



Elielson Oliveira de Sousa

**Aplicando concreto de elevada resistência
reforçado com fibras de aço na supressão do
reforço convencional de vigas em concreto
armado de resistência normal**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Bernardo Nunes de Moraes Neto

Belém – Pará – Brasil
2020

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Elielson Oliveira de Sousa

**Aplicando concreto de elevada resistência reforçado com
fibras de aço na supressão do reforço convencional de
vigas em concreto armado de resistência normal**

Dissertação de Mestrado

Exame de Dissertação submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre de Engenharia Civil na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto

Belém, 14 de janeiro de 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Elielson Oliveira de Sousa

TÍTULO: Aplicando concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço na supressão do reforço convencional de vigas em concreto armado de resistência normal.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Elielson Oliveira de Sousa

Av. Augusto Correa, nº 1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil.
Guamá, Belém, Pará. CEP 66075-970

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48a OLIVEIRA DE SOUSA, ELIELSON

Aplicando concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço na supressão do reforço convencional de vigas em concreto armado de resistência normal / ELIELSON OLIVEIRA DE SOUSA. — 2020.
79 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Concreto. 2. Concreto de elevada resistência. 3. Fibras de aço.
4. Viga. I. Título.

CDD 624



APLICANDO CONCRETO DE ELEVADA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO NA SUPRESSÃO DO REFORÇO CONVENCIONAL DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO DE RESISTÊNCIA NORMAL

AUTOR:

ELIELSON OLIVEIRA DE SOUSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 14 / 01 / 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Mateus Antonio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Prof. Dr. Ritermayer Monteiro Teixeira
Membro Externo (UEPA)

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e determinação concedida, por todos os sonhos realizados, pelas vitórias alcançadas, por sua infinita misericórdia e pela conclusão desta pós-graduação.

Aos meus pais, Elizonete e Valdeci, por seu zelo, amor, carinho e apoio nos momentos de dificuldades, dedicando suas vidas para que eu pudesse alcançar todos os sonhos almejados e para a minha progressão na formação acadêmica.

Agradeço à minha esposa Crislayne, por iluminar minha vida com sua presença, carinho e amor, estando ao meu lado, apoiando-me e contribuindo para a realização dos meus sonhos. Amor, a felicidade eu encontrei nos teus braços. Eu amo você.

Ao professor Bernardo Nunes Moraes Neto por todas as orientações fornecidas, paciência, apoio e companheirismo prestado ao longo do curso e especialmente para a execução desta pesquisa, sendo um verdadeiro mentor na minha vida acadêmica.

Aos engenheiros Francisco Sampaio Frota Neto, Klemerson Brito Veloso, representantes da *Tabalmix Concreto LTDA*, pela doação dos aditivos essenciais para a realização deste estudo. Bem como, ao engenheiro Pedro Gil Marques Brito pelas informações prestadas, e também, ao engenheiro Rodrigo Rodrigues da Cunha.

Agradeço aos amigos, Paulo Francisco José de Oliveira, Leonardo Sousa Duarte, Wladimir Rafael de Matos Lamarão e Juliana de Jesus da Silva, que me auxiliaram na execução do programa experimental. Ao Kássio Anderson Castro Maués, sou grato pela amizade, companheirismo, e por todo auxílio, contribuindo com seus conhecimentos para que eu atingisse a conclusão deste experimento.

Agradeço a todos!

RESUMO

SOUSA, E. O. DE. **Aplicando concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço na supressão do reforço convencional de vigas em concreto armado de resistência normal**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2020.

A presente dissertação avalia de modo experimental, a utilização do concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço (CRFA-ER) na supressão dos reforços convencionais, barras de aço, de vigas em concreto armado de resistência normal (CA-RN). Na abordagem experimental, cinco vigas com dimensão de 150x300x2700 mm³ foram preparadas e submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos até atingir a ruína. Entre estas vigas, uma foi de referência, sem aplicação de fibras, com f_c de 30,0 MPa e taxa de reforço longitudinal, $\rho_{l,t}$, e transversal, ρ_w , de 0,91 e 0,11 %, respectivamente, o que é representativo das aplicações práticas. Além dessa, outras quatro vigas em CRFA-ER, f_c de 60,0 MPa, foram preparadas com $\rho_{l,t} = 0,39$ % (supressão de $\approx 60,0$ %, relativamente à viga de referência), $\rho_w = 0,0$ % (supressão de 100,0 %) e o consumo de fibras (C_f) variando em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³. O comportamento das vigas foi interpretado a partir da análise das relações *carga-deslocamento* e *momento-curvatura*. Mediante esses resultados, e nas respostas dos ensaios de caracterização dos materiais, constatou-se a viabilidade de se projetar vigas em CRFA-ER com supressão dos reforços convencionais e comportamento mecânico equivalente, em alguns casos superiores, ao das vigas de CA-RN.

Palavras-chave

Concreto, Concreto de elevada resistência, Fibras de aço, Viga.

ABSTRACT

SOUSA, E. O. DE. **Applying high strength concrete reinforced with steel fibers in suppression of conventional reinforcement normal strength reinforced concrete beams.** Master Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2020. (In Portuguese)

High strength steel fiber reinforced concrete (HS-SFRC) used as suppression of conventional reinforcement normal strength reinforced concrete beams (NS-RC) has been in the current experimental research. Five 150x300x2700 mm³ size beams were prepared and submitted to four point bending test until failure. The beam reference have been produced without steel fibers ($f_c = 30.0$ MPa), with longitudinal reinforcement ratio ($\rho_{l,t} = 0.91\%$), and transverse reinforcement ($\rho_w = 0.11\%$), representative of practice applications. Four other HS-SFRC beams were produced with $f_c = 60.0$ MPa, $\rho_{l,t} = 0.39\%$ ($\approx 60.0\%$ suppression relative to reference beam), $\rho_w = 0.0\%$ (100.0% suppression) and fiber consume (C_f) alternating in 45,0, 60,0, 75,0 and 90,0 kg/m³. The behavior beams was analyzed from *load-displacement* and *moment-curvature* relations. The viability to design HS-SFRC beams with suppression conventional reinforcements was verified based on these results and material characterization tests, exposing equivalent mechanical behavior and some cases higher that of NS-RC beams.

Keywords

Concrete, High Strength Concrete, Steel Fibers, Beam.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 5.1 – Ligação da fibra com a matriz cimentícia do concreto. (Adaptada de HWANG <i>et al.</i> , 2013).	22
Figura 5.2 – Comportamento de fibras contra a abertura de fissuras. (Adaptada de HWANG <i>et al.</i> , 2013).	22
Figura 5.3 – Demonstração do ensaio de arracamento de fibras.	23
Figura 5.4 – Demonstração do ensaio de compressão diametral ou “ <i>Brazilian Test</i> ”.	25
Figura 5.5 – Teste de resistência à tração na flexão.	26
Figura 5.6 – Curva <i>tensão-abertura</i> de fissuras. (Adaptada de MONTAIGNAC <i>et al.</i> , 2012).	27
Figura 5.7 – Ensaio de resistência à flexão.	27
Figura 5.8 – Desenho esquemático do ensaio de flexão.	27
Figura 5.9 – Adição de fibras de aço no concreto através de esteira e dosador.	29
Figura 5.10 – Microestrutura de duas pastas de cimento <i>a/c</i> de 0,65 e 0,25. (Adaptada de AITCIN, 2003).	30
Figura 5.11 – Demonstração do ensaio de tração na flexão em viga de concreto.	33
Figura 5.12 – Representação do ensaio de flexão em viga de concreto.	34
Figura 5.13 – <i>Momento-curvatura</i> em vigas de CA-ER expostas à flexão. (Adaptada de PENDYALA <i>et al.</i> , 1996).	35
Figura 5.14 – Desenho esquemático do ensaio de flexão. (Adaptada de KAZEMI <i>et al.</i> , 2017).	40
Figura 5.15 – Desenho esquemático do ensaio de flexão (cotas em mm). (Adaptada de YANG <i>et al.</i> , 2010).	43
Figura 5.16 – Modelo de flexão para vigas de concreto. (Adaptado de <i>Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)</i>).	49
Figura 6.1 – Apresentação do reforço convencional das vigas de CRFA-ER(cotas em mm)..	52
Figura 6.2 – Fibra de aço <i>Dramix® 3D 65/60</i>	53
Figura 6.3 – Esquema de instrumentação do deslocamento (cotas em mm).	53
Figura 6.4 – Esquema de instrumentação das deformações (cotas em mm).	54
Figura 6.5 – Elementos do sistema de ensaio.	55
Figura 6.6 – Apresentação esquemática do sistema de ensaio (cotas em mm).	55

Figura 6.7 – Comportamento dos concretos à compressão	57
Figura 6.8 – Comportamento dos concretos à flexão	58
Figura 6.9 – Análise da resistência das vigas	63
Figura 7.1 – Comportamento das vigas	65
Figura 7.2 – Representação das fissuras das vigas	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Mistura e propriedades mecânicas das vigas.	38
Tabela 5.2 – Valor do G_F medido a partir das vigas testadas em todas as misturas.	40
Tabela 5.3 – Propriedades das misturas.	41
Tabela 5.4 – Propriedades das vigas.	42
Tabela 5.5 – Proporção de materiais na mistura do concreto em relação ao peso.	43
Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas do concreto.	43
Tabela 5.7 – Proporções das misturas dos concretos.	44
Tabela 5.8 – Propriedades das fibras de aço – Tipo <i>hooked</i>	45
Tabela 5.9 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.	45
Tabela 5.10 – Proporção das misturas do concreto.	46
Tabela 5.11 – Propriedades das fibras de aço.	46
Tabela 5.12 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.	47
Tabela 6.1 – Resumo das características das vigas.	52
Tabela 6.2 – Materiais constituintes e dosagem dos concretos	56
Tabela 6.3 – Resumo do ensaio de compressão	58
Tabela 6.4 – Resumo do ensaio de flexão	59
Tabela 6.5 – Propriedades dos aços dos reforços	60
Tabela 6.6 – Resumo da estimativa da resistência à flexão.....	61
Tabela 6.7 – Resumo da estimativa da resistência ao cisalhamento	62
Tabela 7.1 – Resumo da relação <i>carga-deslocamento</i>	67
Tabela 7.2 – Resumo da relação <i>momento-curvatura</i>	67
Tabela 7.3 – Ilustração do processo de fissuração.....	70
Tabela 7.4 – Classificação da ruína das vigas	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação entre água e cimento
b_w	Largura da viga
CA-RN	Concreto armado de resistência normal
CA-ER	Concreto armado de elevada resistência
CRFA-ER	Concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço
cm	Centímetros
CMOD	Deslocamento de abertura de fissura
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
d_f	Diâmetro das fibras
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_{cs}	Módulo de deformação secante
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangente inicial
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
$f_{ct}; f_{ctm}$	Resistência média à tração do concreto
f_{LP}	Tensão do limite de proporcionalidade do concreto
f_{MOR}	Módulo de ruptura
$f_{Ri(1,4)}$	Resistência do concreto à compressão residual
f_t	Resistência do concreto à tração
f_{us}	Tensão última da armadura
$f_y; f_{ys}$	Tensão de escoamento do aço
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
G_F	Energia de fratura
GPa	GigaPascal
kg	Quilograma
kN	QuiloNewton
h	Altura da viga
L	Comprimento da viga
l	Litro

l_a	Comprimento do embutimento das fibras no lado mais curto
L_{ch}	Comprimento característico da fissura
l_f	Comprimento das fibras
l_f/d_f	Fator de forma das fibras
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
m_R	Momento resistente da viga
NBR	Norma Brasileira
pol	Polegadas
V_f	Relação volumétrica de fibra
w_{cr}	Largura da fissura
%	Porcentagem
ϕ	Diâmetro
ν	Coefficiente de Poisson
λ	Fator de modificação
ε_c	Deformação do concreto
ε_s	Deformação do aço
δ_{MOR}	Deflexão no pico de carregamento
ρ	Taxa de armadura
P_{max}	Carga máxima na flexão
P_{cr}	Carga correspondente ao início de fissuração
T	Tenacidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL	17
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. METODOLOGIA DO TRABALHO	18
4. JUSTIFICATIVA	19
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
5.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)	20
5.1.1. Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado fresco	21
5.1.2. Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado endurecido	21
5.1.2.1. Resistência à compressão	23
5.1.2.2. Resistência ao cisalhamento	24
5.1.2.3. Resistência à tração direta	24
5.1.2.4. Resistência à tração indireta	25
5.1.2.5. Resistência à tração na flexão	25
5.1.2.6. Resistência à flexão	26
5.1.3. Mistura do concreto reforçado com fibras de aço	28
5.2. CONCRETO ARMADO DE ELEVADA RESISTÊNCIA (CA-ER)	29
5.2.1. Propriedades do concreto armado de elevada resistência	30
5.2.1.1. Resistência à compressão	30
5.2.1.2. Resistência ao cisalhamento	31
5.2.1.3. Resistência à tração	32
5.2.1.4. Resistência à tração na flexão	33
5.2.1.5. Resistência à flexão	33
5.2.1.6. Módulo de elasticidade.....	35
5.2.1.7. Coeficiente de Poisson	36
5.3. VIGAS DE CONCRETO DE ELEVADA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA-ER)	37
5.3.1. BIOLZI e CATTANEO (2017)	37
5.3.2. KAZEMI <i>et al.</i> (2017)	39
5.3.3. MONTAIGNAC <i>et al.</i> (2012)	41

5.3.4. YANG <i>et al.</i> (2010)	42
5.3.5. YOO <i>et al.</i> (2015)	44
5.3.6. YOO e YOON (2015)	46
5.4. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO	47
5.4.1. <i>Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)</i>	47
6. PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
6.1. METODOLOGIA DO ENSAIO	51
6.1.1. Característica das vigas	51
6.1.2. Instrumentação	53
6.1.3. Sistema de ensaio	55
6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	56
6.2.1. Concreto	56
6.2.2. Aço	60
6.2.3. Fibra de aço	60
6.3. ESTIMATIVA DO MODO DE RUÍNA.....	61
6.3.1. Resistência à flexão	61
6.3.2. Resistência ao cisalhamento.....	62
6.3.3. Estimativa do modo de ruína.....	62
7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	64
7.1. ANÁLISE DA RELAÇÃO CARGA-DESLOCAMENTO E MOMENTO-CURVATURA	64
7.2. MODO DE RUÍNA.....	68
8. CONCLUSÕES	71
8.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

Na indústria da construção civil, o material mais utilizado é o concreto convencional, constituído de aglomerante, agregados naturais, água e aditivos, visto que este propõe baixo custo e possui a capacidade do mesmo acomodar-se sobre as fôrmas moldando-se de acordo como desejado em projeto, desde que estas não sejam muito esbeltas e repletas de armaduras.

O concreto convencional apresenta algumas desvantagens como retração plástica, pouca ductilidade, e permeabilidade quando presente em ambientes úmidos, propiciando o surgimento de patologias diversas. Tendo em vista a resolução destes casos, diversas pesquisas foram realizadas acarretando em concretos com aditivos, com armadura protendida, concreto alto-adensável e os reforçados com fibras, entre outros, que desempenham melhores propriedades que aquelas pertencentes ao concreto convencional.

Dentre os tipos de concretos citados, destacam-se os reforçados com fibra. Sendo que estas podem ser sintéticas, de aço, minerais e naturais. O concreto reforçado com fibras de aço é um material composto por aglomerante, agregados, água e fibras de aço adicionadas como último item da mistura durante o processo de confecção do concreto. Este tipo de concreto vem sendo utilizado em várias obras como pavimentos, revestimento de túneis, pisos industriais, estruturas expostas a ambientes úmidos, entre outras.

As fibras de aço dispõem-se, de modo aleatório na matriz do concreto suportando as fissuras formadas neste, agindo como forma de costura, favorecendo maior ductilidade ao concreto após a fissuração, quando bem aderidas à matriz cimentícia. Diversos autores corroboraram que as fibras de aço beneficiam inúmeras propriedades do concreto armado, dentre estes estão BARROS e FIGUEIRAS (1999), BENCARDINO *et al.* (2008), DELUCE e VECCHIO (2013), WANG *et al.* (2010), entre outros. Segundo LEE *et al.* (2015), o CRFA demonstra aumento significativo na tenacidade.

Segundo a NBR 12655 (2015), o concreto de elevada resistência (CA-ER) é aquele que apresenta resistência à compressão superior a 50 MPa, observando o disposto na NBR 8953 (2015). O CA-ER possui outras propriedades como boa trabalhabilidade, maior resistência a elevadas temperaturas, ductilidade, entre outras, que contribuem para o crescimento de sua

utilização no setor da construção civil. Este tipo de concreto fornece vantagens econômicas e estruturais como: menores dimensões das seções dos elementos de concreto, pouco índice de porosidade e permeabilidade, elevada resistência, menor custo de manutenção, maiores resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, além de outras propriedades como boa trabalhabilidade, maior resistência a elevadas temperaturas, entre outras.

As fibras de aço podem ser aplicadas no concreto de elevada resistência, acarretando valores maiores para as propriedades deste concreto. Segundo ACI 544.1R-96 (1996), o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta maior ductilidade e tenacidade.

Buscando analisar as características do concreto de elevada resistência ($f_c > 50$ MPa), diversos estudiosos têm realizado experimentos com peças estruturais (vigas, lajes) confeccionadas com concreto com resistência à compressão maior que 50 MPa, com o objetivo de definir as propriedades deste tipo de concreto.

Pesquisadores como BIOLZI e CATTANEO (2017), KAZEMI *et al.* (2017), MONTAIGNAC *et al.* (2012), YANG *et al.* (2010), YOO *et al.* (2015), YOO e YOON (2015), entre outros, vem realizando estudos sobre o comportamento do concreto armado de elevada resistência reforçado com fibras de aço (CRFA-ER), tendo em vista que as mesmas contribuem para a melhoria das propriedades do concreto.

Deste modo, revela-se agora o intuito da presente exploração. Para o momento, buscou-se produzir informações experimentais que oportunizassem discutir a viabilidade técnica de se suprimir, parcialmente ou totalmente, os reforços convencionais das vigas em concreto armado de resistência normal (CA-RN) a partir da utilização de CRFA-ER.

A proposta sugerida pode prefigurar contraproducente quanto ao aspecto financeiro, visto que o custo do CRFA-ER é superior ao do CA-RN. Todavia, memora-se que as propriedades do CRFA-ER podem ser suficiente, em termos da eficácia da aderência interfacial *fibra-concreto*, para avaliar supressões potencialmente expressivas nos reforços convencionais das vigas em CA-RN. Essa condição, então, firmaria, ou pelo menos corroboraria, a almejada viabilidade financeira.

Para realizar a análise de viabilidade técnica, projetaram-se ensaios de flexão em cinco vigas, sendo uma de referência e quatro em CRFA. A dimensão dessas peças foi de 150x300x2700 mm³. A intenção do experimento foi avaliar a possibilidade de suprimir o reforço convencional, tanto longitudinal como o transversal, de vigas em CA-RN a partir do emprego de CRFA-ER. A classe de resistência da viga de referência, *FC30CF00*, foi de 30,0 MPa (28 dias de idade). Nessa viga, as taxas de reforço longitudinal tracionado ($\rho_{l,t}$) e transversal (ρ_w) foram de 0,91 e 0,11 %, respectivamente. Estes valores representam taxas usualmente empregadas nos projetos da construção civil de vigas em CA. Nas vigas em CRFA, especificamente CRFA-ER, a classe de resistência foi de 60,0 MPa (28 dias de idade) e as taxas de armaduras foram $\rho_{l,t} = 0,39$ % e $\rho_w = 0,0$ %. Sob estas condições, praticaram-se supressões de $\approx 60,0$ % no reforço longitudinal e 100,0 % no transversal, comparativamente à viga de referência. O consumo de fibras, C_f , figurou a variável do estudo, alternando em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³. Essa variação foi considerada representativa das aplicações estruturais usando CRFA.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o concreto reforçado com fibras de aço, e suas propriedades mecânicas; o concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço e suas principais características. Além de desenvolver vigas de CA-RN e CRFA-ER, analisando-as mediante o ensaio de flexão em quatro pontos e com base nos resultados obtidos, discutir a possibilidade de utilizar somente fibras de aço como reforço à flexão e cisalhamento em vigas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo tem como objetivos específicos os seguintes itens:

- Apresentar o concreto reforçado com fibras de aço e suas principais propriedades;
- Apresentar o concreto de elevada resistência e o concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço, além das suas propriedades;
- Desenvolver o programa experimental formado por 05 vigas, sendo uma de referência, sem fibras, com f_c de 30 MPa e quatro em CRFA. Nas vigas em CRFA, especificamente CRFA-ER, f_c de 60,0 MPa e $\rho_{l,t} = 0,39 \%$ e $\rho_w = 0,0 \%$. Nesta abordagem, o consumo de fibras C_f adicionado à massa de concreto varia em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³ e resistência dos concretos variável, com supressão de aproximadamente de 60% do reforço convencional tracionado e 100% do reforço transversal.
- A partir dos resultados obtidos, avaliar a contribuição das fibras de aço no comportamento à flexão de vigas, considerando a possibilidade de utilizar somente fibras de aço como reforço à flexão e cisalhamento de vigas de concreto armado.

