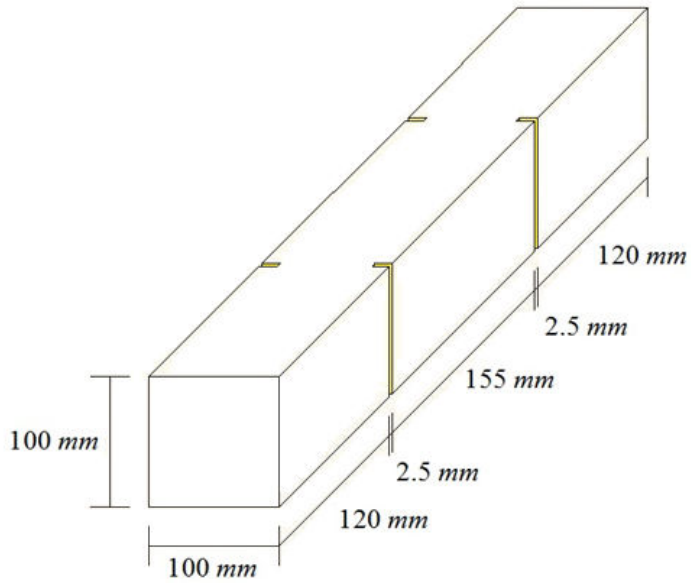


Figura 3.10: Dimensões da peça ensaiada no ensaio de cisalhamento.

A velocidade de ensaio foi definida pelo controle de deslocamento vertical do travessão, a uma taxa de 0,1 mm/min, e as amostras foram ensaiadas aos 28 dias de idade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.3.3
Comportamento à Flexão

O ensaio foi realizado com controle de deslocamento do travessão da máquina a uma taxa de 0,5 mm/min. As amostras prismáticas utilizadas para o teste de flexão têm dimensões 100x100x400 mm, e foram ensaiadas a uma idade de 28 dias. A distância entre apoios (vão livre) foi de 300 mm. Assim, obteve-se uma relação entre vão livre e altura da amostra igual a 3, conforme orienta a norma NBR NM 55. A máquina impõe duas cargas concentradas, cada uma delas à distância de L/3 até o apoio mais próximo. A deflexão vertical do ponto central da amostra foi medida por meio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo tipo Yoke, posicionado à altura média da amostra prismática. A Figura 3.11 apresenta a instrumentação dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de flexão.

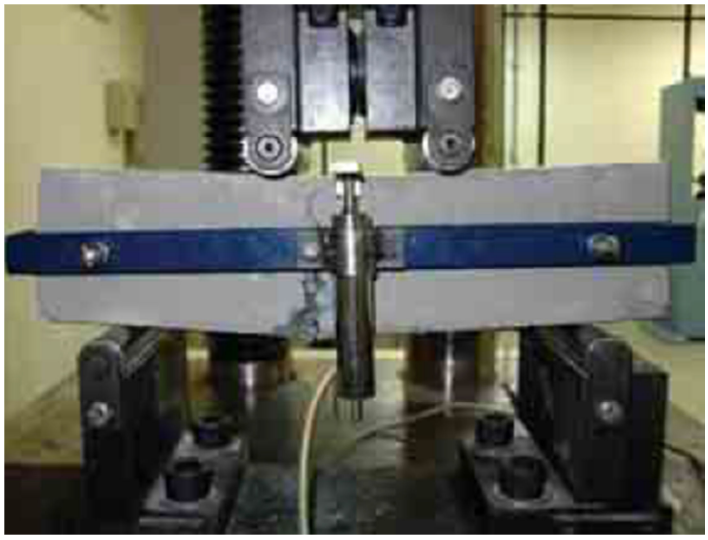


Figura 3.11: Aparato para ensaio de flexão.
Fonte: Marangon, 2011.

Os resultados provenientes do ensaio possibilitam a determinação da tensão de primeira fissura (tensão correspondente ao início do processo de fissuração da amostra) e da resistência à flexão (tensão máxima pós-fissuração) do concreto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.4
Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas e até as leis constitutivas dos compósitos estudados por Marangon foram obtidas através dos ensaios descritos na seção anterior.

