



Patrícia Barreto de Lima

**Comportamento mecânico de vigas de
concreto de ultra-alto desempenho**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso
Co-orientador: Prof. Flavio de Andrade Silva

Rio de Janeiro
Setembro 2021



Patrícia Barreto de Lima

Comportamento mecânico de vigas de concreto de ultra-alto desempenho

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Flavio de Andrade Silva

Co – orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Pablo Augusto Krahl

Departamento de Estruturas (FEC-DES) – UNICAMP

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Patrícia Barreto de Lima

Graduada em Engenharia Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) em 2016.

Ficha Catalográfica

Lima, Patrícia Barreto de

Comportamento mecânico de vigas de concreto de ultra-alto desempenho / Patrícia Barreto de Lima ; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso ; co-orientador: Flávio de Andrade Silva. – 2021.

90 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Concreto de ultra-alto desempenho. 3. Fibras. 4. Resistência. 5. Vigas. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Silva, Flávio de Andrade. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD:624

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e sabedoria para chegar até aqui.

Aos meus queridos pais, Jairo e Rosilene, e a minha irmã Tatiane por toda confiança que tiveram em mim.

Ao meu esposo Fillipe pelo amor, paciência e companheirismo durante todo esse tempo.

Ao meu filho Ravi, que mesmo sem saber, me fez perceber o quanto eu sou forte e me motivou cada vez mais a me dedicar à dissertação, mesmo com o desafio da conciliação com a maternidade.

Ao meu professor e orientador Daniel Cardoso, que devido sua orientação, pude adquirir mais conhecimento e um grande amadurecimento profissional durante a realização deste trabalho.

Ao meu professor e coorientador Flávio Silva, que devido a sua dedicação e prestatividade, me ajudou com excelência na elaboração desse estudo, principalmente nos ensaios experimentais.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, que durante todo o curso transmitiram ensinamentos importantes para a realização deste trabalho.

À toda equipe do laboratório de Estruturas e Materiais, em especial Jhansen, Euclides e Rogério, que com todo o cuidado e eficiência, puderam me auxiliar durante os ensaios experimentais.

A todos os colegas de laboratório, em especial, Kíssila Goliath, Ana Carolina Trindade e Victor Nogueira, que durante a minha gravidez no período de pandemia, me ajudaram nos ensaios experimentais de forma excepcional.

Ao colega Raphael Manfredi, por ter me disponibilizado informações de extrema importância para a elaboração desse estudo.

Aos amigos que tive o prazer de ganhar na PUC-Rio, em especial ao William, Júlio, Nayara, Iranildo e Ronald, que diariamente tornaram o desafio do mestrado em algo mais leve e com todo apoio nos momentos difíceis me ajudaram chegar até aqui.

À minha família e aos meus amigos que apesar das dificuldades sempre me ajudaram a não desistir.

À Capes e à PUC-Rio, pelo suporte financeiro, que foi de extrema importância para a realização dessa pesquisa.

À Ibrata pela disponibilização dos agregados e a LafargeHolcim pela doação de cimento CPV-ARI.

À Belgo Bekaert Arames pela disponibilização das fibras de aço.

A todos que de alguma forma ajudaram na elaboração deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Lima, Patrícia Barreto de; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador); Silva, Flávio de Andrade (Coorientador). **Comportamento mecânico de vigas de concreto de ultra-alto desempenho**. Rio de Janeiro, 2021. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho avalia o efeito da utilização de concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) em elementos estruturais, analisando seu comportamento à flexão e o impacto da utilização desse material no seu dimensionamento. Através de ensaios de caracterização do material, foram estudadas as suas propriedades mecânicas. Os resultados dos testes já apresentavam resistência à compressão de 104 MPa com 7 dias de idade e 142 MPa aos 28 dias de idade, além de um aumento na capacidade de carga e na ductilidade dos corpos de prova com o aumento da quantidade de fibras utilizadas no CUAD. Na escala estrutural, foram analisadas quatro vigas de concreto armado, onde duas foram produzidas com concreto de ultra-alto desempenho e duas com concreto convencional (CC), com taxa de armaduras de 0,44% e 1,78%. Primeiramente foi realizada uma análise comparativa dos resultados dos momentos obtidos experimentalmente e teoricamente (baseado nas normas NBR 6118:2014, ACI 544.4R-18 e Model Code 2010) não apresentando diferença significativa. Posteriormente, através dos resultados dos ensaios foi possível verificar que, a utilização do CUAD melhora, no geral, as propriedades mecânicas dos elementos analisados. A utilização do CUAD em vigas subarmadas apresenta resultados similares às vigas normalmente armadas com CC. Além disso, quando combinadas a utilização do CUAD com o aumento da taxa de armaduras, os resultados melhoram significativamente, apresentando, por exemplo um ganho na capacidade de carga de aproximadamente 40% no aumento da taxa geométrica de armaduras e de 75% com o aumento da taxa de armaduras combinada com a utilização do CUAD.