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Esta dissertação caracteriza-se como qualitativo e experimental, sendo elaborada mediante pesquisas bibliográficas, utilizando dados expostos em publicações de nível internacional para embasar a apresentação das características do concreto reforçado com fibras de aço na composição de estruturas. Além disso, foram moldadas uma viga de concreto armado e quatro vigas de CRFA com consumo de fibras de 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³ e seus respectivos corpos de prova prismáticos e cilíndricos, que foram ensaiados à flexão e compressão para obter os registros de tensão, deslocamento e deformação.

As vigas de concreto possuem seção invariável de 150x300x2700 mm³ e resistências à compressão de 30 MPa para a viga de referência e 60 MPa para as vigas de concreto reforçado com fibras de aço. Estas foram submetidas aos ensaios de flexão em quatro pontos, para averiguar o padrão de fissuração que estas apresentam e como a adição das fibras contribui para o melhor desempenho do concreto. Os corpos de prova referentes às vigas consistem em 12 CP's cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) e 12 prismáticos (150x150x600 mm³), os quais foram analisados seguindo às recomendações do RILEM TC 148-SSC (1997) e RILEM TC 148-SSC (2000) para os ensaios de compressão axial e do RILEM TC 162-TDF (2002) nos ensaios de flexão.

Os ensaios pretenderam, em geral, ressaltar a influência do reforço das fibras de aço e da classe de resistência do concreto no comportamento à flexão de vigas em concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). O consumo de fibras C_f adicionado à massa de concreto varia em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³ e resistência dos concretos variável, com supressão de aproximadamente de 60% do reforço tracionado e 100% do reforço convencional transversal. Importa informar que esse programa foi concebido, na sua totalidade, no *Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (LEC/UFGPA)*.

4. JUSTIFICATIVA

Em todas as grandes cidades a indústria da construção proporciona diversos tipos de edificações residenciais e comerciais, que se caracterizam pelo método construtivo no qual a estrutura destas envolve o concreto e aço. Todavia, a utilização de aço nas estruturas (pilares, vigas, lajes, reservatórios) constitui item de grande valor monetário na construção.

Pesquisadores, visando não somente a redução de custos, mas também as melhorias da qualidade e das propriedades técnicas do concreto iniciaram há muitas décadas o estudo de diversos métodos e materiais para serem utilizados na composição do concreto, dentre eles destacando-se a aplicação de fibras.

As fibras adicionadas ao concreto podem elevar as principais propriedades características do mesmo, a saber, o aumento da capacidade deste absorver energia, seu controle da fissuração, a resistência às ações de fadiga e de impacto e sua ductilidade.

Dentre essas se destacam as fibras de aço, para expor seus benefícios quanto à aplicação na confecção do concreto armado de elevada resistência, propondo a possibilidade de suprimir os reforços convencionais longitudinais e transversais em vigas. Em tempo oportuno, este estudo aborda de forma experimental a viabilidade da supressão destes reforços, mediante a adição de fibras de aço em vigas de CA-RN e CRFA-ER.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

O concreto sem armadura ou simples é um material definido como quebradiço, frágil, tendo pouca resistência e baixa capacidade de alongamento quando submetido a esforços de tração. Em contrapartida, o concreto armado possui resistência maior que o concreto simples, devido à utilização de armadura de aço, a qual trabalha como reforço atuando na região tracionada permitindo que este possua melhores condições somadas à sua grande resistência à compressão (f_c). Além de armaduras de aço, podem-se adicionar ao concreto armado fibras diversas para que estas atuem como reforço das propriedades do concreto.

Diferentes tipos de fibras podem ser usados para reforços em concreto armado, dada a sua escolha pelo destino de sua aplicação e pelas necessidades do cliente, tendo em vista satisfazer os requisitos técnicos construtivos e econômicos. De acordo com ACI 544.1R-96 (1996), existem diversos tipos de fibras, sendo estas de aço, materiais naturais, minerais (vidro) e sintéticas. Para efeito de estudo, aborda-se o concreto reforçado com fibras de aço.

Mediante tais características, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) emergiu como uma variável capaz de atingir ductilidade durante a tensão e pós-pico de compressão, além do aumento nas propriedades mecânicas e durabilidade, e redução dos custos na montagem da estrutura.

Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) trata-se de um material composto com propriedades e vantagens específicas, devido à inclusão do componente fibra de aço na sua mistura, permitindo que este apresente resistências similares à do concreto armado tradicional.

A adição de fibras de aço ao concreto armado tem por objetivo atuar como reforço estrutural, através da diminuição de barras de aço nas diversas aplicações destas em componentes estruturais, por exemplo, vigas e lajes, reduzindo a quantidade de mão de obra necessária à confecção e montagem das armaduras de aço, permitindo o favorecimento da economia no custo e no tempo de execução da estrutura, e consequentemente, da obra em que será utilizada, além de proporcionar ao concreto maior resistência a fissuras e ductilidade.

5.1.1. Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado fresco

Concreto em estado fresco, nada mais é daquele que foi misturado recentemente, no qual ainda não ocorreu a “pega” do aglomerante, em outras palavras, o concreto tem sua matriz não solidificada. O concreto reforçado com fibras de aço em seu estado fresco, segundo ACI 544.1R-96 (1996), tem diversas propriedades que recebem a influência das proporções da matriz, aderência entre a fibra e esta, além do volume da fibra e da geometria da fibra.

De acordo com ACI 544.1R-96 (1996), o grau de consolidação da mistura do concreto influencia a resistência e outras propriedades do material endurecido. Deste modo, para melhor avaliação inicial da funcionalidade destes, devem ser realizados os testes “*Vebe consistometer*” e “*inverted slump-cone time*”, ao invés do “*Slump Test*” convencional.

Além dessas afirmativas, ACI 544.1R-96 (1996) salienta que se deve vibrar o concreto reforçado com fibras de aço para evitar que ocorra a formação de aglomerados de fibras na pasta do concreto, as quais surgem quando se aplica fibras com proporção de volume maior que 100. Em contrapartida, fibras com proporção de volume inferior a 50 tendem a não formar este aglomerado de fibras, causado por vários fatores tais como: as fibras estarem aglutinadas durante o lançamento; adição de fibras antes dos demais componentes formadores do concreto; elevado volume de fibras; falhas mecânicas do misturador onde foi confeccionado o concreto.

5.1.2. Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado endurecido

Concreto endurecido é aquele cujo processo de “pega” do aglomerante ocorreu, solidificando o material. A utilização de fibras de aço com maiores proporções de volume é capaz de reforçar as propriedades do concreto endurecido, por exemplo, na ductilidade do mesmo, pois tem melhor aderência entre a matriz de concreto e a fibra, como denota a Figura 5.1.

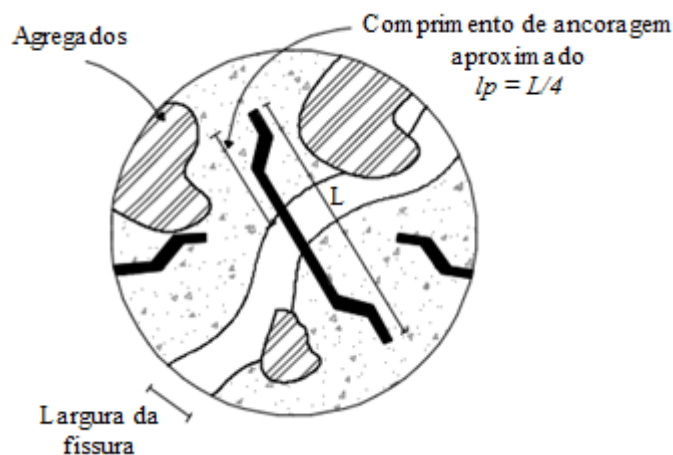


Figura 5.1 – Ligação da fibra com a matriz cimentícia do concreto. (Adaptada de HWANG *et al.*, 2013).

Como mencionado anteriormente, a utilização de fibras com grandes proporções, pode causar a formação do aglomerado destas enquanto o concreto ainda permanece fresco. Deste modo, é de suma importância executar vibração no concreto para dispersão das fibras em seu interior.

O concreto é um material que pode sofrer com o surgimento de fissuras, provenientes da concentração de tensões resultantes no mesmo, e consequentemente, estas fissuras impedem a transferência de tensões no corpo da peça solicitada, conforme ilustra a Figura 5.2.

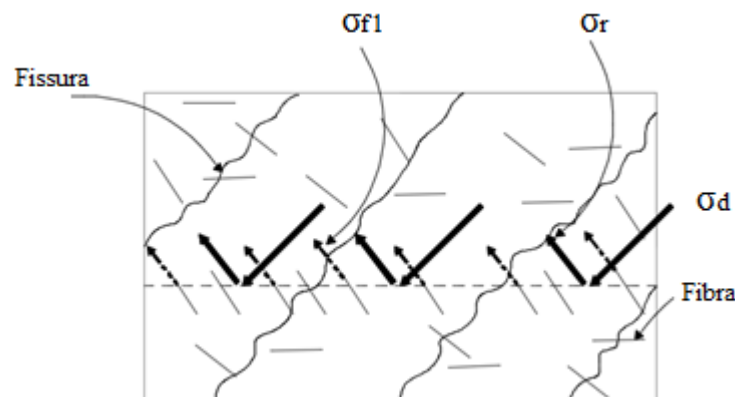


Figura 5.2 – Comportamento de fibras contra a abertura de fissuras. (Adaptada de HWANG *et al.*, 2013).

As melhorias na ductilidade do concreto reforçado com fibras de aço dependem da porcentagem de volume e do tipo de fibras presente no concreto. Isto pode ser avaliado, em termos de resistência das fibras, executando o ensaio de arrancamento, através da análise do resultado obtido após o rompimento da união entre a fibra e a matriz do concreto, observando se ocorreu o comportamento dúctil ou quebra das fibras, como demonstrado na Figura 5.3 a seguir.

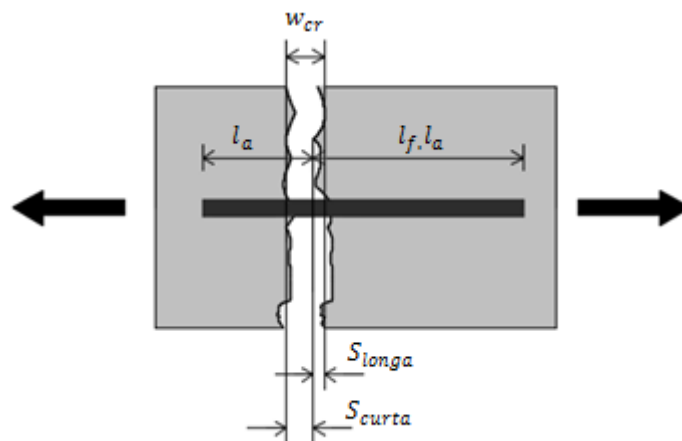


Figura 5.3 – Demonstração do ensaio de arracamento de fibras. (Adaptada de LEE *et al.*, 2011).

Segundo ACI 544.1R-96 (1996), as fibras de aço são capazes de melhorar a ductilidade de concreto em vários aspectos, mas sua atuação em relação à aplicação de forças pode variar entre compressão, flexão, tensão, cisalhamento e torção.

5.1.2.1. Resistência à compressão

De acordo com THOMAS e RAMASWAMY (2007), a adição de fibras de aço ao concreto proporciona um pequeno aumento inferior a 10% na resistência à compressão, módulo de elasticidade, e coeficiente de Poisson, nos testes feitos em concreto de 35, 65 e 85 MPa, e colabora com aumento de 40% na resistência à tração, e módulo de ruptura para os mesmos concretos ensaiados.

Segundo ACI 544.4R-18 (2018), a resistência à compressão do concreto sofre a influência das fibras de aço de modo variado, ocorrendo aumentos insignificantes na maioria dos casos em torno de 23% para concreto contendo 2% de volume de fibras e com $l_f/d_f = 100$, agregado com 3/4 polegadas (19 mm) de tamanho máximo, para testes realizados em cilindros de 150x300 mm.

LEE *et al.* (2015), realizaram um estudo no qual ensaiaram cilindros de concreto reforçados com fibras de aço, a fim de avaliar o comportamento destas mediante a ação de forças, através do ensaio de compressão. Para isto, tornou-se essencial medirem a resistência à compressão do CRFA aplicando as equações de EZELDIN, BALAGURU (1992), HSU e HSU (1994), MANSUR *et al.* (1999) e NATARAJA *et al.* (1999).

Segundo LEE *et al.* (2015) os modelos propostos por EZELDIN e BALAGURU (1999) e NATARAJA *et al.* (1999), foram elaborados de acordo com os resultados dos testes feitos com fibras de aço trefiladas, resultando que seu método de avaliação tornou-se questionável para concreto com fibras de aço com ancoragem nas pontas. Todavia, nos modelos propostos por HSU e HSU (1994) e MANSUR *et al.* (1999), a resistência à compressão de CRFA é obtida com base na resistência à compressão do concreto sem fibras. LEE *et al.* (2015) afirmam ainda que o modelo proposto por HSU e HSU (1994) considera apenas algumas proporções volumétricas de fibras (0,50%, 0,75% e 1,00%), tornando limitada a utilização prática de seu método, tornando os modelos questionáveis, se realmente representam o efeito das ações das fibras de aço no comportamento do CRFA durante as forças de compressão.

De acordo LEE *et al.* (2015), seus resultados demonstraram que a resistência à compressão é alterada ou afetada pela proporção volumétrica das fibras aplicadas, assim como pelo fator de formas das mesmas, que correspondem ao número de fibras por unidade de volume de concreto, proporcionando maior resistência à compressão.

5.1.2.2. Resistência ao cisalhamento

Quanto à resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras de aço, HWANG *et al.* (2013), mediante suas análises afirmam que as fibras de aço contribuem em torno de 30% quando possuem a proporção volumétrica entre 1% e 1,5%.

ACI 544.1R-96 (1996), demonstra que a forma geométrica das fibras e o volume destas aplicadas no concreto, são capazes de aumentar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto. De modo que seria capaz de substituir os estribos, pois a sua distribuição no concreto, atua costurando internamente as fissuras, além de aumentar a resistência à tração do concreto e ao cisalhamento.

5.1.2.3. Resistência à tração direta

Segundo THOMAZ e RAMASWAMY (2007), valores maiores de resistência à tração do concreto reforçado com fibras de aço podem ser obtidos de acordo com a dosagem dos

materiais, a ligação das fibras na matriz cimentícia, a diferença no grau de compactação, taxa de carregamento adotada no ensaio de tração e a proporção volumétrica das fibras.

5.1.2.4. Resistência à tração indireta

A determinação da resistência à tração indireta do concreto reforçado com fibras de aço é dada pela realização de ensaio conhecido como “*Brazilian Test*”, idealizado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro e regido pela NBR 7222 (2011), no qual consiste em comprimir diametralmente o cilindro de concreto, solicitando-o até o rompimento, que ocorre verticalmente na região de aplicação das cargas, para que seja registrada a resistência à tração do cilindro. Dada às características de sua realização, este é denominado também de ensaio de compressão diametral, conforme demonstrado na Figura 5.4.

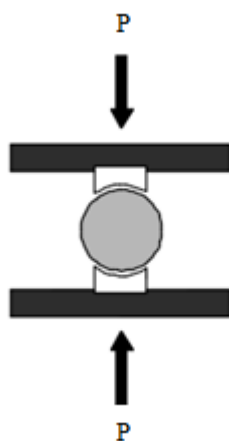


Figura 5.4 – Demonstração do ensaio de compressão diametral ou “*Brazilian Test*”.

5.1.2.5. Resistência à tração na flexão

A ASTM C 1550 (2008) determina o método de ensaio para determinar a resistência à flexão do concreto reforçado com fibras, analisando a absorção de energia no intervalo entre o início da carga e o pós-fissuramento, utilizando placa redonda de concreto apoiada em três eixos dispostos simetricamente, sendo submetida a uma carga pontual central.

Os primeiros testes com placa redonda semelhante ao estipulado pela ASTM C 1550 (2008) foram realizados em 1997, como análise sobre a influência dos apoios sobre o comportamento estrutural. As placas usadas no ensaio são redondas medindo $\phi 800 \times 75$ mm (diâmetro $\times$ espessura) apoiada sobre três pivôs dispostos a 750 mm, onde receberá o carregamento, a uma

taxa constante de 4 mm/min. A Figura 5.5 representa o teste de resistência à tração na flexão em uma peça redonda de concreto reforçado com fibras de aço.



Figura 5.5 – Teste de resistência à tração na flexão. FONTE: ASTM C 1550 (2008).

5.1.2.6. Resistência à flexão

Segundo MONTAIGNAC *et al.* (2012), o concreto reforçado com fibras de aço apresenta comportamento de resistência em torno 1,8 a 3,3 MPa após o pico de tensão até uma abertura de fissura de aproximadamente 1 mm. Deste modo, o CRFA possui maior resistência na flexão do que o concreto convencional, para as fissuras com aberturas que variam de 0,5 a 1,0 mm.

Além disso, a influência do volume da fibra é visível para cada tipo de mistura de concreto, onde fibras de aço com 60 mm de comprimento demonstraram melhor resistência após a fissuração do que as fibras com 35 mm, em virtude de possuírem maior comprimento de ancoragem na matriz do concreto, controlando melhor a propagação de fissuras. As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 a seguir, ilustram a realização do ensaio de resistência à flexão em quatro pontos em vigas de concreto armado.

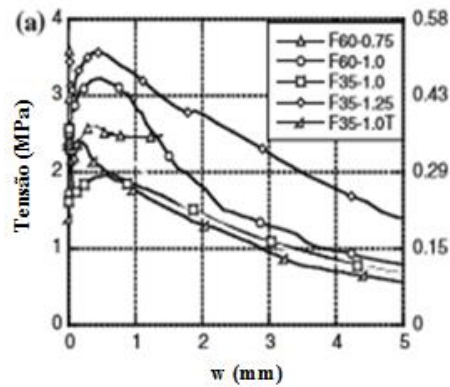


Figura 5.6 – Curva *tensão-abertura* de fissuras. (Adaptada de MONTAIGNAC *et al.*, 2012).

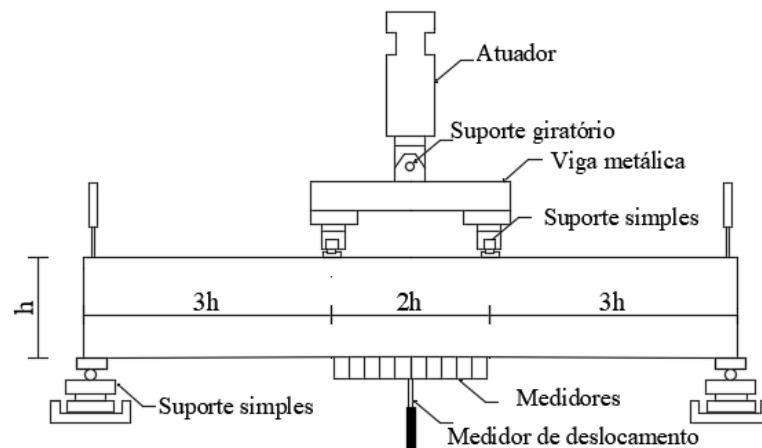
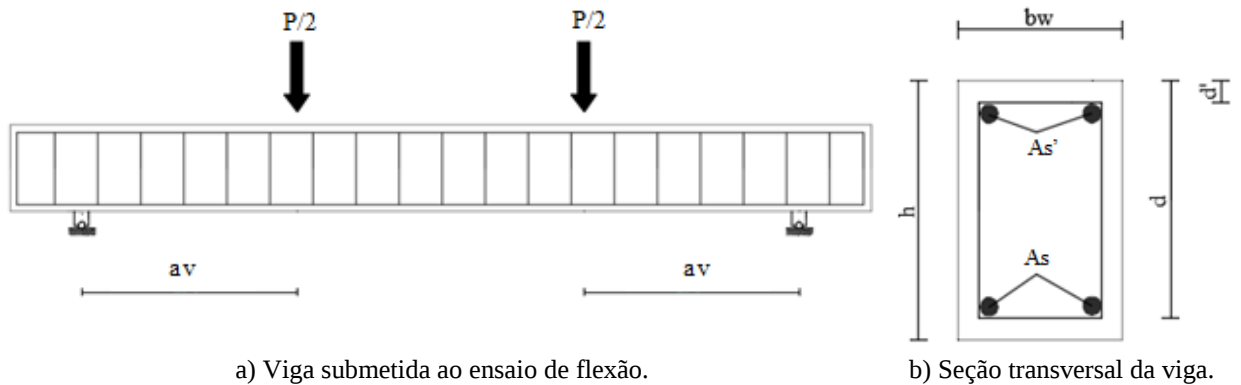


Figura 5.7 – Ensaio de resistência à flexão. (Adaptada de MONTAIGNAC *et al.*, 2012).



a) Viga submetida ao ensaio de flexão.

b) Seção transversal da viga.

Figura 5.8 – Desenho esquemático do ensaio de flexão.

De acordo com o ACI 544.1R-96 (1996), concretos reforçados com fibras de aço apresentam maior valor na resistência à flexão do que nas resistências à tração e compressão, devido à alteração na distribuição de tensões e deformações na seção transversal das vigas gerada pelo comportamento dúctil apresentado na zona tracionada de uma viga de CRFA submetida à flexão, denotando distribuição de tensões com comportamento plástico na zona tracionada e elástico na zona comprimida.