Nesta seção serão mostrados os resultados para os ensaios de tração, cisalhamento e flexão para o compósito C2.1%65 bem como suas propriedades mecânicas.

3.4.1
Tração Direta

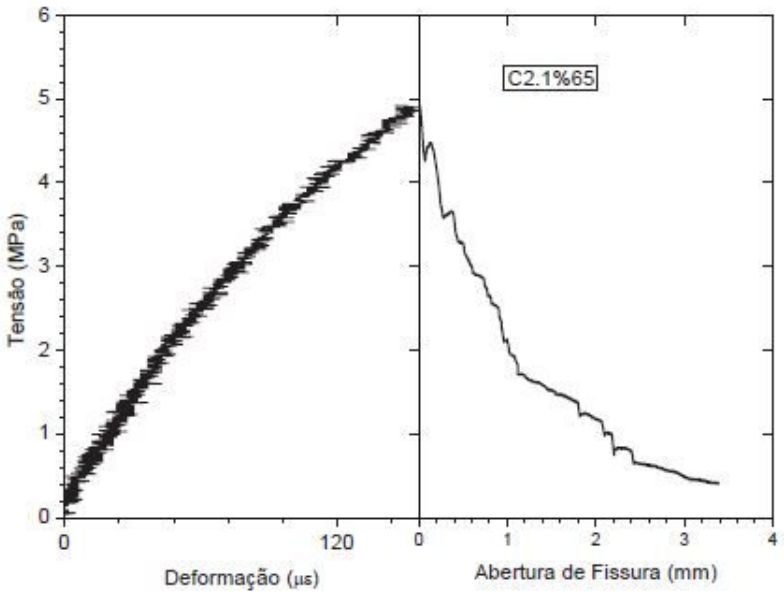
Os resultados referentes aos ensaios experimentais de tração direta são listados na Tabela 2, onde têm-se resistência à tração, deformação de pico e módulo de elasticidade.

Tabela 2: Resultados de resistência à tração, deformação de pico e módulo de elasticidade, referente ao concreto C2.1%65, Marangon (2011).

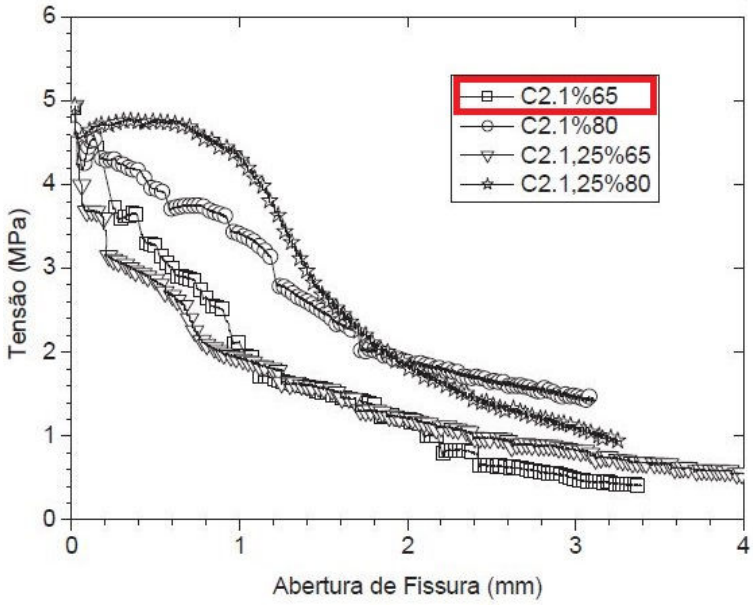
Material	tf (MPa)	Deformação de pico ($\mu\varepsilon$)	E(GPa)
Concreto reforçado com fibras de aço	4,96	158	35,58

As curvas típicas são apresentadas como tensão x deformação até o surgimento da primeira fissura, a partir deste ponto passa-se a apresentar as curvas tensão x abertura de fissura (Figura 3.12).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA



(a) C2.1%65.