O ACI 544.4R-18 (2018) afirma que peças de CRFA apresentam comportamento pós-fissuração da análise *carga-deslocamento*, variando de acordo com a quantidade e o tipo de fibras adicionadas, e o produto resultante entre o volume de fibras (V_f) e o fator de forma das fibras (l_f/d_f) ocasiona acréscimos nos valores da resistência última à flexão do concreto reforçado com fibras de aço.

5.1.3. Mistura do concreto reforçado com fibras de aço

Como citado anteriormente, ao adicionar fibras de aço ao concreto, deve-se tomar cuidado para que estas sejam dispersas de modo uniforme por toda a mistura, a fim de que as mesmas atuem na extensão completa do material, proporcionando posteriormente a melhor atuação no combate ao surgimento de fissuras do concreto. As fibras de aço terão melhor aderência a matriz do concreto quando é adicionada no misturador após todos os demais componentes terem sido lançados, pois de modo contrário poderá ocasionar a formação dos aglomerados de fibras, resultando assim em regiões com ausência de fibras.

Segundo ACI 544.1R-96 (1996), na mistura de fibras, tem-se que levar em consideração o fator de forma destas, a porcentagem de volume de fibras, o seu tamanho máximo, granulometria dos agregados, e o método de adicionar fibras à mistura. Deste modo, a mistura da matriz de concreto com as fibras necessita obedecer ao roteiro seguinte:

1. Adicione as fibras de aço após o lançamento dos outros ingredientes do concreto, em uma taxa de 45,0 kg/min, com o misturador girando em máxima velocidade. Em seguida, reduzir a velocidade do misturador, de modo que desenvolva entre 40 a 50 revoluções.
2. As fibras de aço podem ser lançadas manualmente, através de esteira transportadora, ou outro transportador esvaziando sobre a esteira rolante, sendo dispersas ao longo desta para evitar aglomeração.
3. Devem-se adicionar as fibras sobre os agregados após a pesagem destes no dosador.



Figura 5.9 – Adição de fibras de aço no concreto através de esteira e dosador. FONTE: ACI 544.1R-96 (1996).

5.2. CONCRETO ARMADO DE ELEVADA RESISTÊNCIA (CA-ER)

O concreto de elevada resistência surgiu com o desejo de obter elementos de concreto armado com resistências elevadas, maior durabilidade e trabalhabilidade e maior resistência aos agentes agressivos do ambiente.

O concreto de elevada resistência teve o seu aperfeiçoamento graças ao desenvolvimento de aditivos químicos, que fornecem modificações em algumas propriedades do CA-ER, e a utilização de materiais pozolânicos, tendo em vista que a atuação conjunta destes dois produtos proporcionou a obtenção das características mecânicas desejadas.

O concreto de elevada resistência possui similaridades com o concreto de alto desempenho, pois os mesmos apresentam resistência à compressão maior que 40 MPa. ACI 363R-92 (1992) define concreto de elevada resistência (CA-ER) como o concreto que possui propriedades especiais de uniformidade e desempenho, sendo que estas não poderão ser obtidas mediante os métodos tradicionais de dosagem, tendo como destaque as seguintes propriedades: alta resistência mecânica, maior resistência à compressão, facilidade no lançamento e compactação do concreto, baixa permeabilidade, estabilidade volumétrica e a durabilidade.

Segundo LARRARD e SEDRAN (2002), concreto de elevada resistência é denominado na Europa como o aquele que possui elevada resistência à compressão na idade de 28 dias,

caracterizada por $f_c > 60$ MPa e baixo teor de água, ficando a relação água/cimento abaixo do valor de 0,40.

AITCIN (2003) afirma que a pasta de cimento com relação a/c igual a 0,65, é muito porosa, repleta de produtos hidratados e cristalizados, formados mediante a precipitação das partículas na mistura, enquanto que pasta de cimento com razão a/c de 0,25 é muito compacta e essencialmente composta de produtos hidratantes gelatinosos. Esta diferença na microestrutura do concreto proporciona variação no comportamento mecânico e de durabilidade na matriz cimentícia e na zona de transição entre os agregados e a mesma. A Figura 5.10 apresenta a microestrutura das pastas de cimento com relação a/c de 0,65 e 0,25, respectivamente.

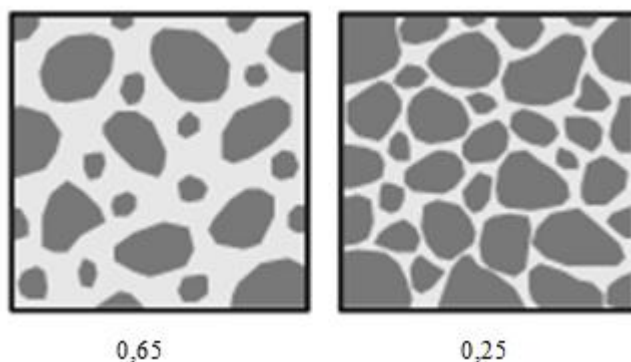


Figura 5.10 – Microestrutura de duas pastas de cimento a/c de 0,65 e 0,25. (Adaptada de AITCIN, 2003).

5.2.1. Propriedades do concreto armado de elevada resistência

5.2.1.1. Resistência à compressão

O concreto possui inúmeras propriedades, tendo como a resistência à compressão como a sua mais importante. Para avaliar a resistência à compressão de elemento estrutural, são realizados ensaios de compressão onde corpos de prova, curados com idade de 28 dias e dimensões de 150x300 mm, são submetidos ao carregamento até ocorrer o seu rompimento.

De acordo com MODEL CODE 197 (1990), o acréscimo no aumento na resistência de curta duração do concreto de elevada resistência, após a idade de 28 dias, é menor do que para os concretos comuns. Fato este, proveniente da ausência de água livre, o que permitiria uma hidratação posterior combinada com a limitação da capacidade dos agregados constituintes do concreto.

AITCIN (2003), afirma que em algumas áreas, a redução da relação água/cimento não é prática porque a resistência do concreto de elevada resistência não excederá a resistência à compressão do agregado, ainda que a matriz cimentícia aumente a sua compacidade e durabilidade do CA-ER. Deste modo, quando a resistência à compressão é definida pelo agregado graúdo, o modo necessário para obter maior resistência é utilizar um agregado mais forte.

Segundo a análise realizada por JIANYONG e YAN (2001), os ensaios de compressão nos corpos de prova de concreto de elevada resistência com dosagens diversas, apresentaram resistência à compressão na idade de 03 dias em torno de 63,8 e 69,3 MPa, e atingindo aos 28 dias a resistência à compressão variando entre 81,1 e 104,0 MPa, demonstrando que a dosagem do concreto e as características dos seus agregados são fundamentais para atingirem maiores resistências.

Para ZAIN *et al.* (2002), a resistência à compressão do concreto de elevada resistência depende principalmente da relação água/cimento (a/c), sofrendo influência também da mistura e do tempo de cura. Quanto menor esta relação, maior será o valor da resistência do concreto.

Para o CRFA-ER, CHAN *et al.* (2000) afirmam que as fibras de aço contribuem para o aumento de resistência a compressão do concreto de elevada resistência, onde apenas 1% de fibras de aço adicionadas ao concreto foi suficiente para elevar a resistência à compressão residual. Segundo SOLTANZADEH *et al.* (2015), o volume de fibras de aço (V_f) igual a 1,2 %, com fator de forma (l_f/d_f) de 0,35 adicionadas ao concreto de elevada resistência elevou a resistência à compressão aos 28 dias para 68 MPa, além de produzir tensão residual maior que 15 MPa, resistente a fissuras com larguras (w_{cr}) iguais a 1,5 mm.

5.2.1.2. Resistência ao cisalhamento

Segundo ACI 318R-19 (2019), a resistência ao cisalhamento é baseada em um esforço de cisalhamento na seção transversal do elemento estrutural de concreto. O cisalhamento em uma peça sem reforço é realizado pelo concreto, enquanto que em elementos com reforço de cisalhamento parte é fornecido por este e o restante pelo concreto.

De acordo com a NBR 6118 (2014), as tensões de cisalhamento em seções retangulares são definidas pela Equação 5.1 abaixo, onde V_{sd} é a força cortante de cálculo na seção do elemento estrutural e h é a altura total da seção transversal.

$$\tau_{wd} = \left(\frac{3 \cdot V_{sd}}{2 \cdot b_w \cdot h} \right) \leq \tau_{Rd} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde: V_{sd} é a força cortante; b_w é a base da viga; h é a altura da viga.

Conforme ACI 318R-19 (2019), o reforço de cisalhamento deve ser constituído por estribos perpendiculares ao eixo da peça estrutural. A resistência à tensão de cisalhamento do reforço não poderá exceder 413 MPa, exceto em projetos cuja resistência à deformação da malha de aço ultrapasse 551 MPa.

Para o CRFA-ER, SOLTANZADEH *et al.* (2015) afirmam que o comportamento de cisalhamento do concreto sofreu melhorias significativas mediante a aplicação de fibras de aço à sua matriz, tendo em vista que elevaram a ductilidade dos elementos estruturais e a resistência ao cisalhamento final obtendo valores médios de 14,5 MPa.

5.2.1.3. Resistência à tração

A resistência à tração trata-se de uma importante propriedade dos concretos, que contribui para o controle de fissuração e na ancoragem de armaduras, resistência ao cisalhamento, e outras.

De acordo com a análise realizada por JIANYONG e YAN (2001), os ensaios de tração nos corpos de prova de concreto de elevada resistência com dosagens diferentes, resultou em valores de resistência à tração para a idade de 03 dias variando entre 3,8 e 5,2 MPa, e para a idade de 28 dias observou-se que ocorreu a elevação da resistência à tração, obtendo valores em torno de 5,54 e 6,14 MPa, tendo como fator determinante desse acréscimo na resistência, a dosagem do concreto e as características dos seus agregados.

JIANYOONG e YAN (2001) denotam que para a produção de concreto de elevada resistência com elevada resistência à tração, deve ser utilizado cimento Portland com escória de alto forno e sílica ativa.

Segundo KHAN e LYNSDALE (2002), a adição de 10% de sílica ativa na mistura do concreto de elevada resistência contribui para o aumento de resistência à tração do concreto, levando em consideração a proporção água/cimento (a/c) de 0,40 e na idade de 90 dias.

Em concretos de elevada resistência reforçado com fibras de aço, THOMAS e RAMASWAMY (2007) e BIOLZI e CATTANEO (2017), afirmam que as fibras de aço contribuem para a obtenção de concretos com maiores valores de resistência à tração, sendo influenciada pelo tipo, volume e fator de forma das fibras. THOMAS e RAMASWAMY (2007), denotam que 1 a 1,5 % de fibras de aço elevam em 40% a resistência à tração nos concretos com resistências de 35, 65 e 85 MPa.

5.2.1.4. Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão do concreto de elevada resistência é regida pela NBR 12142 (2010), cujo ensaio é realizado em vigas de concreto armado de 15x15 cm com vão de 50 cm, submetidas a cargas aplicadas em cada um terço do vão, com taxa de carregamento de 0,9 a 1,1 MPa/min. A Figura 5.11 representa o sistema de ensaio.

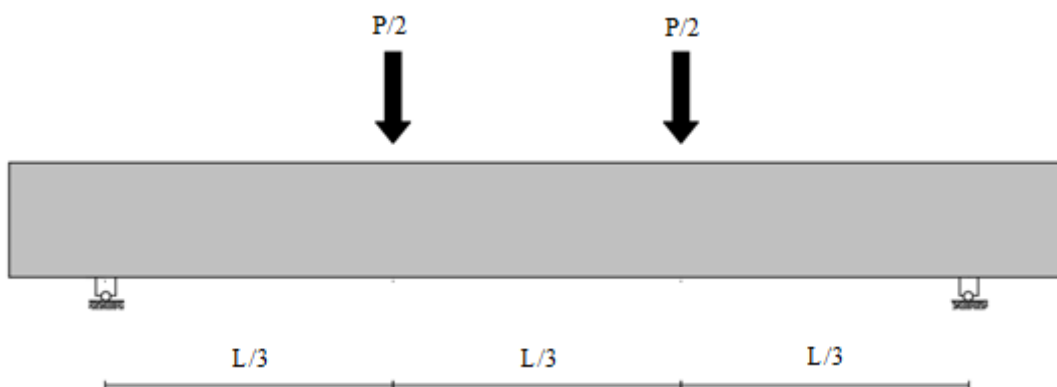
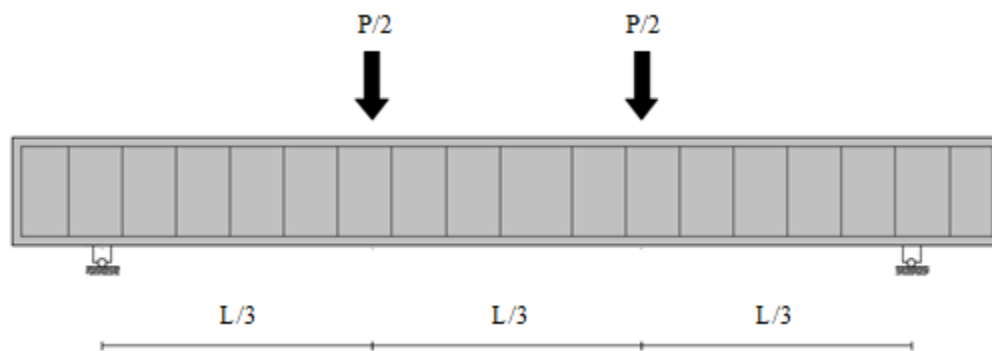


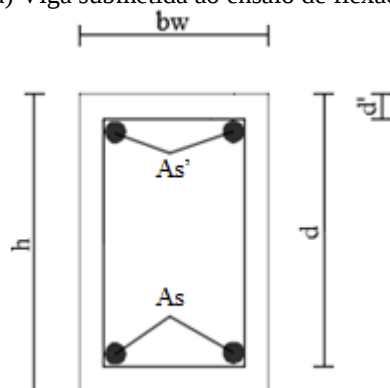
Figura 5.11 – Demonstração do ensaio de tração na flexão em viga de concreto.

5.2.1.5. Resistência à flexão

A resistência à flexão é importante como indicadores dos valores de resistência do concreto à tração. O ensaio de resistência à flexão está ilustrado na Figura 5.12 a seguir.



a) Viga submetida ao ensaio de flexão.



b) Seção transversal da viga.

Figura 5.12 – Representação do ensaio de flexão em viga de concreto.

Elementos de concreto quando submetidos à flexão apresentam deformações, e estas dependem de vários fatores como a taxa de armadura longitudinal tracionada e comprimida e a resistência do concreto.

PENDYALA *et al.* (1996) estudaram a ductilidade de vigas de concreto de elevada resistência sob ação de cargas de flexão, tomando como parâmetro a inclinação de relaxamento, definida como a rigidez negativa do ramo decrescente do diagrama *momento-curvatura* (Figura 5.13), onde a estrutura não suportará um aumento de carregamento, e compararam estas com as inclinações dos concretos de resistência comum, identificando que para o CA-ER as inclinações de relaxamento são maiores que o concreto comum.

O diagrama *momento-curvatura*, apresentado na Figura 5.13, expressa o comportamento de vigas de concreto de elevada resistência durante a ação de cargas de flexão, o qual denota um trecho linear elástico, um trecho plástico, e outro onde ocorre o relaxamento.

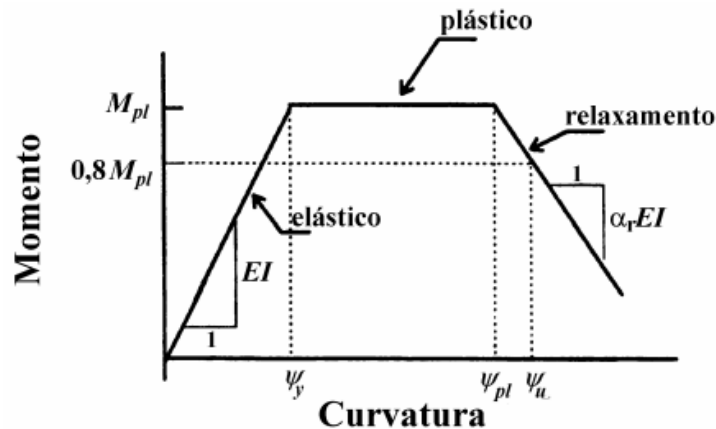


Figura 5.13 – *Momento-curvatura* em vigas de CA-ER expostas à flexão. (Adaptada de PENDYALA *et al.*, 1996).

No caso de concretos de elevada resistência reforçado com fibras de aço, BIOLZI e CATTANEO (2017) e KAZEMI *et al* (2017) afirmam que as fibras de aço melhoram as propriedades do concreto como ductilidade, resistência ao cisalhamento, compressão, tração e à flexão, e todas dependem do tipo, volume e fator de forma das fibras. A adição de 1% de fibras de aço na matriz cimentícia elevou a resistência à flexão do concreto de elevada resistência.

5.2.1.6. Módulo de elasticidade

Segundo ASTM C 469-02 (2002), os valores do módulo de elasticidade obtidos em ensaios são menores que os valores dos módulos resultantes de aplicações de carga rápidas. Em contrapartida, esses são maiores que os valores de módulos oriundos de atuações de cargas lentas, e em outras condições de ensaio apresentam os mesmos resultados. A NBR 8522 (2017) determina o método de ensaio para obtenção dos valores de módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}).

De acordo com a NBR 8522 (2017), módulo de deformação secante (E_{cs}) é a característica do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação, passando através de 02 pontos A e B, que correspondem à tensão σ_a e à tensão considerada no ensaio. Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) é considerado equivalente ao módulo de deformação secante entre σ_a e 30% do f_c , para o carregamento estabelecido neste método de ensaio. Segundo ACI 318R-19 (2019), define que o módulo de elasticidade do concreto pode ser obtido através da multiplicação $5000\sqrt{f_c}$.

A determinação do módulo de elasticidade do concreto é imprescindível para que haja o conhecimento das tensões e deformações relativas às ações do ambiente onde os elementos estruturais de concreto encontram-se, deste modo determinando os momentos atuantes, as tensões e deformações nas estruturas.

Em concretos reforçados com fibras de aço de elevada resistência (CRFA-ER), a norma japonesa JSCE 82 (2008), define que o módulo de elasticidade pode ser determinado pelo método de ensaio estático de elasticidade do concreto seguindo a norma JIS A 1149 (2017), e que seus resultados apresentam valores menores que o concreto comum. SOLTANZADEH *et al.* (2015), denotam que concretos reforçados com 1,2 % de fibras de aço podem atingir valores de 36 GPa.

Para THOMAS e RAMASWAMY (2007), concretos com f_c variando entre 65 e 85 MPa reforçados com 1 a 1,5 % de fibras de aço demonstram acréscimo de 10 % nos valores de seus respectivos módulos de elasticidade, tornando assim maiores que os módulos dos concretos comuns.

5.2.1.7. Coeficiente de Poisson

Coeficiente de Poisson (ν) é a razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal de um material que recebe carregamento axial. Para o concreto, os valores de Poisson variam entre 0,15 e 0,20. Segundo ACI 363R (1992), há uma limitação de dados experimentais referentes o coeficiente de Poisson para concretos de elevada resistência. Denotam ainda, que concreto de elevada resistência com resistência à compressão (f_c) no valor de 73 MPa possui coeficiente de Poisson de 0,20, independente da idade, resistência e teor de umidade, e que concretos com f_c variando de 55 a 80 MPa apresentaram valores de ν entre 0,20 e 0,28, além de que estes tendem a diminuir com o aumento da relação água/cimento.

Conforme ASTM C 469-02 (2002), o módulo de elasticidade e os valores do coeficiente de Poisson que varia de 0 a 40% da resistência máxima do concreto, são aplicados em estruturas reforçadas e não reforçadas, definindo o quanto de reforço é necessário e a tensão de cálculo.

Segundo a JSCE 82 (2008), o coeficiente de Poisson deve ser obtido mediante experimentos ou por meio de dados existentes, e que normalmente apresenta valores levemente superiores aos correspondentes ao concreto comum. De acordo com THOMAS e RAMASWAMY (2007), concretos com f_c de 65 MPa reforçados com fibras de aço apresentaram valores de 0,31 para coeficiente de Poisson, que são maiores que os obtidos nos concretos comuns.

5.3. VIGAS DE CONCRETO DE ELEVADA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA-ER)

De acordo com ACI 363R-92 (1992) o concreto de alta resistência (CA-ER) é aquele que possui propriedades especiais de desempenho. Tendo como destaque as seguintes propriedades: maior resistência à compressão; facilidade no lançamento, compactação do concreto; baixa permeabilidade e a durabilidade.

Segundo LARRARD e SEDRAN (2002), o concreto de elevada resistência é aquele que possui elevada resistência à compressão na idade de 28 dias, caracterizada por resistências maiores que 60 MPa ($f_c > 60$ MPa), possuindo também relação de água/cimento (a/c) abaixo do valor de 0,40.

A seguir serão apresentados estudos realizados por diversos autores sobre as características mecânicas do concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço.

5.3.1. BIOLZI e CATTANEO (2017)

Nesta pesquisa experimental foram analisados três tipos de concreto projetados para resistências à compressão (f_c), aos 28 dias, de aproximadamente 40, 75 e 90 MPa. Onde a resistência à compressão foi avaliada em 3 corpos de prova cilíndricos ($\phi=150$ mm e $h=300$ mm), a resistência à tração (f_t) do concreto simples mediante ensaios de compressão em cilindros com diâmetro de 100 mm e comprimento de 200 mm e a resistência à flexão em prismas de $150 \times 150 \times 600$ mm³, e também foram elaboradas 3 tipos de vigas com dimensões diferentes, sendo estas: S - $150 \times 300 \times 2400$ mm³; M - $150 \times 300 \times 2900$ mm³ e L - $150 \times 300 \times 3400$ mm³.

Ao todo, foram ensaiadas 36 vigas à flexão em três pontos de acordo com a norma UNI EN 14651 (2007), identificando nestas, a tensão associada ao deslocamento de abertura de fissura (CMOD) de 0,5 mm (f_{R1}) e de 2,5 mm (f_{R3}). Todos os espécimes do tipo B450C possuem reforço longitudinal de 2 ϕ 16 mm, e as demais vigas, reforço de cisalhamento de 2 ϕ 8 mm, onde a resistência média de reforço foi 522 MPa e de armadura transversal, 533 MPa.

Os concretos de alta resistência foram dosados com aditivos minerais de cinza volantes para aquele com a resistência característica de 75 MPa, e micro sílica adicionada à mistura do concreto com a resistência de 90 MPa.

Em cada tipo de concreto, foram utilizadas duas misturas, concreto simples e com fibras de aço do tipo *hooked* com baixo teor de carbono (40), que possui fator de forma (l_f/d_f) igual a 48 e uma resistência à tração de 1250 MPa; e alto teor (75 e 90), com fator de forma igual a 79 e uma resistência à tração de 2300 MPa e comprimento de 30 mm, correspondendo com volume de 1%. A Tabela 5.1 denota a mistura e as propriedades mecânicas das vigas analisadas.

Tabela 5.1 – Mistura e propriedades mecânicas das vigas.

Descrição	T40	T40F	T75	T75F	T90	T90F
Cimento CEM II - AL 42,5 R (kg/m ³)	300	300	---	---	---	---
Cimento CEM I - 52,5R (kg/m ³)	---	---	380	380	405	405
Cinza Volante (kg/m ³)	80	80	60	60	---	---
Micro sílica em suspensão de 50% (kg/m ³)	---	---	---	---	90	90
Areia + agregados (kg/m ³)	1870	1870	1905	1905	1920	1920
Superplastificante Sulfonato de naftaleno (l/m ³)	45	6,0	---	---	---	---
Água (l/m ³)	175	175	150	150	80	80
Fibras de aço com menor teor de C (kg/m ³)	---	50	---	---	---	---
Fibras de aço com alto teor de C (kg/m ³)	---	---	---	50	---	70
f_{cm} (MPa)	64,5	62,5	86,7	104,8	94,9	91,8
Desvio padrão (MPa)	4,7	4,4	9,8	0,6	7,7	7,3
f_{ctm} (MPa)	4,6	---	5,1	---	5,3	---
f_{cfm} (MPa)	6,85	11,70	8,03	12,30	7,41	12,04
f_{R1} (MPa)	---	10,40	---	11,70	---	11,26
f_{R3} (MPa)	---	5,50	---	6,76	---	6,7

FONTE: BIOLZI e CATTANEO (2017).

BIOLZI e CATTANEO (2017) neste estudo investigaram experimentalmente o comportamento de vigas de concreto de elevada resistência submetidas a cisalhamento e flexão, chegando à conclusão de que a adição de fibras de aço em vigas de concreto de elevada resistência proporcionou um importante aumento na resistência à flexão e ao cisalhamento.

Neste experimento, todas as vigas apresentaram comportamentos semelhantes até à fissuração, que logo após a esta, as vigas com fibras demonstraram reforço em sua resistência e também acréscimo na ductilidade e rigidez. As vigas reforçadas com fibras apresentaram fissuras principalmente localizadas na parte central da viga.

Segundo BIOLZI e CATTANEO (2017), a resistência ao cisalhamento do concreto de elevada resistência é menor em relação ao concreto armado de resistência normal, sendo melhorada com a aplicação do reforço com fibras de aço. BIOLZI e CATTANEO (2017) afirmam que a inclusão de fibras de aço em concreto de elevada resistência proporciona um acréscimo na resistência ao cisalhamento, tendo em vista que o comportamento das vigas ensaiadas por eles até a fissuração foi similar, quando utilizada a proporção de 1% de fibras sobre o volume de concreto.

5.3.2. KAZEMI *et al.* (2017)

Nesta análise foi investigado o comportamento de fissuração do concreto reforçado com fibras de aço, comparando-o com o concreto de alta resistência, realizando testes de flexão, segundo a RILEM FMC-50 (1985), em 54 vigas entalhadas. As vigas possuem dimensões de 100x100x840 mm³ e foram consideradas um total de 6 misturas de concreto contendo diferentes volumes de fibras de aço, sendo estes 0%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,8% e 1,6%. A Figura 5.14 representa o esquema de ensaio de flexão em três pontos.

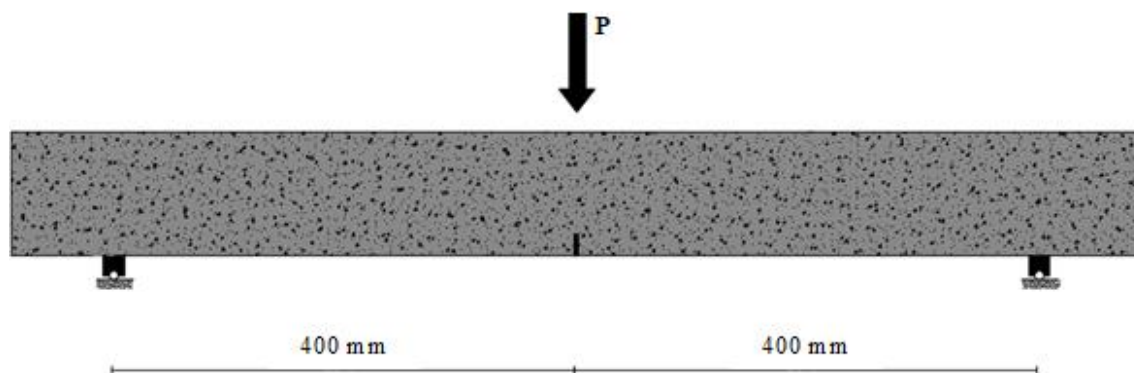


Figura 5.14 – Desenho esquemático do ensaio de flexão. (Adaptada de KAZEMI *et al.*, 2017).

KAZEMI *et al.* (2017), avaliaram as fissuras através dos métodos de trabalho da fissura (*Work of fracture method - WFM*) e método de efeito de tamanho (*Size effect method - SEM*), comparando os resultados dos métodos, denotando que o aumento do volume de fibras de aço adicionadas ao concreto proporciona maior energia de fratura (G_F) nos dois métodos, e também elevou a ductilidade do concreto.

Além destas, foram estudados a resistência à compressão, a resistência à ruptura e os módulos de elasticidade, sendo medidas por meio de uma prensa hidráulica, utilizando 18 espécimes prismáticos de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ e corpos de prova cilíndricos de 150 de diâmetro e 300 mm de altura, seguindo as orientações de ASTM C 496 (2011). A Tabela 5.2 apresenta as características das vigas, os valores médios de G_F e de resistência obtidos nos ensaios.

Tabela 5.2 – Valor do G_F medido a partir das vigas testadas em todas as misturas.

b_w (mm)	h (mm)	L (mm)	V_f (%)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	Média de G_F (J/m ²)	Média de L_{ch} (mm)
100	100	840	St. 0	85,52	3,83	38,1	117,7	306
100	100	840	St. 0,2	86,32	4,32	37,6	674	1358
100	100	840	St. 0,3	86,22	4,67	38,5	882	1557
100	100	840	St. 0,4	85,73	4,48	38,4	1343	2570
100	100	840	St. 0,8	87,07	5,03	38,2	2988	4511
100	100	840	St. 1,6	91,18	5,37	38,8	6871	9245

FONTE: KAZEMI *et al.* (2017).

KAZEMI *et al.* (2017) através dos estudos experimentais dos efeitos do teor de fibra de aço sobre as propriedades de vigas de concreto entalhadas de dimensões diferentes, concluíram que os valores de energia de fratura e comprimento característico de fissura medidos pelo método de efeito de tamanho (*SEM*) é aceitável para baixo volume de fibras de aço

adicionadas ao concreto de alta resistência, enquanto que no método trabalho da fissura (*WFM*) os resultados não são confiáveis quando utilizado maiores volumes de fibras. Além disso, a adição de fibras de aço contribui para o aumento da ductilidade das vigas de concreto, pois ocorreram maiores energias de fratura e comprimentos de fissura que evidenciam o comportamento dúctil.

5.3.3. MONTAIGNAC *et al.* (2012)

Nesta análise experimental objetivou-se a caracterização das propriedades de tração pós-fissuração do concreto reforçado com fibras de aço, utilizando 5 misturas diferentes de concreto com volumes de fibras que variam entre 0,75 a 1,25%, e realizando testes para obtenção da tensão uniaxial e resistência à flexão em vigas entalhadas, observando a fissuração nas mesmas. As vigas entalhadas possuem dimensões de 150x150x600 mm³, sendo submetidas ao ensaio de flexão em três pontos de acordo com a norma UNI EN 14651 (2007), identificando nestas, a carga aplicada na viga com a sua respectiva largura de fissura que ficaram em torno de 1 mm (w_{cr}). A Tabela 5.3 apresenta as características das misturas utilizadas no experimento.

Tabela 5.3 – Propriedades das misturas.

Descrição	F60-0,75	F60-1,0	F35-1,0	F35-1,0T	F60-0,75
Cimento (kg/m ³)	400 (25)	450 (25)	400 (25)	500 (31,25)	400 (25)
Água (kg/m ³)	176 (11)	198 (12,4)	176 (11)	208 (13)	176 (11)
Areia (kg/m ³)	920 (57,4)	854 (53)	913 (57)	867 (54,1)	907 (56,6)
Agregado (5/14 mm) (kg/m ³)	832 (51,9)	788 (49,2)	930 (51,2)	---	826 (51,6)
Agregado (2,5/10mm) (kg/m ³)	---	---	---	676 (42,2)	---
Superplastificante (kg/m ³)	7,3 (0,0055)	8,5 (0,064)	8,0 (0,06)	10,9 (0,082)	8,0 (0,06)
Viscosidade (kg/m ³)	0,185 (0,002)	2,28 (0,017)	0,23 (0,002)	---	0,92 (0,0)
Tipos de fibras	RC80/60	RC80/60	RC65/35	RC65/35	RC65/35
Volume (%)	0,75	1,0	1,0	1,0	1,25
Relação água/cimento	0,44	0,44	0,44	0,42	0,44
Relação areia/agregado	1,1	1,1	1,1	1,25	1,1

FONTE: MONTAIGNAC *et al.* (2012).

As fibras de aço utilizadas foram do tipo *hooked-end* nas misturas do concreto com dosagens de volume de fibras de 0,75, 1,0 e 1,25 %. A resistência à compressão foi medida através do

ensaio de compressão realizado em corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, definindo também segundo a norma ASTM C 1550 (2008), o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. A Tabela 5.4 apresenta as propriedades do concreto na compressão.

Tabela 5.4 – Propriedades das vigas.

Descrição	F60-0,75	F60-1,0	F35-1,0	F35-1,0T	F60-0,75
f_c (MPa)	58,2	63,2	46,9	46,9	56,1
E_c (GPa)	32,9	34,0	33,5	27,4	33,4
ν	0,22	0,25	0,23	0,24	0,24

FONTE: MONTAIGNAC *et al.* (2012).

MONTAIGNAC *et al.* (2012) concluíram neste estudo que a adição de fibras de aço contribuem para a elevação da resistência à tração do concreto após a ocorrência de fissuração. Durante os ensaios as vigas demonstraram maior rigidez à medida que a carga aplicada se aproximava do valor máximo estabelecido, e redução de carga quando a largura da fissura aumentava. Este comportamento de rigidez possui relação direta com o maior volume de fibras de aço utilizadas como reforço do concreto, que apresentou neste estudo resistências pós-fissuração relativamente elevada, variando em torno de 1,8 e 3,3 MPa nas fissuras com largura de abertura de aproximadamente 1 mm, que favorece no controle do surgimento de fissuras de w_{cr} de 3 mm.

MONTAIGNAC *et al.* (2012) denotam também que a aplicação de fibras de aço no concreto proporciona maior resistência à flexão, sendo esta dependente do volume e o tipo de fibra utilizadas, onde as fibras de aço com comprimento de 60 mm apresentam maior resistência pós-fissuração do que fibras de 35 mm, pois fibras mais longas possuem maior ancoragem na matriz cimentícia.

5.3.4. YANG *et al.* (2010)

Nesta pesquisa científica foi analisado o comportamento de vigas de concreto de elevada resistência reforçadas com fibras de aço submetidas ao ensaio de flexão. Foram ensaiadas 14 vigas de concreto reforçadas com fibras de aço, com dimensões de 180x270x2900 mm³ e V_f de 2% de fibras com a área de aço variando de 0 a 760,2 mm². A Figura 5.15, a seguir, apresenta o esquema de ensaio realizado.

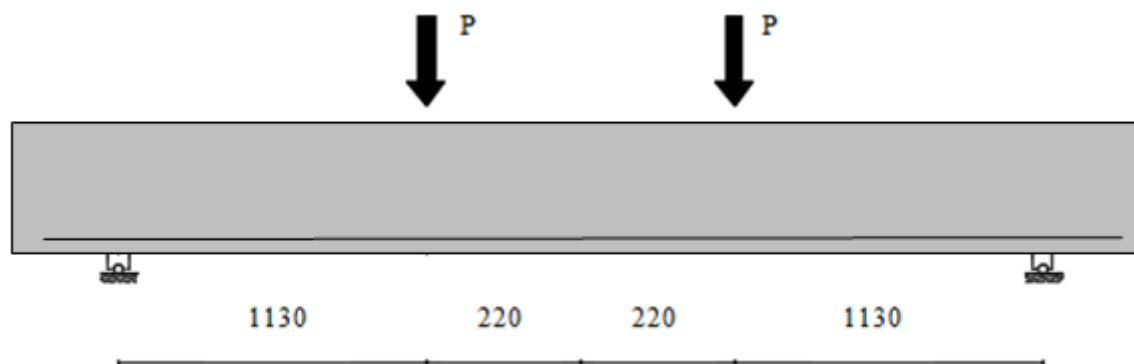


Figura 5.15 – Desenho esquemático do ensaio de flexão (cotas em mm). (Adaptada de YANG *et al.*, 2010).

YANG *et al.* (2010) afirmam que a adição de fibras de aço ao concreto de elevada resistência proporciona maior eficácia no controle de fissuras e comportamento dúctil. YANG *et al.* (2010) objetivando que o concreto apresentasse maior resistência à compressão e à tração utilizaram misturas de concreto com baixos valores da relação água/cimento, agregado finos preenchendo os vazios entre os agregados maiores, sílica ativa e fibras de aço. A Tabela 5.5 apresenta a proporção de materiais na mistura do concreto.

Tabela 5.5 – Proporção de materiais na mistura do concreto em relação ao peso.

Relação água/cimento	Cimento	Sílica ativa	Filler	Agregados finos	Aditivo	Fibras de aço
0,2	1,0	0,25	0,3	1,1	0,02	2%

FONTE: YANG *et al.* (2010).

Neste experimento foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, objetivando a caracterização da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de aço, identificando nestes o deslocamento axial dos cilindros por meio de transdutores de deslocamento. Através da curva *tensão-deformação* do concreto de elevada resistência YANG *et al.* (2010) calcularam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. A Tabela 5.6 lista os valores médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de cada lote.

Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas do concreto.

Descrição	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4
Resistência à compressão (MPa)	190,0	192,2	196,1	196,7
Módulo de Elasticidade (MPa)	46418	46680	45530	46818
Resistência à tração (MPa)	30,9	29,4	29,3	32,7

FONTE: YANG *et al.* (2010).

YANG *et al.* (2010) concluíram nesta pesquisa experimental sobre as características das vigas de concreto de elevada resistência reforçadas com fibras de aço que estas proporcionam maior eficácia no controle de fissuras e um comportamento dúctil com um índice de ductilidade variando entre 1,60 e 3,75, demonstrando que para este tipo de concreto o índice de ductilidade mantém um padrão de valores acima de 1,6. Este índice é a relação entre a abertura de fissura inicial e a deflexão última das vigas.

Segundo YANG *et al.* (2010), o concreto de elevada resistência reforçado com fibras de aço apresenta comportamento dúctil devido ao trabalho da armadura até à falha de flexão para vigas com os menores valores de área de aço. As relações entre abertura de fissura inicial e a deflexão das vigas sem armadura de aço variaram de 5,43 a 7,91, o que representa a ductilidade das fibras de aço, tendo em vista que suportaram de modo satisfatório no controle das fissuras. YANG *et al.* (2010) identificaram também que a capacidade de flexão também foi afetada pela forma de lançamento do concreto, mesmo para os casos onde as vigas possuíam mesma seção e disposição de armadura longitudinal, pois a orientação das fibras de aço é influenciada pelo método de lançamento de concreto, e esta orientação favorece o aumento da resistência do concreto.

5.3.5. YOO *et al.* (2015)

Nesta pesquisa experimental, YOO *et al.* (2015) analisaram o comportamento de flexão de vigas de concreto reforçado com fibra de aço sob a ação de carregamento quase estático e de impacto, utilizando vigas de concreto com resistência à compressão de 49, 90 e 180 MPa, reforçadas com fibras de aço, tipo *hooked*, com volume (V_f) de 0; 0,05; 1,0 e 2,0%. A Tabela 5.7 apresenta as proporções das misturas dos concretos utilizados no estudo.

Tabela 5.7 – Proporções das misturas dos concretos.

Descrição	NV	HSC	UHSC
Água (kg/m ³)	180	180	160
Cimento (kg/m ³)	360	680	789
Areia (kg/m ³)	---	---	867
Agregado fino (kg/m ³)	738	582	---
Agregado graúdo 19 mm (kg/m ³)	1108	872	---
Sílica ativa (kg/m ³)	---	102	197
Pó de sílica (kg/m ³)	---	---	237
Superplastificante (kg/m ³)	0,5	1,5	2,0

FONTE: YOO *et al.* (2015).

YOO *et al.* (2015) analisaram os efeitos do teor de fibra de aço nos comportamentos sob carregamento quase estático e de flexão durante cargas de impacto, adicionando volume de fibras de 0, 0,5, 1,0 e 2,0% para os concretos de mistura NC e HSC, e volumes de 0 e 2,0 % para mistura UHSC. As fibras usadas possuem diâmetro de 0,5 mm e um comprimento de 30 mm. As propriedades das fibras de aço estão denotadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Propriedades das fibras de aço – Tipo *hooked*.

d_f (mm)	l_f (mm)	Fator de forma (l_f/d_f)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade E_c (GPa)
0,5	30	60	7,85	1195,5	200

FONTE: YOO *et al.* (2015).

Os ensaios de compressão foram realizados em 10 corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, obtendo assim a resistência à compressão média e o módulo de elasticidade. Nos ensaios de flexão em quatro pontos foram utilizadas 10 vigas de 100x100x400 mm³, medindo as deflexões das vigas através de transdutores de deslocamento (LVDT's). A Tabela 5.9 demonstra os resultados obtidos nos ensaios de compressão.

Tabela 5.9 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.

Descrição	f_c (MPa)	E_c (GPa)	ε_{cu} (mm)
NC	49,21	29,90	0,00255
NC-0,5 %	39,14	28,67	0,00266
NC-1,0 %	40,77	28,64	0,00299
NC-2,0 %	40,61	29,23	0,00302
HSC	90,14	39,56	0,00269
HSC-0,5 %	90,76	38,45	0,00275
HSC-1,0 %	95,01	37,19	0,00284
HSC-2,0 %	96,54	38,95	0,00314
UHSC	179,88	46,00	0,00415
UHSC-2,0 %	190,94	47,23	0,00436

FONTE: YOO *et al.* (2015).

De acordo com YOO *et al.* (2015) a resistência à flexão, a capacidade de deflexão da viga, maior tenacidade do concreto e melhoria nos valores de resistências residuais foram obtidas através de maiores teores de fibras.

YOO *et al.* (2015) através de seus experimentos identificaram que a resistência à compressão, módulo de elasticidade e a capacidade de deformação sofrem influencia do teor de fibras adicionadas ao concreto. A capacidade de deformação elevou-se de modo significativo com o aumento do teor de fibra. Os ensaios de carregamentos quase estáticos demonstraram que com o aumento no teor de fibra elevaram os valores da resistência à compressão a resistência à flexão e a deflexão correspondente. Os ensaios de carregamento de impactos denotaram que a resistência do concreto à compressão aumentou com maiores valores de teor de fibras.

5.3.6. YOO e YOON (2015)

Nesta pesquisa experimental YOO e YOON (2015) estudaram 10 vigas de concreto de elevada resistência reforçadas com fibras de aço de comprimentos diferentes (l_f) de 13, 19,5 e 30 mm, para as fibras de aço lisas, e l_f de 30 mm para a fibra de aço torcida. O volume de fibras de aço adicionadas na mistura do concreto foi de 2 %, e as vigas foram divididas em espécimes com fibras de aço lisas (SX) e com fibras de aço torcidas (TX). A Tabela 5.10 denota as proporções de misturas do concreto e a Tabela 5.11 demonstra as propriedades das fibras de aço.

Tabela 5.10 – Proporção das misturas do concreto.