(b) Abertura de fissura.

Figura 3.12: Curva típica, obtida no ensaio de tração para o concreto fibroso do tipo C2: Tensão x Deformação e Tensão x Abertura de fissura.

Fonte: Marangon, 2011.

3.4.2 Cisalhamento

Apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos concretos fibrosos produzidos. Para a curva carga x deslocamento foi determinada a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo aos pontos P1, P2, Pu, P3, P4 e P5, indicados na Figura 3.13. O ponto Pu refere-se à carga

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

máxima que ocorre durante o ensaio, os outros pontos que antecedem ao ponto Pu representam desvios de linearidade durante a fase de carregamento.

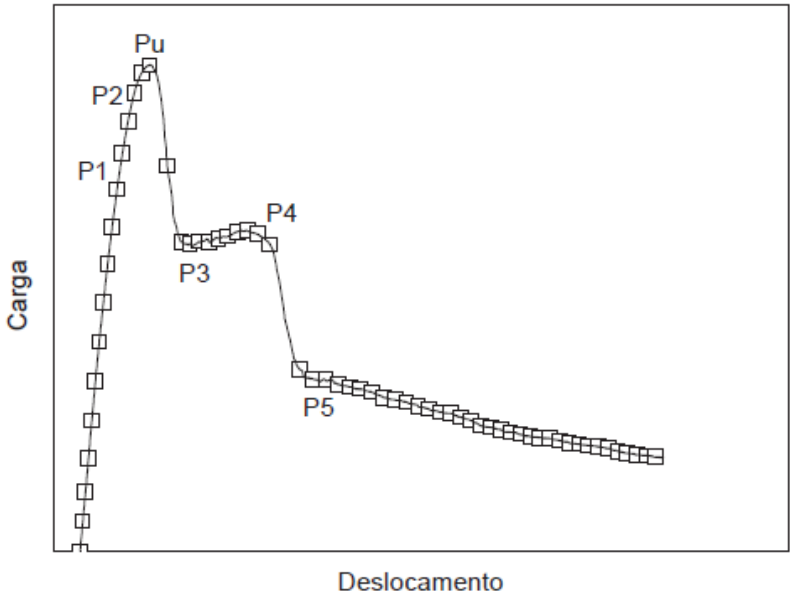


Figura 3.13: Pontos de análise da curva carga-deslocamento obtida do ensaio de resistência ao cisalhamento.

Fonte: Marangon, 2011.

A Tabela 3 apresenta os valores de tensão de cisalhamento e de deslocamento referentes aos pontos P1, P2, Pu, P3, P4 e P5, para todos o concreto C2.1%65

Tabela 3: Resultados de tensão de cisalhamento e de deslocamento de pico referentes aos pontos P1, P2, Pu, P3, P4 e P5, para o concreto C2.1%65, Marangon (2011).

Mistura	P1		P2		Pu	
	$\tau_1\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_1\,(\mathrm{mm})$	$\tau_2\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_2\,(\mathrm{mm})$	$\tau_u\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_u\,(\mathrm{mm})$
C2.1%65	12,09	0,20	14,18	0,28	14,79	0,36

Mistura	P3		P4		P5	
	$\tau_3\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_3\,(\mathrm{mm})$	$\tau_4\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_4\,(\mathrm{mm})$	$\tau_5\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_5\,(\mathrm{mm})$
C2.1%65	8,93	0,59	9,35	1,14	5,00	1,36

A curva típica carga x deslocamento referentes ao concreto C2.1%65, obtida a partir de ensaios de cisalhamento, é apresentada na Figura 3.14.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