Descrição	UHPC sem fibras	UHPC com fibras
Água (kg/m ³)	165,5	160,3
Cimento (kg/m ³)	786,6	788,5
Areia (kg/m ³)	865,3	867,4
Sílica ativa (kg/m ³)	196,7	197,1
Pó de Sílica (kg/m ³)	236,0	236,6
Aditivo expansivo (kg/m ³)	59,0	---
Aditivo redutor de retração (kg/m ³)	7,0	---
Superplastificante (kg/m ³)	1,7	2,0

FONTE: YOO e YOON (2015).

Tabela 5.11 – Propriedades das fibras de aço.

Descrição	d_f (mm)	l_f (mm)	Fator de forma (l_f/d_f)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade E_c (GPa)
Fibra de aço lisa	0,2	13	65	7,9	2788	200
Fibra de aço lisa	0,2	19,5	97,5	7,9	2500	200
Fibra de aço torcida	0,3	30	100	7,9	2580	200
Fibra de aço torcida	0,3	30	100	7,9	2428	200

FONTE: YOO e YOON (2015).

Os ensaios de compressão foram realizados em 15 corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, visando obter a resistência à compressão média e o módulo de elasticidade. Nos ensaios de flexão em três pontos foram utilizadas 15 vigas de 100x100x400 mm³, medindo as deflexões das vigas através de transdutores de deslocamento (LVDT's). A Tabela 5.12 demonstra os resultados obtidos nos ensaios de compressão e de flexão.

Tabela 5.12 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.

Descrição	f_c (MPa)	ε_c' (mm/mm)	E_c (MPa)	f_{MOR} (MPa)	δ_{MOR} (mm)	$CMOD_{MOR}$ (mm)
NF	200,9	---	45265	8,18	0,0034	0,028
S13	211,8	0,00453	46732,5	19,26	0,54	0,66
S19,5	209,7	0,00484	46880,5	30,69	0,75	0,94
S30	209,7	0,00458	46772,9	31,91	1,57	2,06
T30	232,1	0,00528	46971,6	32,24	1,06	1,36

FONTE: YOO e YOON (2015).

Através dos estudos realizados, YOO e YOON (2015) concluíram que o uso de fibras de aço com reforço estrutural do concreto contribuiu no aumento da resistência à compressão e módulo de elasticidade, além de proporcionar melhor desempenho do concreto submetido à flexão, a resistência à flexão e capacidade de deflexão, melhorou significativamente a capacidade de carga, a rigidez pós-fissuração e a controle de fissuração, além do comportamento dúctil, e que estas melhorias recebem influências do tipo e do comprimento das fibras de aço. As fibras de aço de maiores comprimentos geraram resultados melhores na resposta do concreto na pós-fissuração e no seu comportamento dúctil.

5.4. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

Para dimensionamento do concreto de elevada resistência, há a necessidade de atender as exigências de projeto recomendadas nas normas internacionais. A seguir, apresentam-se as recomendações da *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)* para o dimensionamento de vigas de concreto armado de elevada resistência.

5.4.1. *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)*

De acordo com *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)*, as orientações de projeto para o concreto reforçado com fibras de aço submetidas à compressão são as mesmas para o

concreto armado. *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)* determina que a realização do ensaio de flexão em três pontos em vigas entalhadas de concreto reforçado com fibras de aço, objetivando analisar o comportamento destes elementos quando submetidos à tração.

Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012) define duas diretrizes constitutivas, denotadas pela relação tensão-abertura da fissura (σ - w), onde se tem a relação com comportamento perfeitamente plástico e a relação com comportamento pós-fissuração linear. Destas relações, surgem as resistências residuais f_{Fts} e f_{Ftu} , onde a primeira refere-se ao estado limite de serviço, e a segunda refere-se ao estado limite último. A resistência residual f_{Ftu} utilizada na relação perfeitamente plástica é dada pela Equação 5.2, a seguir.

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad \text{Eq. 5.2}$$

As resistências residuais f_{Fts} e f_{Ftu} usadas na relação pós-fissuração linear são definidas pelas Equações 5.3 e 5.4, expressas abaixo.

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_{cr}}{CMOD_3} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad \text{Eq. 5.3}$$

Sendo:

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R3} \quad \text{Eq. 5.4}$$

w_{cr} é o valor para abertura máxima de fissuras permitidas de acordo com o projeto. Adotado como 2,5 mm para análise de flexão.

Os valores de f_{R1} e f_{R3} são obtidos experimentalmente, através do ensaio de flexão em três pontos em vigas entalhadas. A Figura 5.16 apresenta o modelo de dimensionamento proposto por *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)*, onde está definido o modelo de flexão.

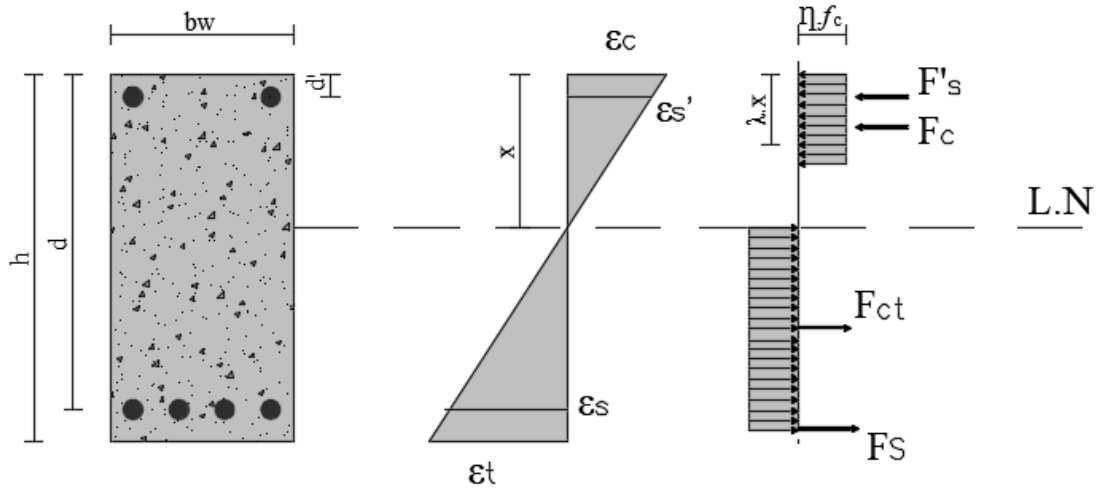


Figura 5.16 – Modelo de flexão para vigas de concreto. (Adaptado de *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)*).

Para obter a região comprimida da viga, aplicam-se as Equações 5.5 e 5.6, das quais extraímos os valores de λ e η :

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 & \text{para } f_c \leq 58 \text{ MPa} \\ 0,8 - \frac{(f_c - 8) - 50}{400} & \text{para } 58 < f_c \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Eq. 5.5}$$

$$\eta = \begin{cases} 1,0 & \text{para } f_c \leq 58 \text{ MPa} \\ 1,0 - \frac{(f_c - 8) - 50}{400} & \text{para } 58 < f_c \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Eq. 5.6}$$

A deformação última do concreto (ε_{cu2}) é dada pela Equação 5.7, a seguir, isto no caso de ocorrer à ruína por compressão da viga de concreto, na qual ocorre o esmagamento do concreto.

$$\varepsilon_{cu2} = \begin{cases} 3,5 & \text{para } f_c \leq 58 \text{ MPa} \\ 2,6 + 35 \cdot \left[\frac{90 - (f_c - 8)}{100} \right]^4 & \text{para } f_c \geq 58 \text{ MPa} \quad (\%) \end{cases} \quad \text{Eq. 5.7}$$

A Equação 5.8 apresenta a deformação última, nos casos onde ocorre a ruína da viga por tração em concreto reforçado com fibras de aço, sendo $\varepsilon_t = \varepsilon_{Fu}$. Nesta equação, o valor de w_u corresponde a 2,5 mm, enquanto l_{cs} é o comprimento característico do elemento estrutural analisado.

$$\varepsilon_{Fu} = \frac{w_u}{l_{cs}} \quad \text{Eq. 5.8}$$

A determinação do momento resistente (m_R) da viga de concreto reforçada com fibras de aço é dada pela execução das etapas listadas abaixo:

1ª Etapa: Estipular que a viga sofre ruína com esmagamento do concreto, considerando que a deformação do concreto é igual à deformação última, $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$, conforme Equação 5.7.

2ª Etapa: Definir o valor da linha neutra (x);

3ª Etapa: Efetuar a verificação se a deformação na região tracionada é menor que a deformação última $\varepsilon_t \leq \varepsilon_{Fu}$. Caso seja afirmativo, realiza-se o passo número 4. Todavia, se for negativo, considera-se que a viga sofre ruína por ruptura do concreto na região tracionada, e define-se que a deformação do aço, nesta situação, é $\varepsilon_s = \varepsilon_{Fu}$. Logo após, estima-se o valor da linha neutra (x) e aplica o cálculo da 4ª etapa;

4ª Etapa: Realizar os cálculos das deformações na viga;

5ª Etapa: Definir a distribuição das tensões a partir das leis constitutivas (σ - ε) dos materiais;

6ª Etapa: Calcular as forças resultantes;

7ª Etapa: Feito isso, caso as forças resultantes estiverem em equilíbrio ($\Sigma F = 0$), obtém-se o momento resistente da viga (m_R). Todavia, caso as forças resultantes não estejam em equilíbrio, calcula-se novamente todo o cálculo desde o passo número 1 até obter o equilíbrio das forças.

Analisando os estudos propostos pelos autores: BIOLZI e CATTANEO (2017), KAZEMI *et al.* (2017), MONTAIGNAC *et al.* (2012), YANG *et al.* (2010), YOO *et al.* (2015), YOO e YOON (2015), comprova-se o beneficiamento das propriedades mecânicas do concreto armado de elevada resistência reforçado com fibras de aço (CRFA-ER), avaliando como referência parâmetros como ductilidade, tenacidade, resistência ao cisalhamento, tração e resistência à flexão, que corroboram para a viabilidade da proposta deste corrente estudo.

É notória a colaboração destas pesquisas para a orientação e desenvolvimento do programa experimental, o qual se adotou o modelo de dimensionamento proposto pela *Model Code 10* (*fib Bulletin 66*, 2012) para estimação das cargas de ruptura à flexão e cisalhamento das vigas de CRFA-ER desenvolvidas experimentalmente.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A corrente seção visa apresentar a abordagem experimental do estudo, esclarecendo a metodologia dos ensaios, a caracterização dos materiais e a estimativa da resistência das vigas. No que diz respeito às estimativas, comenta-se que apenas as recomendações do *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)* foram aplicadas, por serem reconhecidas, entre as demais, globalmente. Os ensaios pretenderam, em geral, ressaltar a influência do reforço das fibras de aço e da classe de resistência do concreto no comportamento à flexão de vigas em concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) visando à supressão dos reforços convencionais de barras de aço. Importa informar que esse programa foi concebido, na sua totalidade, no *Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (LEC/UFPA)*.

6.1. METODOLOGIA DO ENSAIO

6.1.1. Característica das vigas

Cinco vigas foram analisadas nesse experimento, uma de referência, sem fibras, e quatro em CRFA. As variáveis do estudo foram o consumo de fibra, C_f . Nesse contexto, C_f variou em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m³, correspondendo, nessa ordem, a uma taxa, em volume, de 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 % e a resistência do concreto foi de 60 MPa. A dimensão das vigas foi invariável, 150x300x2700 mm³. Acredita-se que essas dimensões garantiram a avaliação apropriada do impacto de C_f e f_c no comportamento à flexão das vigas, por serem comumente aplicadas por outros autores, vide BIOLZI e CATTANEO (2017). O reforço convencional das vigas de CRFA-ER, barras de aço, é apresentado na Figura 6.1. Essa figura revela uma taxa de reforço longitudinal $\rho_l \approx 0,15$ % (2 ϕ 6,3), que representa, inclusive, a taxa mínima, $\rho_{l,min}$, segundo as recomendações do *Model Code 10 (fib Bulletin 66, 2012)*. Noticia-se que essa decisão, $\rho_l \approx \rho_{l,min}$, objetiva ressaltar o mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras de aço. Para garantir a ruína das vigas por flexão, adotou-se para o reforço transversal a taxa $\rho_w \approx 0,11$ % (ϕ 5,0 c/860 mm). O cobrimento adotado foi de 30 mm.

A fibra de aço utilizada no reforço das vigas em CRFA foi do tipo *Dramix® 3D 65/60*, ver Figura 6.2, com conformação *hooked-end*, coladas em pentes de 30 fibras, fator de forma $l_f/d_f = 60/0,9 \approx 65$ mm/mm e resistência à tração $f_{tu} = 1160$ MPa. Para mais, informa-se que a

relação a/d praticada nos ensaios é de $\approx 3,0$, que favorecerá também a ruína por flexão. Nessa explanação, $a = 850$ mm figura o vão de cisalhamento e $d = 270$ mm a altura útil da viga. O resumo das informações é apresentado na Tabela 6.1.

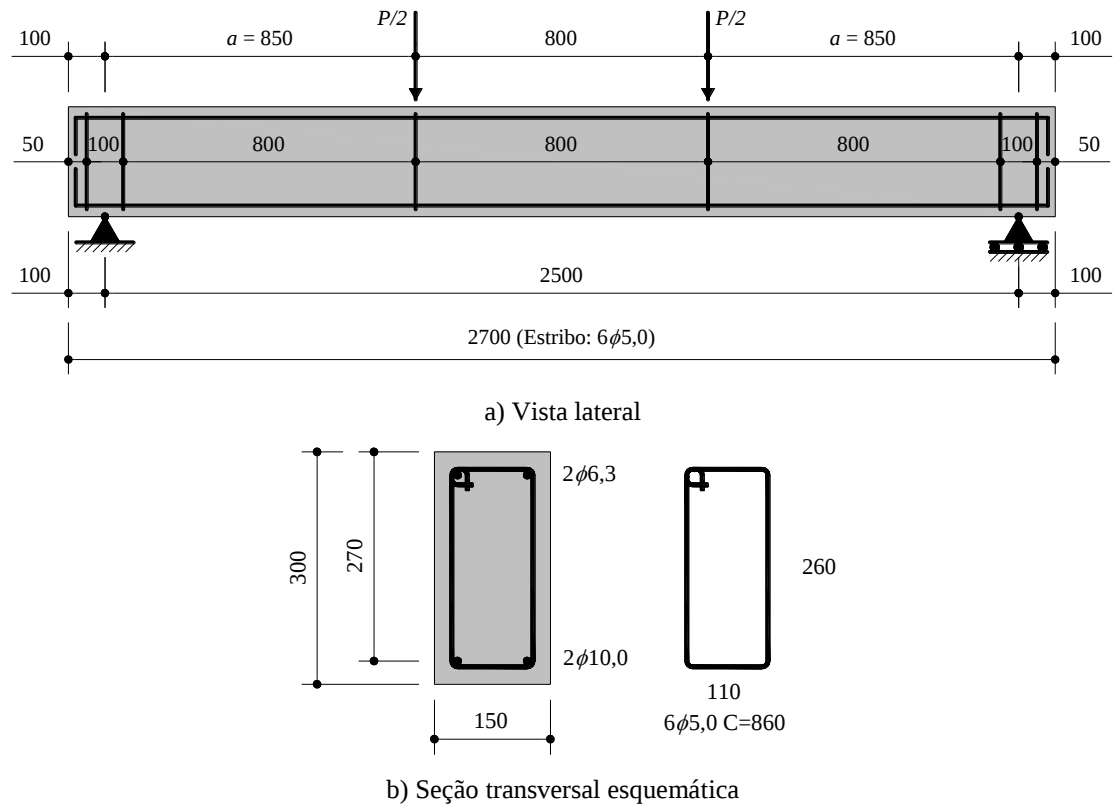


Figura 6.1 – Apresentação do reforço convencional das vigas de CRFA-ER (cotas em mm).

Tabela 6.1 – Resumo das características das vigas.

Vigas	d (mm)	$f_{c,m}$ (MPa)	$\rho_{l,t}$ (%)	$\rho_{l,c}$ (%)	ρ_w (%)	C_f (kg/m ³)
FC30CF00	268,75	30,00	0,91	0,15	0,11	0,00
FC60CF45	270,00	60,00	0,39	0,15	0,00	45,00
FC60CF60	270,00	60,00	0,39	0,15	0,00	60,00
FC60CF75	270,00	60,00	0,39	0,15	0,00	75,00
FC60CF90	270,00	60,00	0,39	0,15	0,00	90,00



a) Fibras coladas em pentes

b) Apresentação individual da fibra

Figura 6.2 – Fibra de aço *Dramix® 3D 65/60*.

6.1.2. Instrumentação

O comportamento à flexão das vigas foi julgado a partir das relações *carga-deslocamento*, $P-\delta$, e *momento-curvatura*, $m-\phi$. Acredita-se que essas informações são suficientes para asseverar uma análise apropriada das vigas. Sendo assim, apresenta-se nesse instante o plano de instrumentação da pesquisa. Para registrar a carga P foi utilizada uma célula de carga da marca *ENARPAC*, modelo *RCH*, com precisão de 0,5 kN e capacidade de 10^3 kN. A disposição desse equipamento é mostrada a seguir, na seção referente ao sistema de ensaio. O deslocamento δ foi apontado por meio de um LVDT, modelo *LDS-100*, precisão de 0,38 mm, da marca *LD Sensors Ltd.*, fixado na seção central da viga em um dispositivo denominado *Yoke*, ver Figura 6.3. O *Yoke* visa minimizar qualquer tipo de leitura indesejada devido à acomodação dos apoios e viabilizar o registro de δ relativamente ao eixo das vigas.

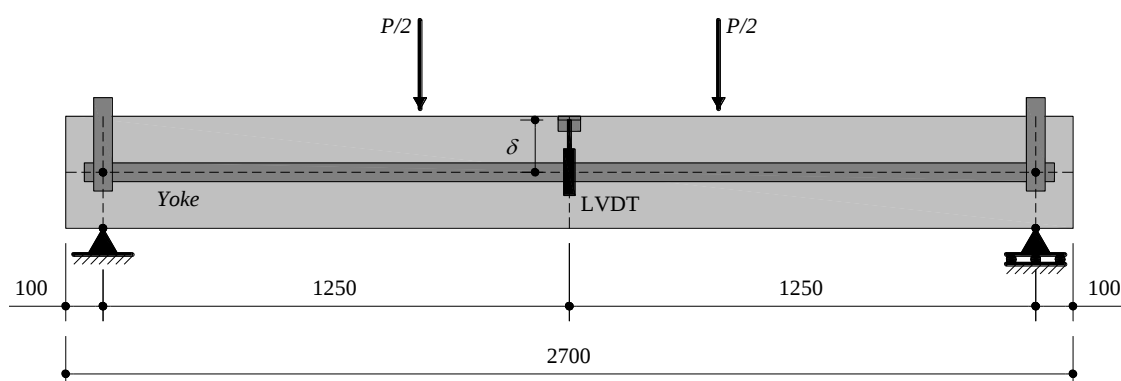


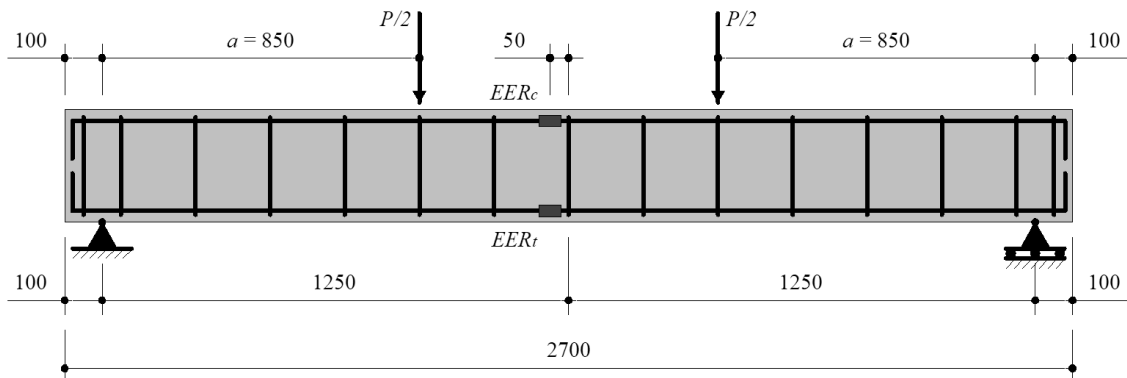
Figura 6.3 – Esquema de instrumentação do deslocamento (cotas em mm).

No que concerne o registro da relação $m-\phi$, comunica-se que o momento m foi estimado a partir da carga P de maneira simplificada, admitindo a viga um corpo rígido e aplicando o

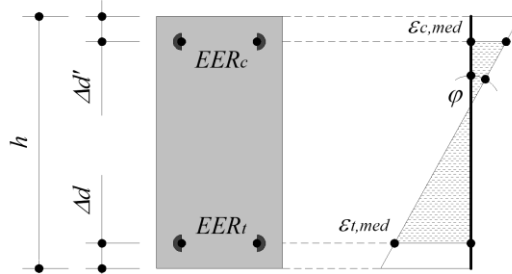
método das seções, como mostra a expressão Eq. 6.1. Para estipulação curvatura φ , aplicou-se os conceitos que fundamentam o modelo de viga de *Euler-Bernoulli*, mormente a hipótese das seções planas após a curvatura da viga. Dessa maneira, *Extensômetros Elétricos de Resistência (EER)* da marca *EXCEL Sensores*, modelo *PA-06-125AA-120L*, foram fixados próximos da seção central da viga nos reforços longitudinais tracionados (EER_t) e comprimidos (EER_c), como exhibe a Figura 6.4a. Sendo assim, a estimativa da curvatura é feita por meio de Eq. 6.2. Nessa equação, $\varepsilon_{t,med}$ e $\varepsilon_{c,med}$ representam as deformações médias registradas nos extensômetros EER_t e EER_c , respectivamente, e Δd e $\Delta d'$ identificam as posições dos reforços longitudinais tracionados e comprimido. A Figura 6.4b também explicita a apresentação dessas grandezas.

$$m = P \cdot a / 2 \quad \text{Eq. 6.1}$$

$$\varphi = \frac{|\varepsilon_{t,med}| + |\varepsilon_{c,med}|}{h - (\Delta d + \Delta d')} \quad \text{Eq. 6.2}$$



a) Vista lateral da viga de referência (FC30CF00)



b) Seção transversal instrumentada e distribuição das deformações nos reforços longitudinais das vigas de referência e de CRFA-ER

Figura 6.4 – Esquema de instrumentação das deformações (cotas em mm).

6.1.3. Sistema de ensaio

O projeto do sistema de ensaio visa reproduzir em laboratório a circunstância mostrada na Figura 6.1a. Para viabilizar essa condição, explana-se primeiramente sobre os apoios, que serão concebidos a partir de roletes metálicos, como mostra a Figura 6.5a. A carga foi aplicada manualmente com o auxílio de um sistema hidráulico, *atuador-cilindro*, da marca *ENERPAC*, com capacidade de 10^3 kN e precisão de 1 kN, ver Figura 6.5b. Conforme comentado, o registro da carga mediu-se por uma célula de carga, que também está sendo retratada na Figura 6.5b. A apresentação esquemática do sistema de ensaio é mostrada na Figura 6.6, a qual propicia a análise da disposição dos equipamentos. Nesse contexto, informa-se que um perfil metálico transferiu a carga do cilindro hidráulico para a viga testada e que um pórtico metálico rígido com capacidade de carga de $2 \cdot 10^3$ kN certificou a reação do carregamento.



a) Condições de apoio (rolete metálico)



b) Sistema de carregamento

Figura 6.5 – Elementos do sistema de ensaio.

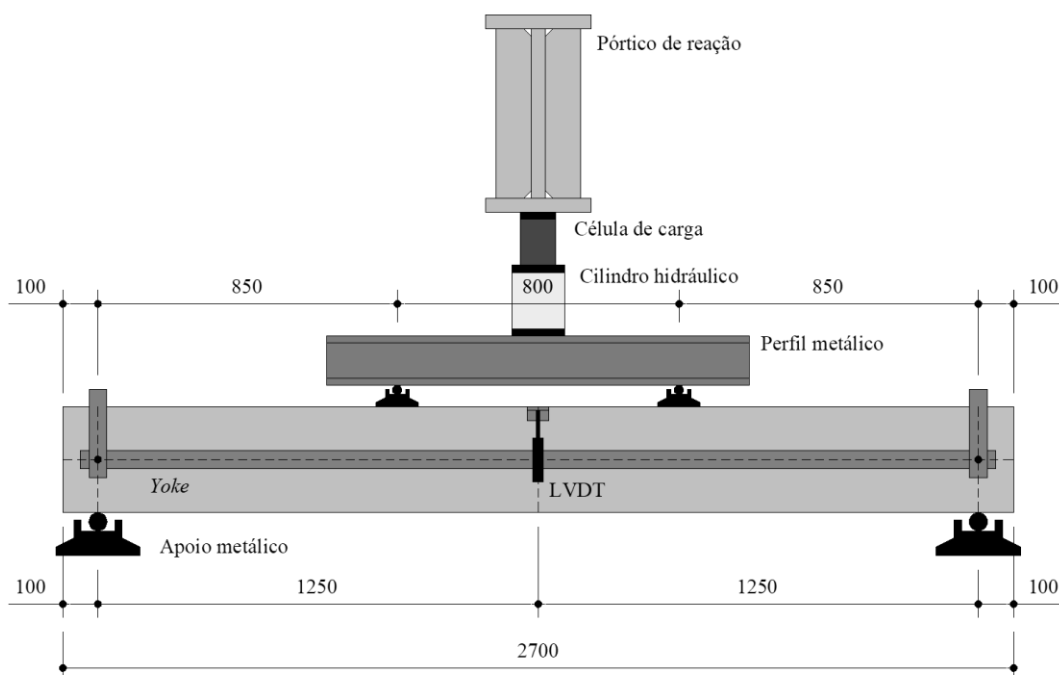


Figura 6.6 – Apresentação esquemática do sistema de ensaio (cotas em mm).

6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

6.2.1. Concreto

Na fase atual do estudo, a dosagem dos concretos foi estabelecida para a viga de referência com $f_c = 30$ MPa e $f_c = 60$ MPa. Entretanto, no que concerne à caracterização desses materiais cimentícios, singularmente o CRFA, comunica-se que foram empregadas às recomendações do RILEM TC 148-SSC (1997) e RILEM TC 148-SSC (2000) para orientar os ensaios de compressão axial e do RILEM TC 162-TDF (2002) nos ensaios de flexão, que propicia analisar indiretamente o comportamento do material à tração. Dessa maneira, cilindros com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura figuraram os corpos de prova (CP) no ensaio de compressão e prismas com 150x150x600 mm³ de dimensão foram os CP no ensaio de flexão.

A quantidade de CP foi de 12 unidades, não obstante, revela-se a intenção de registrar as leis constitutivas dos materiais, relações *tensão-deformação*, σ - ε . Com essa providência, garante-se a realização de futuras análises numéricas (não linear do material). A Tabela 6.2 denota os materiais constituintes do concreto e seus respectivos consumos.

Tabela 6.2 – Materiais constituintes e dosagem dos concretos.

Materiais constituintes	Dosagem (kg/m ³)				
	FC30CF00	FC60CF45	FC60CF60	FC60CF75	FC60CF90
Cimento (CP II-E-32)	366,49	557,79	557,79	557,79	557,79
Areia (MF = 2,12 e ME = 2,61 kg/dm ³)	697,09	780,90	780,90	780,90	780,90
Brita (Brita 0, DM = 12,5 mm)	1021,87	892,46	892,46	892,46	892,46
Água	212,56	157,36	157,36	157,36	157,36
Fibras (Dramix® 3D 65/60 BG)	0,00	45,00	60,00	75,00	90,00
Aditivo (MC-PowerFlow 1180)	1,11	6,33	6,33	6,33	6,33

Legenda: MF = módulo de finura; ME = massa específica; DM = diâmetro máximo do agregado graúdo.

O reconhecimento das propriedades mecânicas dos concretos aconteceu por meio de ensaios de compressão axial, como sugere RILEM TC 148-SSC (1997) e RILEM TC 148-SSC (2000), e de flexão em três pontos em prismas entalhados (entalhe de 25 mm), em conformidade com o RILEM TC 162-TDF (2002). Para cada tipo de material foram usados três cilindros no ensaio de compressão, diâmetro = 100,0 mm e altura = 200,0 mm, e três prismas no ensaio de flexão, 150x150x600 mm³ de dimensão. As Figuras 6.7 e 6.8 exibem os comportamentos à compressão, relação *tensão-deformação*, f_c - ε_c , e à flexão dos concretos,

relação *tensão-deslocamento*, $f-\delta$. Comunica-se que esses ensaios foram controlados pela carga, logo, o registro pós-pico da relação $f_c-\epsilon_c$ ficou desconhecido, em especial para os CRFA-ERs que naturalmente apresentam essa extensão cerceada (material frágil). As Tabelas 6.3 e 6.4 mostram, nessa ordem, o resumo dos ensaios de compressão e flexão. Nessas tabelas, alguns resultados são apresentados com a formatação $MED \pm DP$, sendo MED = média aritmética e DP = desvio padrão.

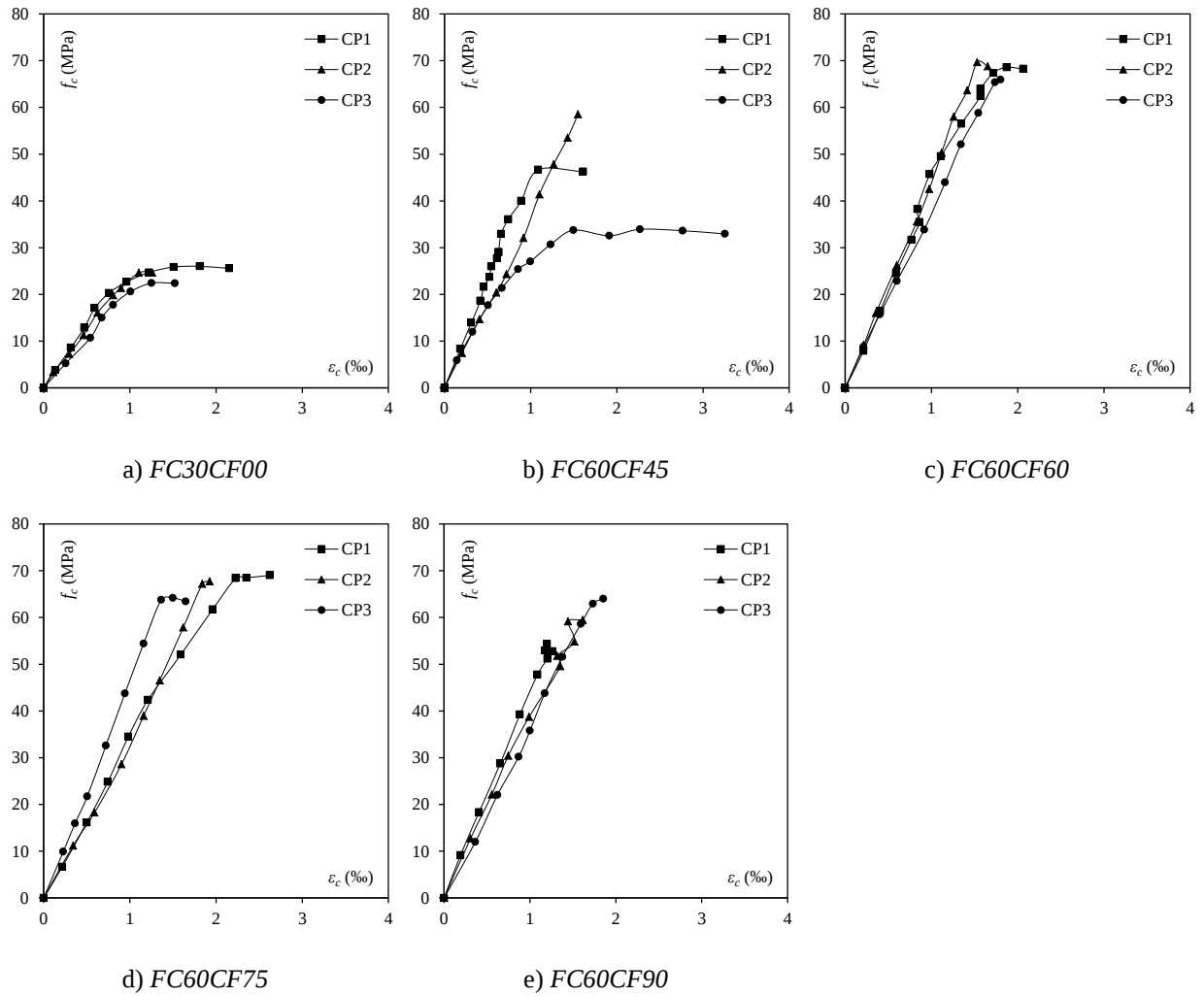


Figura 6.7 – Comportamento dos concretos à compressão.

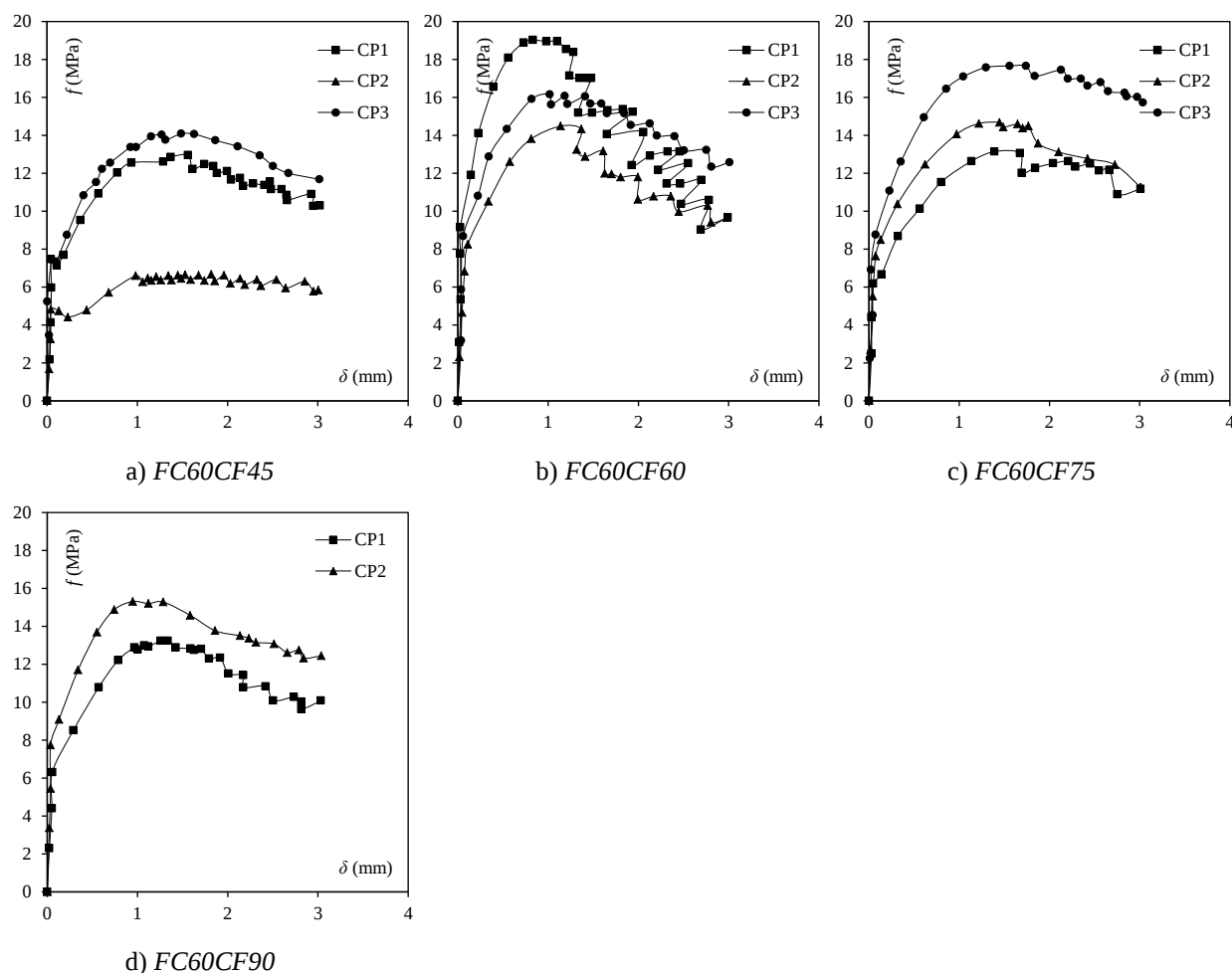


Figura 6.8 – Comportamento dos concretos à flexão.

Na Tabela 6.3, $f_{c,m}$ = resistência à compressão média dos concretos, $\varepsilon_{c,m}$ = deformação média correspondente à $f_{c,m}$ e $f_{c,exp}/f_{c,teo}$ = quociente entre $f_{c,m}$ registrado experimentalmente e o idealizado, sob uma perspectiva teórica, no início do projeto. Na Tabela 6.4, f_{LP} = tensão correspondente ao limite de proporcionalidade (maior tensão no intervalo $0,0 \leq \delta \leq 0,05$ mm) e f_{Rj} ($j = 1, 2, 3$ e 4) = tensão residual na flexão (determinado a partir da relação f - δ em $\delta_1 = 0,46$ mm, $\delta_2 = 1,31$ mm, $\delta_3 = 2,15$ mm e $\delta_4 = 3,00$ mm, respectivamente).

Tabela 6.3 – Resumo do ensaio de compressão.

Concretos	$f_{c,m}$ (MPa)	$\varepsilon_{c,m}$ (‰)	$f_{c,exp}/f_{c,teo}$
FC30CF00 ⁽¹⁾	25,97±0,91	1,43±0,37	0,87
FC60CF45 ⁽¹⁾	52,49±7,17	1,59±0,13	0,87
FC60CF60	70,28±1,52	1,72±0,18	1,17
FC60CF75	68,55±2,58	1,89±0,55	1,14
FC60CF90 ⁽²⁾	62,72±3,42	1,61±0,19	1,05

⁽¹⁾ O corpo de prova CP3 foi desconsiderado (resistência somenos);

⁽²⁾ O corpo de prova CP1 foi desconsiderado (resistência somenos).

Tabela 6.4 – Resumo do ensaio de flexão.

Concretos	f_{LP} (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
<i>FC60CF45</i> ⁽¹⁾	7,29±0,38	10,63±0,76	13,21±0,71	12,54±1,09	11,00±0,99
<i>FC60CF60</i>	8,27±0,90	14,16±2,41	15,78±1,34	12,75±1,94	10,59±1,66
<i>FC60CF75</i>	7,07±0,78	11,44±1,91	15,05±2,28	14,33±2,65	12,75±2,57
<i>FC60CF90</i> ⁽²⁾	7,06±1,09	11,27±2,13	14,11±1,32	12,34±1,37	11,17±1,70

⁽¹⁾ O corpo de prova CP2 foi desconsiderado (resistência somenos);

⁽²⁾ O corpo de prova CP3 foi perdido (entalhe incorreto).

Analisando a razão $f_{c,exp}/f_{c,teo}$ na Tabela 6.3, observou-se que a classe de resistência dos concretos flutuou em torno de $\pm 15,0$ % da craveira teórica de 60,0 MPa. Apesar da variabilidade moderada, declara-se razoável os valores alcançados, pois se tem o almejado CRFA-ER. Com relevância mor, importa apregoar que as fibras utilizadas, nos consumos já anunciados, não foram mobilizadas na fase pré-pico e pré-fissura das relações $f_c-\varepsilon_c$ e $f-\delta$, respectivamente. Em geral, nessas extensões não houve distinção notória entre as respostas dos CRFA-ERs à custa do acréscimo de C_f . Esse padrão era conjecturado. Nada obstante, diferente da fase pré-fissura no ensaio de flexão, na fase pós-fissura, ou residual, as fibras foram provadamente acionadas, uma vez constatados comportamentos *hardening* substanciais.

Para alcançar o desígnio da pesquisa, supressão do reforço convencional de vigas em CA-RN a partir da aplicação de CRFA-ER, esse comportamento foi fundamental, pois assegurou aos CRFAs capacidade de redistribuir esforços após a fissuração, isto é, propiciou poder de absorção de energia a esse material. Nesse âmbito, testificou-se que as propriedades exigidas foram conquistadas quando concretos com $f_{c,m} \approx 60,0$ MPa foram reforçados com fibras *Dramix*[®] 3D 65/60 BG e $C_f \in [45,0-90,0]$ kg/m³. Em um contexto mais amplo, teoriza-se que CRFAs, independentemente da classe de resistência e do consumo de fibras, com $f_{R1} \geq 10,0$ MPa e razão $f_{R3}/f_{R1} \geq 0,9$ também poderiam assegurar comportamento análogo.

Ainda assim, recomenda-se evitar $C_f = 45,0$ e $90,0$ kg/m³. No primeiro caso, respostas residuais pouco expressivas podem ser expectáveis, ver o comportamento do prisma CP2 na Figura 6a. Para o consumo maior, a dificuldade para misturar/homogeneizar as fibras na massa de concreto pode prejudicar a eficácia do reforço. Assim sendo, C_f entre 60,0 e 75,0 kg/m³ são os mais indicados.

Em todo caso, importa frisar que as respostas residuais mostradas na Figura 6.8, ou na Tabela 6.4, foram, de um modo generalizado, símil. Isso revela que o êxito do mecanismo de reforço propiciado pelas fibras, expresso aqui, a partir de f_{Rj} , não é linearmente proporcional ao acréscimo de C_f . A corrente nota era prenunciada, pois, conforme relatado, a homogeneização das fibras fica comprometida para valores elevados de C_f .

6.2.2. Aço

As barras de aço que exprimem os reforços longitudinais tracionados e comprimidos das vigas serão caracterizadas a partir do ensaio de tração axial. Para esse fim, as recomendações da ISO 15630-1 (2002) foram seguidas. Nessas atividades, três amostras dos diferentes diâmetros, ϕ , manuseados nos reforços foram avaliadas. O resumo desses ensaios é mostrado na Tabela 6.5, em termos das coordenadas $\varepsilon_{s,f}-f_{s,y}$ e $\varepsilon_{s,u}-f_{s,u}$, as quais simbolizam o início do escoamento e o ápice da relação *tensão-deformação*, $f_s-\varepsilon_s$. Além dessas informação, apresentam-se também os módulos de elasticidade dos aços das barras, E_s .

Tabela 6.5 – Propriedades dos aços dos reforços.