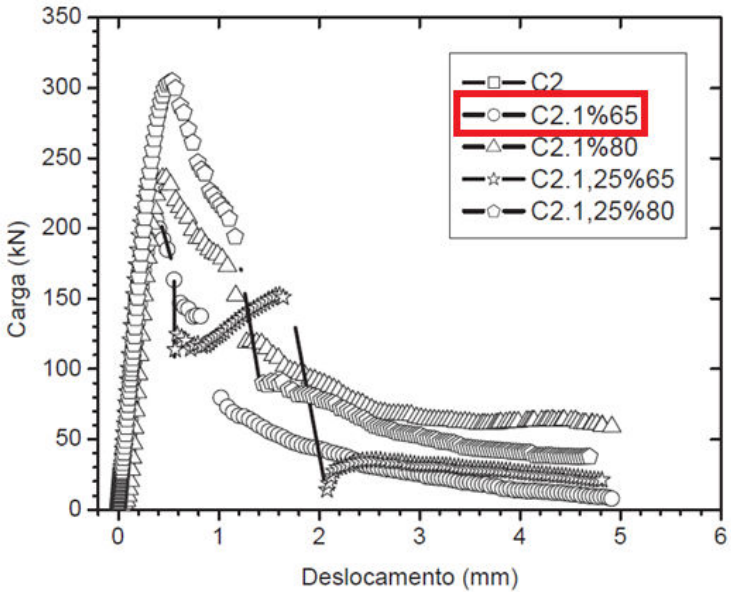


Figura 3.14: Curva típica carga x deslocamento obtida do ensaio de cisalhamento do concreto C2.1%65.

Fonte: Marangon, 2011

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA

3.4.3 Flexão

Nos ensaios de flexão foi obtida a curva carga x deslocamento. Os resultados para resistência à flexão e deslocamento relativo estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de tensão e deslocamento de primeira fissura, resistência à compressão e deslocamento de pico (ruptura) do concreto C2.1%65, Marangon (2011).

Mistura	Primeira Fissura		Pico (Ruptura)	
	$\sigma_{cr}\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_{cr}\,(\mathrm{mm})$	$\sigma_{u}\,(\mathrm{MPa})$	$\delta_{u}\,(\mathrm{mm})$
C2.1%65	8,16	0,05	11.01	0,34

Apresenta-se na Figura 3.15 a curva típica carga x deslocamento para o concreto C2.1%65.

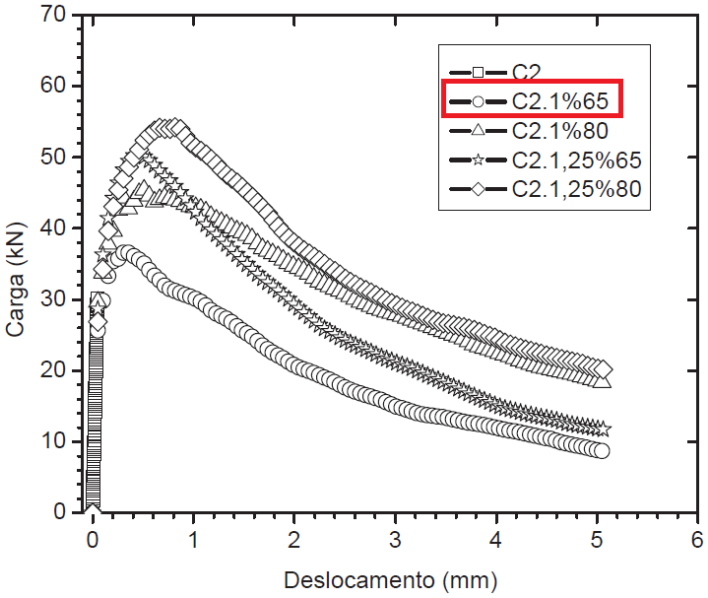


Figura 3.15: Curva típica Carga x Deslocamento do concreto C2.1%65. Fonte: Marangon, 2011.

Assim, conhecendo as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço bem como os detalhes dos ensaios experimentais, como aplicação das cargas, condições de contorno e onde provavelmente o corpo irá fraturar, é possível simular numericamente ensaios destrutivos de tração, flexão e cisalhamento e complementar os estudos experimentais. Uma vez que calibrado o modelo numérico torna-se possível a visualização do comportamento dos corpos-de-prova no que diz respeito ao campo de tensões e deslocamentos, como será abordado nos capítulos subsequentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221986/CA