ϕ (mm)	$f_{s,y}$ (MPa)	$\varepsilon_{s,y}$ (‰)	$f_{s,u}$ (MPa)	$\varepsilon_{s,u}$ (‰)	E_s (GPa)
5,0	739,91±12,53	4,81±0,18	810,60±6,97	20,43±1,22	219,24±7,22
6,3	695,43±31,07	4,43±0,11	853,34±45,97	36,31±5,24	198,11±0,83
10,0	574,61±18,87	3,69±0,12	764,61±11,18	80,79±2,30	189,47±5,12
12,5	523,53±17,71	3,73±0,52	726,48±15,84	92,65±15,41	222,14±42,60

6.2.3. Fibra de aço

As fibras de aço, *Dramix*[®] 3D 65/60, das vigas em concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) não foram caracterizadas nesse estudo. Estas fibras são do tipo *hooked-end*, coladas em pentes de 30 fibras, fator de forma $l_f/d_f = 60/0,9 \approx 65$ mm/mm e resistência à tração $f_{tu} = 1160$ MPa. Optou-se por estas fibras devido a ancoragem ao concreto fornecida pelo seu comprimento longo ($l_f = 60$ mm) e pelos ganchos de suas extremidades, além do seu fator de forma e resistência à tração. Sendo assim, as informações do fabricante foram consultadas.

6.3. ESTIMATIVA DO MODO DE RUÍNA

6.3.1. Resistência à flexão

Para estimar a resistência à flexão das vigas, adotaram-se as recomendações do *Model Code 10* (fib Bulletin 66, 2012), como mostrado na seção 5.4 deste trabalho, e nesse contexto, as resistências residuais $f_{R,i}$ ($i = 1$ e 3), exigidas por esse modelo.

Na Tabela 6.6, apresenta-se um resumo dos resultados. Para estes cálculos, admitiu-se $f_{sy} = 500$ MPa, sendo f_{sy} a tensão de escoamento da armadura tracionada. A carga $P_{u,f}$, representativa da resistência à flexão das vigas e também retratada nessa tabela, constitui a carga correspondente ao momento último m_u .

Tabela 6.6 – Resumo da estimativa da resistência à flexão.

Vigas	d (mm)	f_c (MPa)	ρ_l (%)	C_f (%)	l_f/d_f	f_{Fu} (MPa)	m_u (kN·m)	$P_{u,f}$ (kN)
FC30CF00	268,75	25,97	0,91	0	-	0,0	45,46	53,49
FC60CF45	270,00	52,49	0,39	0,6	65	4,14	46,22	54,34
FC60CF60	270,00	70,28	0,39	0,8	65	3,54	45,41	53,42
FC60CF75	270,00	68,55	0,39	1,0	65	4,88	52,79	62,10
FC60CF90	270,00	62,72	0,39	1,2	65	3,92	47,78	56,21

Analisando a Tabela 6.6, constata-se, independentemente de f_c , que a fibra de aço beneficia a resistência à flexão das vigas. Acréscimos nos valores de carga $P_{u,f}$ nas vigas CRFA-ER foram registrados, comparativamente à peça de referência. Além disso, importa comentar que acréscimos modestos, em geral, novamente independentemente de f_c , foram observados quando se compara C_f aumentando de 0,8 % para 1,0 %.

Ressalta-se também que o modelo do *Model Code 10* (fib Bulletin 66, 2012) não pondera a contribuição da fibra no comportamento à compressão do concreto, o que torna essa estimativa ainda mais complexa e conservadora. Apresentada as circunstâncias, acredita-se que as fibras de aço podem favorecer sobremaneira o comportamento à flexão das vigas.

6.3.2. Resistência ao cisalhamento

A estimativa da resistência ao cisalhamento também seguiu as recomendações do *Model Code 10* (fib Bulletin 66, 2012), ver Eq. 6.10. Sendo $V_{R,cf}$ a resistência de uma viga em CRFA sem reforço transversal, Eq. 6.11, e $V_{R,s}$ a parcela de contribuição desse reforço, Eq. 6.12, como segue:

$$V_R = V_{R,cf} + V_{R,s} \quad \text{Eq. 6.10}$$

$$V_{R,cf} = 0,18 \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_l \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftu}}{f_{ct}} \right) \cdot (f_c + 8) \right]^{1/3} \cdot b \cdot d \quad \text{Eq. 6.11}$$

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{syw} \cdot [\cot g(\theta) + \cot g(\alpha)] \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Eq. 6.12}$$

Na expressão de $V_{R,cf}$, $k = \min[1 + (200/d)^{1/2}; 2,0]$ representa um fator de escala (*size effect*). Na formulação de $V_{R,s}$, A_{sw} é a área de reforço transversal, z é a altura efetiva de cisalhamento, que corresponde ao braço de alavanca entre as resultantes de compressão e tração no modelo de flexão, f_{syw} a tensão de escoamento do reforço transversal, $\theta = 45^\circ$ o ângulo da biela comprimida e $\alpha = 90^\circ$ a inclinação da armadura transversal, comparativamente ao eixo da viga. Um resumo dos resultados é mostrado na Tabela 6.7. Nesses cálculos adotou-se $f_{syw} = f_{sw} = 500$ MPa. Na Tabela 6.7, $P_{u,c} = 2 \cdot V_R$ diz respeito à carga correspondente à resistência ao cisalhamento das vigas.

Tabela 6.7 – Resumo da estimativa da resistência ao cisalhamento.

Vigas	f_c (MPa)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	C_f (%)	l_f/d_f	f_{Ftu} (MPa)	V_R (kN)	$P_{u,c}$ (kN)
FC30CF00	30	0,91	0,11	0	-	0,0	41,3	82,05
FC60CF45				0,6	65	1,92	76,74	153,49
FC60CF60				0,8	65	2,56	73,32	146,63
FC60CF75	60	0,39	0,0	1,0	65	3,12	80,55	161,09
FC60CF90				1,2	65	3,77	75,48	150,96

6.3.3. Estimativa do modo de ruína

A estimativa do modo de ruína é verificada simplesmente comparando as resistências à flexão, $P_{u,f}$, e ao cisalhamento, $P_{u,c}$, ver Tabelas 6.6 e 6.7, respectivamente. Para auxiliar essa

comparação, exibe-se a Figura 6.9, que correlaciona as duas resistências. A análise dessa figura deixa claro que a resistência das vigas ao cisalhamento é muito superior, assegurando, mesmo diante estimativas pouco seguras, a ruína das vigas por flexão.

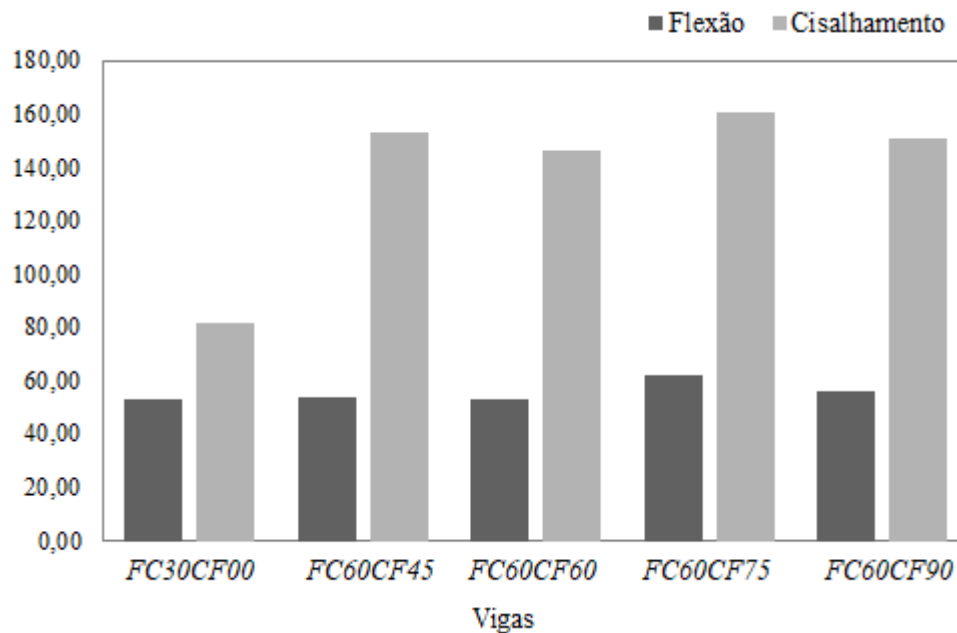


Figura 6.9 – Análise da resistência das vigas.

7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta os resultados obtidos através do monitoramento das vigas de CRFA e de referência. Deste modo, a contribuição das fibras de aço no desempenho das vigas submetidas à flexão foi abordada mediante análise das relações *carga-deslocamento*, *momento-curvatura*, do modo de ruína das peças e da fissuração.

7.1. ANÁLISE DA RELAÇÃO CARGA-DESLOCAMENTO E MOMENTO-CURVATURA

O comportamento das vigas foi explanado a partir das Figuras 7.1a e 7.1b, as quais revelam as relações *carga-deslocamento* e *momento-curvatura*, respectivamente, que demonstra a influência da adição de fibras de aço na mistura do concreto. Os resultados resumidos estão listados na Tabela 7.1. e 7.2. Importa ressaltar que não foram considerados os pesos das vigas e dos equipamentos fixados às vigas. Analisando as figuras citadas antes, constatou-se que o propósito da investigação foi alcançado, supressão do reforço convencional das vigas em CA-RN, porém, com certa restrição para apurar o desempenho de algumas vigas em CRFA-ER.

Nesse estudo, anuiu-se que a supressão seria excelsa se as vigas reforçadas com fibras apresentassem, sincronicamente, capacidade portante, ductilidade e tenacidade equivalente, ou ligeiramente superior, ao da viga em CA-RN. Posto isso, agora será apresentado o julgamento da eficácia da supressão praticada na viga de referência, *FC30CF00*.

Resumos dos pontos notáveis das relações $P-\delta$ e $m-\varphi$ são apresentados, nessa ordem, nas Tabelas 7.1 e 7.2. Na Tabela 7.1, P_{max} = carga máxima, $\delta_{P_{max}}$ = deslocamento correspondente à P_{max} , P_u = carga última, δ_{P_u} = deslocamento correspondente à P_u e T = tenacidade. O início da fissuração foi discutido apenas com base na relação $m-\varphi$, que retratou essa situação de maneira marcante. A Tabela 7.2 assinala as coordenadas referentes ao início da fissuração, $\varphi_{cr}-m_{cr}$, ao início do escoamento do reforço tracionado, φ_y-m_y , e ao registro máximo, $\varphi_{max}-m_{max}$. Além disso, também se encontram nessa tabela os valores das rigidezes à flexão não fissurada, $(E \cdot I)_o$ e fissurada, $(E \cdot I)_{cr}$. Ademais, informa-se que em ambas as tabelas a razão CRFA/CA de alguns parâmetros definidos antes foram apresentados, *e.g.*, P_{CRFA}/P_{CA} ,

T_{CRFA}/T_{CA} , m_{CRFA}/m_{CA} , etc. Essa razão pode ser encarada como um indicador de desempenho das vigas em CRFA-ER.

Concernentemente à capacidade portante das vigas, notou-se, de um modo geral, ver Figura 7.1a, ou 7.1b, que as resistências das vigas em CRFA-ER e CA-RN foram correspondentes. A carga máxima sustentada pelas vigas, assim como a correlação entre as vigas em CRFA-ER e CA-RN foram apontadas na Tabela 7.1, (ver colunas P_{max} e $(P_{CRFA}/P_{CA})_{max}$), respectivamente. Se for abraçado que $m_y \approx m_{max}$, conforme mostrou as respostas das vigas *FC30CF00* e *FC60CF75*, os momentos m_y , ou os quocientes $(m_{CRFA}/m_{CA})_y$, assinalados nas relações $m-\phi$, (ver Tabela 7.2), também figuram meios para uma análise alternativa da capacidade portante das vigas. Aqui, a consideração $m_y \approx m_{max}$ foi necessária devido ao insucesso no registro de m_{max} de algumas vigas. De qualquer forma, independentemente da metodologia de análise, as respostas apontaram para as mesmas conclusões.

Quanto ao início da fissuração, as relações $(m_{CRFA}/m_{CA})_{cr}$ mostradas na Tabela 7.2 indicaram que os CRFA-ERs foram ricamente favorecidos, relativamente ao CA-RN. Essa constatação era naturalmente aguardada, pois estes concretos, além de terem sido beneficiados pelas fibras, também o foram pela classe de resistência. Outrossim, as relações $(m_{CRFA}/m_{CA})_y$ assinalaram que o escoamento do reforço tracionado das vigas em CRFA-ER foram delongados, apesar da supressão de quase 60,0 %. Novamente, mais vantagens foram ascendidas com o emprego do CRFA-ER.

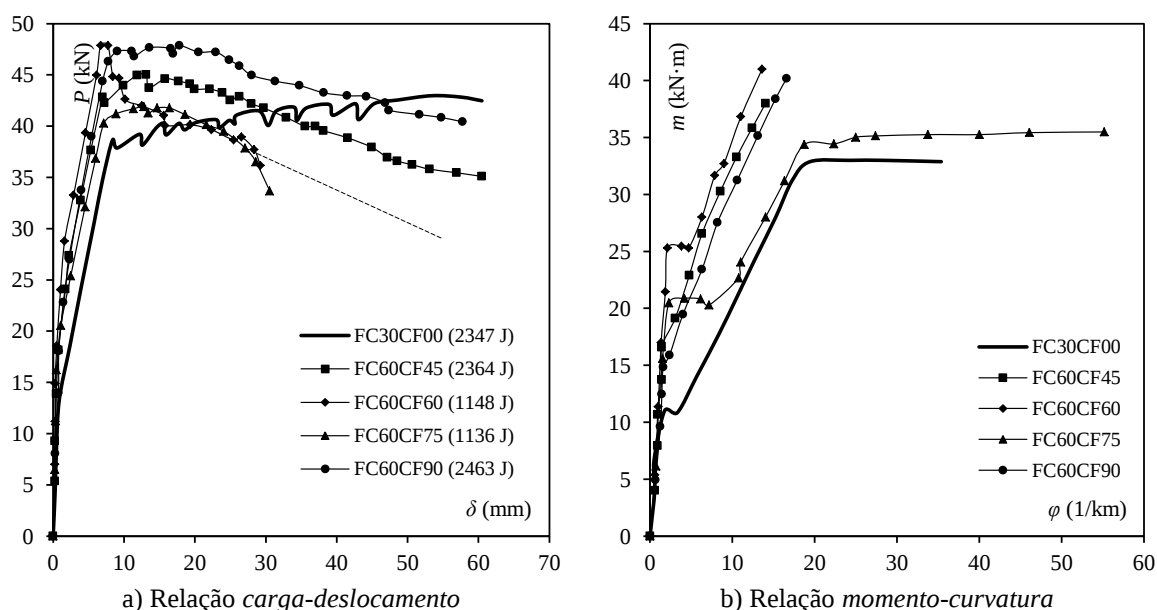


Figura 7.1 – Comportamento das vigas.

A ductilidade das peças pôde ser julgada visualmente a partir das relações $P-\delta$ e $m-\varphi$. De mais a mais, o deslocamento δ_{Pu} , Tabela 7.1, ou a curvatura φ_{max} , Tabela 7.2, também poderiam ser empregados como indicadores de ductilidade, sendo reconhecido que valores maiores para δ_{Pu} , ou φ_{max} , representariam um comportamento dúctil mais sinalizado nas vigas.

Nesse momento, contudo, os primeiros óbices foram enfrentados, pois tanto na relação $P-\delta$, como na $m-\varphi$, os registros finais de algumas vigas foram incompletos. Na relação *carga-deslocamento*, por exemplo, dificuldades no manuseio do LVDT ocasionaram registros inconclusos nas vigas *FC60CF60* e *FC60CF75*. Na relação *momento-curvatura*, os extensômetros dos reforços tracionados nas vigas *FC60CF45*, *FC60CF60* e *FC60CF90* simplesmente feneceram e essas tiveram a sua instrumentação comprometida. Por conta disso, as relações $P-\delta$ e $m-\varphi$ não roboram, coincidentemente, a ductilidade das vigas em CRFA-ER. Apesar da agrura, a discussão foi possível.

A partir da relação $P-\delta$, confirmou-se que as ductilidades das vigas *FC60CF45*, *FC60CF90* e *FC30CF00* foram cômpanes. Semelhantemente, a relação $m-\varphi$ permitiu testificar ductilidade semelhante entre as vigas de referência e *FC60CF75*. Nesse contexto, apenas a viga em CRFA-ER com $C_f = 60,0 \text{ kg/m}^3$ ficou sem validação. Apesar da incerteza, ainda assim, acredita-se firmemente que essa viga frui de ductilidade, visto que o comportamento desse material, relativamente à resposta residual, foi tão promissor quanto dos demais CRFA-ERs, consultar Figura 6.8.

Na Tabela 7.1, as razões $P_u/P_{max} < 1,0$ das vigas reforçadas com fibras, fez parecer que essas peças experimentaram uma condição inferior de ductilidade, em referência à viga CA-RN. Entretanto, a referida relação apenas indicou que as vigas em CRFA-ER apresentam comportamento residual, ou pós-pico, com amolecimento, *softening*, diferindo do material, que indubitavelmente apresentou padrão *hardening*, ver Figura 6.8.

Prosseguindo nessa perspectiva de análise, o quociente $(\delta_{CRFA}/\delta_{CA})_{max} < 1,0$ exprimiu que nas vigas em CRFA-ER a carga P_{max} aconteceu antecipadamente, próximo do escoamento dos reforços tracionados, o que também poderia ser indício de ductilidade comprometida se a relação $\delta_{Pu}/\delta_{Pmax}$ não fosse notadamente maior do que 1,0.

Tabela 7.1 – Resumo da relação *carga-deslocamento*.

Vigas	P_{max} (kN)	δ_{Pmax} (mm)	P_u (kN)	δ_{Pu} (mm)	T (J)	P_u/P_{max}	$\delta_{Pu}/\delta_{Pmax}$
FC30CF00	42,64	59,94	42,64	59,94	2346,88	1,00	1,00
FC60CF45	43,79	13,54	35,22	58,93	2364,35	0,80	4,35
FC60CF60	46,61	6,40	36,37	29,03	1147,68	0,78	4,54
FC60CF75	42,01	15,84	33,75	30,45	1135,58	0,80	1,92
FC60CF90	47,86	17,66	40,96	56,42	2463,33	0,86	3,19
Análise CRFA/CA							
Vigas	$(P_{CRFA}/P_{CA})_{max}$		$(\delta_{CRFA}/\delta_{CA})_{max}$		T_{CRFA}/T_{CA}		
FC60CF45	1,03		0,23		1,01		
FC60CF60	1,09		0,11		0,49		
FC60CF75	0,99		0,26		0,48		
FC60CF90	1,12		0,29		1,05		

Tabela 7.2 – Resumo da relação *momento-curvatura*.

Vigas	m_{cr} (kN·m)	φ_{cr} (1/km)	m_y (kN·m)	φ_y (1/km)	m_{max} (kN·m)	φ_{max} (1/km)	$(E \cdot I)_o$ (kN·m ²)	$(E \cdot I)_{cr}$ (kN·m ²)
FC30CF00	10,48	1,37	32,69	18,97	32,95	35,76	7649,64	1409,82
FC60CF45	16,61	1,56	37,75	14,22	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	10647,44	1811,07
FC60CF60	24,78	1,91	40,42	13,82	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	12973,82	1863,30
FC60CF75	20,07	2,11	34,38	18,94	35,53	56,10	9511,85	1387,50
FC60CF90	14,39	1,44	39,97	16,85	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	9993,06	1748,99
Análise CRFA/CA								
Vigas	$(m_{CRFA}/m_{CA})_{cr}$	$(m_{CRFA}/m_{CA})_y$	$(m_{CRFA}/m_{CA})_{max}$	$(E \cdot I_{CRFA}/E \cdot I_{CA})_o$		$(E \cdot I_{CRFA}/E \cdot I_{CA})_{cr}$		
FC60CF45	1,58	1,15	- ⁽¹⁾	1,39		1,28		
FC60CF60	2,36	1,24	- ⁽¹⁾	1,70		1,32		
FC60CF75	1,92	1,05	1,08	1,24		0,98		
FC60CF90	1,37	1,22	- ⁽¹⁾	1,31		1,24		

⁽¹⁾ Parâmetro não registrado.

A tenacidade T das vigas, representativa da área sob a curva *carga-deslocamento*, foi indicada na Tabela 7.1 e na Figura 7.1a, valor entre parênteses na legenda. Explorando esses resultados, constatou-se que somente as vigas *FC60CF60* e *FC60CF75* não apresentaram tenacidade equipotente à viga de referência, *FC30CF00*. A proporção T_{CRFA}/T_{CA} auxilia esse julgamento, ver Tabela 7.1. O motivo já foi deslindado. Ainda assim, o debate sobre o assunto foi possível.

Analisando as respostas P - δ dessas vigas, porém, aceitando a projeção sugerida na Figura 7.1a (linha pontilhada), notou-se que a tenacidade dessas peças seria ligeiramente inferior à da viga em CA-RN, $T_{CRFA}/T_{CA} \approx 0,90$. Nesses termos, reputou-se razoável o quociente sobredito, ainda que inferior à unidade, uma vez que os CRFA-ERs com $C_f = 60,0$ e $75,0 \text{ kg/m}^3$ foram os mais privilegiados em termos da classe de resistência, Figura 6.7, e da resposta residual à flexão, Figura 6.8.

Nesse cenário, acreditou-se que a hipótese teorizada para viabilizar a ponderação da tenacidade das vigas *FC60CF60* e *FC60CF75* foi verossímil, uma vez que as vigas *FC60CF45* e *FC60CF90* apresentaram delineamento afim. Além das observações publicadas, complementa-se sublinhando que as vigas em CRFA-ER também foram aforadas quanto às rigidezes à flexão não fissurada, $(E \cdot I_{CRFA} / E \cdot I_{CA})_o$, e fissurada, $(E \cdot I_{CRFA} / E \cdot I_{CA})_{cr}$. Essa constatação propiciou mais vantagens às vigas em CRFA-ER, relativamente à viga em CA-RN. Agora, no tocante ao estado limite de serviço (ELS). Ainda assim, estudos específicos são aventados para discutir o assunto referido com segurança/profundidade apropriada.

7.2. MODO DE RUÍNA

A análise do modo de ruína das vigas observou a relação *carga-deslocamento*, as deformações registradas nas armaduras tracionadas e comprimidas e a fissuração ocorrida em cada viga submetida à flexão. A representação do padrão de fissuração das vigas é apresentada na Figura 7.2. Apesar das vantagens alcançadas com o emprego do CRFA-ER, relativamente ao início da fissuração, notifica-se que o processo de propagação foi praticamente invariável.

Em um contexto generalizado, observou-se que as primeiras fissuras surgiram nas seções que experimentaram momento fletor acme, ou seja, entre os pontos de carregamento. Com o avanço da carga, as fissuras propagaram tanto ao longo da altura das seções já fissurada como para outras seções, ainda integras em direção aos apoios. Nesse cenário, o vão de cisalhamento de todas as vigas foi fissurado, cota *a* na Figura 7.2.

Explorando essa condição para enriquecer a discussão sobre a eficácia da supressão dos reforços convencionais, a Tabela 7.3 revela a extensão remanescente integra das vigas. Essa extensão representa a região compreendida entre o eixo de um apoio e a base da fissura mais próxima ao referido apoio, isto é, são as cotas $d_{cr,e}$ (extremo esquerdo) e $d_{cr,d}$ (extremo direito) mostradas na Figura 7.2. Ainda, a Tabela 7.3 também desvela o espaçamento médio entre fissuras no trecho de flexão pura das vigas, $s_{cr,m}$. Nessa investigação, apenas as fissuras que propagaram além, ou próximo, do eixo longitudinal de simetria das peças foram ponderadas. Admitiu-se que fissuras com alcance inferior contribuíram parcamente à resposta não linear das vigas.

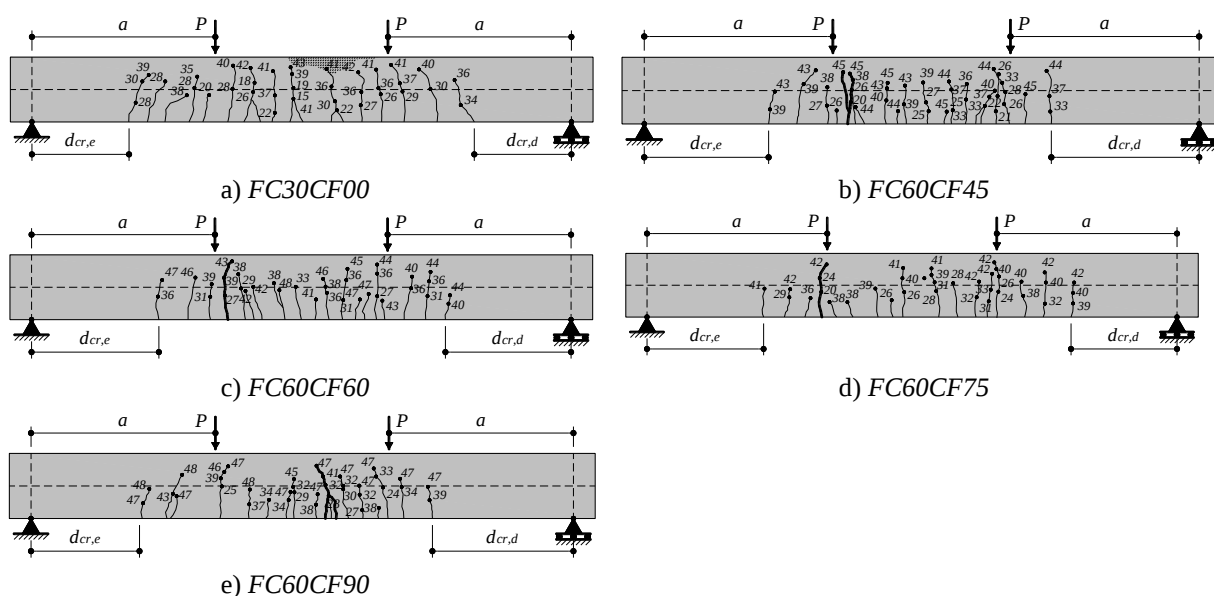


Figura 7.2 – Representação das fissuras das vigas.

Referente à análise das cotas $d_{cr,e}$ e $d_{cr,d}$, percebeu-se, consultando as razões $(d_{cr,CRFA}/d_{cr,CA})_e$ e $(d_{cr,CRFA}/d_{cr,CA})_d$ na Tabela 7.3, que a eficácia da supressão do reforço convencional foi aferida razoavelmente por essa metodologia. Condição esperada, visto que o momento fletor está diminuindo dos pontos de aplicação da carga para os apoios. Consequentemente, a peça com o reforço mais eficaz apresentará, evidentemente, extensão integral maior no vão de cisalhamento. Em termos gerais, o indicador em discussão concordou com os sinais apresentados anteriormente, *i.e.*, exame de $(P_{CRFA}/P_{CA})_{max}$ e $(m_{CRFA}/m_{CA})_{max}$.

A cerca das medidas de $s_{cr,m}$, o índice $(s_{cr,CRFA}/s_{cr,CA})_m < 1,0$ firmou que a redistribuição dos esforços, no caso, momentos fletores, nas vigas em CRFA-ER foi melhor que na viga em CA-RN. Essa circunstância reforçou o que se comentou para a análise da tenacidade das peças, visto que maior tenacidade implica em maior capacidade para redistribuir os esforços, ou seja, mais fissuras entre os pontos de aplicação da carga e, consequentemente, menores espaçamentos entre fissuras.

Oportunamente, ressalta-se que o corrente panorama também corroborou a hipótese que se idealizou para avaliar a tenacidade das vigas *FC60CF60* e *FC60CF75*, pois $(s_{cr,CRFA}/s_{cr,CA})_m \approx 0,90$ mostrou que essas vigas foram as menos favorecidas quanto à análise da redistribuição dos esforços, ou seja, concernentemente ao julgamento de $s_{cr,m}$.

Tabela 7.3 – Ilustração do processo de fissuração.

Vigas	$d_{cr,e}$ (mm)	$d_{cr,d}$ (mm)	$s_{cr,m}$ (mm)	$(d_{cr,CRFA}/d_{cr,CA})_e$	$(d_{cr,CRFA}/d_{cr,CA})_d$	$(s_{cr,CRFA}/s_{cr,CA})_m$
<i>FC30CF00</i>	45,00	44,00	12,33±4,41	-	-	-
<i>FC60CF45</i>	56,00	66,00	9,13±3,52	1,24	1,50	0,74
<i>FC60CF60</i>	59,00	59,00	11,29±3,59	1,31	1,34	0,92
<i>FC60CF75</i>	55,00	50,00	10,71±6,92	1,22	1,14	0,87
<i>FC60CF90</i>	49,50	65,00	9,88±4,97	1,10	1,48	0,80

Nesse momento, classificar o modo de ruína das vigas ficou facilitado, diante a gama de informação já apresentada. Ainda assim, apresenta-se a Tabela 7.4, a qual revela os pontos julgados para se apurar a referida classificação.

Comunica-se, adicionalmente, que o plano de ruína das vigas foi identificado na Figura 7.2, fissuras retratadas por linhas espessas. Representação diferenciada foi praticada apenas na viga de referência, *FC30CF00*, onde se sombreou a área entre os pontos de aplicação da carga para simbolizar o seu modo de ruína, flexão devido ao esmagamento do concreto. Nas demais vigas, a ruína aconteceu na região tracionada, flexão por conta de deformações plásticas nímias no reforço convencional e do arrancamento das fibras da massa de concreto.

Tabela 7.4 – Classificação da ruína das vigas.

Parâmetros	Vigas				
	<i>FC30CF00</i>	<i>FC60CF45</i>	<i>FC60CF60</i>	<i>FC60CF75</i>	<i>FC60CF90</i>
Ductilidade na relação $P-\delta$	✓	✓	N.O.	N.O.	✓
Ductilidade na relação $m-\phi$	✓	N.O.	N.O.	✓	N.O.
Escoamento do reforço tracionado	✓	✓	✓	✓	✓
Esmagamento do concreto (bloco compr.)	✓	✗	✗	✗	✗
Esmagamento do concreto (diag. compr.)	✗	✗	✗	✗	✗
Deslizamento da diagonal tracionada	✗	✗	✗	✗	✗
Arrancamento das fibras	-	✓	✓	✓	✓
Ruptura das fibras	-	✗	✗	✗	✗
Modo de ruína	FC	FT	FT	FT	FT

Legenda: N.O. = não observado (registro incompleto); FC = flexão (esmagamento do concreto); FT = flexão (deformação excessiva do reforço tracionado).

8. CONCLUSÕES

Nesse estudo, informações experimentais foram geradas para oportunizar discussões quanto à possibilidade de suprimir os reforços convencionais, barras de aço longitudinais/transversais, de vigas em CA-RN a partir da aplicação de CRFA-ER. Para esse propósito, cinco vigas foram preparadas, sendo uma de referência, $C_f = 0,0 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{l,t} = 0,91 \%$, $\rho_w = 0,11 \%$ e $f_{c,m} = 30,0 \text{ MPa}$ e quatro em CRFA-ER, com C_f variando em 45,0, 60,0, 75,0 e 90,0 kg/m^3 , $\rho_{l,t} = 0,39 \%$ (supressão de $\approx 60,0 \%$), $\rho_w = 0,0 \%$ (supressão de 100,0 %) e $f_{c,m} = 60,0 \text{ MPa}$. Fundamentado nas relações *carga-deslocamento* e *momento-curvatura*, assim como nos resultados de caracterização dos materiais, as seguintes conclusões foram assinaladas:

- O concreto armado de resistência normal (CA-RN) foi adequadamente caracterizado a partir da relação *tensão-deformação*, a qual foi conseguida por meio de ensaios de compressão axial em cilindros, como sugere RILEM TC 148-SSC (1997) e RILEM TC 148-SSC (2000);
- A caracterização do CRFA exigiu, além do entendimento do comportamento à compressão, conhecer também a resposta à tração. Nesse sentido, os ensaios de flexão em três pontos em prismas entalhados, consoante RILEM TC 162-TDF (2002), asseguraram apropriadamente o entendimento desse comportamento com base na resposta *tensão-deslocamento*;
- Os ensaios de compressão revelaram que as fibras de aço não influenciam de modo significativo no valor de f_c . Todavia, observou-se que C_f produza um impacto maior no registro de ε_{fc} (deformação correspondente à f_c).
- Os ensaios de flexão em três pontos de prismas entalhados, denotaram atuação benéfica das fibras de aço na resistência, na ductilidade e na tenacidade dos concretos. Nestes ensaios, ficou comprovada a evolução nos valores das resistências residuais dos corpos de prova prismático, superiores a 10,63 MPa, os quais apresentaram comportamento *hardening*;
- Reforçar concretos com $f_{c,m} \approx 60,0 \text{ MPa}$ com fibras *Dramix® 3D 65/60 BG*, $C_f \in [45,0-90,0] \text{ kg/m}^3$, foi a providencia adotada para assegurar o propósito do estudo, isto é, garantir a supressão dos reforços convencionais da viga em CA-RN, $f_{c,m} \approx 30,0 \text{ MPa}$, mantendo, ainda, a mesma resposta mecânica entre as peças. Os CRFA-ERs preparados aqui apresentaram

capacidade de absorção de energia suficiente, *i.e.*, resposta residual propícia, *hardening*, para viabilizar $\approx 60,0$ % de supressão do reforço longitudinal tracionado e 100,0 % de supressão do reforço transversal;

- O enquadramento anterior, testificou-se que as vigas em CRFA-ER apresentaram resistência, ductilidade e tenacidade conjuntamente equipolente à viga em CA-RN. Entretanto, recomendou-se praticar consumos $C_f \in [60,0-75,0]$ kg/m³. Consumos menores podem prover materiais com respostas mecânicas/residuais parcas e consumos maiores podem inviabilizar o preparo adequado do concreto, azando, novamente, em respostas reprimidas;

- A análise do modo de ruína das vigas observou a relação *carga-deslocamento*, as deformações registradas nas armaduras tracionadas e comprimidas, e a fissuração ocorrida sob a ação de cargas de flexão. Mediante os ensaios realizados, constatou-se que o modo de ruína foi o mesmo para CRFA, independente do consumo de fibra aplicado, e que, comparando a viga de referência com f_c de 30 MPa com as demais reforçadas com fibras de aço com f_c de 60 MPa, o padrão de fissuração e sua propagação foi similar.

- Em um enquadramento generalizado, independentemente da classe de resistência do concreto e do consumo de fibras manejado, reputou-se que CRFA's com resistência residual $f_{RI} \geq 10,0$ MPa e razão $f_{R3}/f_{RI} \geq 0,9$ representaram a condição necessária para assegurar supressões homólogas às comentadas antes.

8.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas algumas contribuições para prosseguimento de estudos relacionados ao CRFA-ER que possam colaborar com o tema desta dissertação:

- Variar a seção das peças, mantendo o seu comprimento, resistência à compressão e consumo de fibras constantes.
- Analisar teoricamente, vigas de CRFA-ER, aplicando um banco de dados com peças de resistência e características similares.

- Desenvolver vigas de CRFA-ER com resistência à compressão superiores a 60 MPa e consumo de fibras constante.
- Estudar experimentalmente a rigidez não fissurada e fissurada em vigas de CRFA-ER com f_c e C_f constantes.
- Confeccionar vigas de CRFA-ER com agregados diferentes.
- Analisar o comportamento à flexão de vigas de CRFA-ER com resistência à compressão superiores a 60 MPa com C_f variável.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 7222 – *Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. NBR 8522 – *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 8953 – *Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. NBR 12142 – *Concreto – Determinação da resistência de tração na flexão em corpos de prova prismáticos*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. NBR 12655 – *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ACI 363R-92 (1992). *State-of-the-art report on high-strength concrete*. Reported by ACI Committee 363, American Concrete Institute, 1992.

ACI 318R-19 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. Reported by ACI Committee 363, American Concrete Institute, 2019.

ACI 544.4R-18 (2018). *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*. ACI Committee. American Concrete Institute, 544, Reapproved 2018.

ACI 544.1R-96 (1996). *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*. Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute, Reapproved 2002.

AITCIN, P.C. (2003). *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Cement and Concrete Composites. v. 25, pg. 409-420.

ASTM C 469-02 (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C496 (2011). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Standards C 1550 (2008). *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*. American Society for Testing and Materials.

BARROS, J.A.O.; FIGUEIRAS, J.A. (1999). *Flexural behavior of sfrc: Testing and modeling*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 11, Issue 4, pg. 331-339. November.

BENCARDINO, F.; RIZZUTI, L; SPADEA, G.; SWAMY, R.N. (2008). *Stress-strain behavior of steel fiber-reinforced concrete in compression*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 20, Issue 3, pg. 255-263. March.

BIOLZI, L.; CATTANEO. S. (2017). *Response of steel fiber reinforced high strength concrete beams: Experiments and code predictions*. Cement and Concrete Composites. v. 77, pg. 1-13. December.

CEB-FIP (1991). *Model Code 1990: Working Group on High-Strength Concrete. High strength concrete: state of the art report*. CEB Bulletin D'Information, n. 197, August 1991.

CEB-FIP Model Code 10. (2012). *Model Code 2010*. Fédération Internationale du Béton, Final draft, v. 1, Bulletins 65.

CHAN, Y. N.; LUO, X.; SUN, W. (2000). *Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C*. Cement and Concrete Research. v. 30, pg. 247-251. November.

DELUCE, J.R.; VECCHIO, F.J. (2013). *Cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete members containing conventional reinforcement*. ACI Structural Journal, v. 110, Issue 3, pg. 481-490. May.

EZELDIN, A.S.; BALAGURU, P.N. (1992). *Normal and high strength fiber reinforced concrete under compression*. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, v.4, pg. 415-429. October.

HWANG, J-H.; LEE, D.H.; JU, H.; KIM, K.S.; SEO, S-Y.; KANG, J-W. (2013). *Shear Behavior Models of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Modifying Softened Truss Model Approaches*. Materials, v. 6, pg. 4847-486. October.

HSU, L.S.; HSU C.T.T. (1994). *Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression*. ACI Structural Journal. v. 91, pg. 448-457. March.

ISO 15630-1 (2002). *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire*. International Standard, First edition.

JSCE 82 (2008). *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*. Japan Society of Civil Engineers.

JIANYONG, LI; e YAN, YAO (2001). *A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete*. Cement and Concrete Research. v. 31, pg. 1203-1206. May.

JIS A 1149 (2017). *Method of test for static modulus of elasticity of concrete*. Japanese Industrial Standard.

KAZEMI, M.T.; GOLSORKHTABAR, H.; BEYGI, M. H. A.; GHOLAMITABAR, M. (2017). *Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods*. Construction and Building Materials. v. 142, pg. 482-489. March.

KHAN, M.I.; LINSDALE, C.J. (2002). *Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete*. Cement and Concrete Research. v. 32, pg. 123-131. July.

LARRARD, FRANÇOIS DE; SEDRAN, THIERRY (2002). *Mixture-proportioning of high-performance concrete*. Cement and Concrete Research. v. 32, pg. 1699-1704. July.

LEE, S-C.; OH, J-H; CHO, J-Y. (2015). *Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers*. Materials, v. 8, pg. 1442-1458. March.

LEE, S-C; OH, J-H; CHO, J-Y.; (2011). *Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Development*. ACI Materials Journal, Title no. 108-M56, pg. 516-525. October.

MANSUR, M.A.; CHIN, M.S.; WEE, T.H. (1999). *Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression*. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. v.11, pg. 21-29. January.

MONTAIGNAC, R. D. E.; MASSICOTTE, B.; CHARRON, J-P; NOUR, A. (2012). *Design of SFRC structural elements: Postcracking tensile strength measurement*. Materials and Structure, v. 4, pg. 609-622. April.

MONTAIGNAC, R. D. E.; MASSICOTTE, B.; CHARRON, J-P; NOUR, A.; (2012). *Design of SFRC structural elements: flexural behaviour prediction*. Materials and Structure, v. 45, pg. 623-636. October.

NATARAJA, M.; DHANG, N.; GUPTA, A. (1999). *Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression*. Cement and Concrete Composites. v. 21, pg. 383–390. December.

PENDYALA, R.; MENDIS, P.; PATNAIKUNI, I.; (1996). *Full-range behavior of high-strength concrete flexural members: comparison of ductility parameters of high and normal strength concrete members*. ACI Structural Journal. v. 93, n.1, pg. 30-35, January-February.

RILEM FMC-50 (1985). *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. Materials and Structures. v, 18, pg. 285-290.

RILEM TC 148-SSC. (1997). *Strain-softening of concrete in uniaxial compression. Test methods for the strain-softening response of concrete*. Materials and Structures, v. 30, pp. 195-209, May.

RILEM TC 148-SSC. (2000). *Test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression. Strain softening of concrete - Test methods for compressive softening*. Materials and Structures, v. 33, pp. 347-351, July.

RILEM TC 162-TDF. (2002). *Bending test: Final recommendation. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*. Materials and Structures, v. 35, pp. 579-582, November.

RILEM TC 162-TDF. (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ϵ Design method, Final Recommendation*. Materials and Structures, v.36, 560-567. October.

SOLTANZADEH, F.; BARROS, J. A. O.; SANTOS, R.F.C. (2015). *High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research*. Construction and Building Materials. v. 77, pg. 94-109. January.

THOMAS, J.; RAMASWAMY, A. (2007). *Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 19, pg. 385-392. May.

UNI EN 14651 (2007). *Test Method for Metallic Fibre Concrete. Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality - LOP, Residual)*. European Committee for Standardization, 2007.

WANG, Z.L.; WU, L.P.; WANG, J.G. (2010). *A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression*. Construction and Building Materials, v. 24, Issue 8, pg. 1358-1363. August.

YANG, I. H.; JOH, C.; KIM, B. (2010). *Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending*. Engineering Structures. v. 32, pg. 3478-3487.

YOO, D.; YOON, Y.; BANTHIA, N. (2015). *Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate*. Cement and Concrete Composites. v. 64, pg. 84-92. October.

YOO, D.; YOON, Y. (2015). *Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers*. Engineering Structures. v. 102, pg. 409-423. September.

ZAIN, M. F. M.; MAHMUD, H. B.; ILHAM, ADE; FAIZAL, M. (2002). *Prediction of splitting tensile strength of high performance concrete*. Cement and Concrete Research. v. 32, pg. 1251-1258. July.