Palavras-chave

Concreto de ultra-alto desempenho; Fibras; Resistência; Vigas

Abstract

Lima, Patrícia Barreto de; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor); Silva, Flávio de Andrade (Co-advisor). **Mechanical behavior of ultra-high performance concrete beams**. Rio de Janeiro, 2021. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work evaluates the effect of the use of ultra-high performance concrete (UHPC) in structural elements, analyzing its behavior to bending and the impact of the use of this material on its dimensioning. Through tests of characterization of the material, its mechanical properties were studied. The results of the tests already presented compressive strength of 104 Mpa at 7 days of age and 142 Mpa at 28 days of age, in addition to an increase in load capacity and ductility of the specimens with the increase in the amount of fibers used in the UHPC. In the structural scale, four reinforced concrete beams were analyzed, two of which were produced with ultra-high performance concrete and two with conventional concrete (CC), with an armor rate of 0.44% and 1.78%. First, a comparative analysis of the results of the moments obtained experimentally and theoretically (based on the norms NBR 6118:2014, ACI 544.4R-18 and Model Code 2010) was performed, with no significant difference. Subsequently, through the results of the tests it was possible to verify that the use of UHPC improves, in general, the mechanical properties of the analyzed elements. The use of UHPC in underarmed beams presents similar results to beams normally armed with CC. In addition, when combined with the use of UHPC with increased reinforcement rate, the results improve significantly, presenting, for example, a gain in load capacity of approximately 40% in the increase in the geometric rate of reinforcements and 75% with the increase in the reinforcement rate combined with the use of UHPC.

Keywords

Ultra-high Performance Concrete; Fibers; Resistance; Beams

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Conceitos e definições	18
1.2	Motivação	25
1.3	Objetivos	25
1.4	Organização do trabalho	26
2	Revisão bibliográfica	27
2.1	Concreto de ultra-alto desempenho	27
2.2	Composição do concreto de ultra-alto desempenho	28
2.3	Propriedades do concreto de ultra-alto desempenho	34
2.3.1	Tenacidade	34
2.3.2	Resistência à compressão	35
2.3.3	Resistência à tração na flexão	36
2.4	Vigas de concreto reforçado com fibras de aço	38
2.5	Vigas de concreto de ultra-alto desempenho	39
2.6	Dimensionamento de vigas de concreto armado reforçado com fibras de aço submetidas à flexão	41
3	Programa experimental	47
3.1	Materiais utilizados	47
3.1.1	Cimento	47
3.1.2	Agregado	47
3.1.3	Adições	48
3.1.4	Aditivo	49
3.1.5	Fibras de aço	49
3.2	Dosagem do concreto	49
3.3	Procedimentos de mistura do CUAD	50
3.4	Ensaio na escala do material	51
3.4.1	Ensaio de espalhamento – cone de abrams invertido	51
3.4.2	Ensaio de resistência a compressão axial e módulo de elasticidade	53
3.4.3	Ensaio de resistência à tração na flexão	54

3.5	Ensaio estruturais	57
4	Análise dos resultados	60
4.1	Ensaio de espalhamento – cone de abrams invertido	60
4.2	Resistência à compressão axial e determinação do módulo de elasticidade	61
4.3	Resistência à tração na flexão	63
4.4	Ensaio estruturais	66
5	Conclusão	81
6	Sugestões para trabalhos futuros	84
7	Referências	85

Lista de Figuras

Figura 1-1 – Passarela de Sherbrooke no Canadá, construída com concreto de alto desempenho (9)	20
Figura 1-2 – Seção transversal da viga inferior da passarela de Sherbrooke (10)	21
Figura 1-3 – Passarela para pedestres que liga a capital da Coreia do Sul, Seoul, à ilha de Seonyu (5)	21
Figura 1-4 – Ponte de Mars Hill, Wapello County, IA. (13)	22
Figura 1-5 – Ponte de la republique 2013 (14)	22
Figura 1-6 – Yuhang Opera House (15)	23
Figura 1-7 – Detalhes Yuhang Opera House (15)	24
Figura 1-8 – a) Estádio Jean Bouin b) Cobertura do Estádio Jean Bouin (15)	24
Figura 2-1 – Princípio da transferência de tensões em matrizes fissuradas	31
Figura 2-2 – Detalhe da zona de transição pasta-fibra (42)	32
Figura 2-3 – Curvas tensão-deformação de diversos tipos de concretos: convencional, de alto desempenho, de ultra-alto desempenho sem e com fibras, com e sem confinamento e/ou pressão. Adaptado de (27)	33
Figura 2-4 – Curva carga x deflexão	34
Figura 2-5 – Curvas tensão-deformação usuais	35
Figura 2-6 – Comportamento de deflection-hardening e deflection-softening em concretos reforçados com fibras, adaptado (47)	36
Figura 2-7 – Carga x CMOD (53)	37
Figura 2-8 – Comparação de curvas carga – deflexão entre CAD e CUAD, variando com a taxa de armaduras: a) 0,79%, b) 1,18% e c) 1,58 (Yang I-H, 2020)	40
Figura 2-9 – Padrões de fissuração e modos de falha típicos de CAD e CUAD a) Fase inicial b) Durante o ensaio e c) Ruptura (Yang I-H, 2020)	41
Figura 2-10 – Domínios de deformação ($\epsilon_c = 3\%$) (54)	42

Figura 2-11 – Distribuição seccional de deformações, tensões e forças em uma viga de concreto armado	43
Figura 2-12 – Modelos constitutivos simplificados para relação tensão-deformação do CRF pós-fissuração, sendo a) Modelo Rígido-Plástico e b) Modelo Linear (25)	44
Figura 2-13 – Modelo simplificado adotado no modelo rígido plástico (25)	45
Figura 2-14 – Diagrama de tensão para a determinação do f_{Fts} e f_{Ftu} , no modelo linear (25)	45
Figura 2-15 – Diagrama para uma seção de CRFA fissurado, sendo a) a seção e b) o diagrama de tensões e forças simplificado (47).	46
Figura 3-1 – Distribuição granulométrica da areia	48
Figura 3-2 – Distribuição granulométrica das adições	48
Figura 3-3 – Fibras de aço utilizadas	49
Figura 3-4 – Mistura do concreto de ultra-alto desempenho	51
Figura 3-5 – Ilustração com as dimensões do cone de Abrams (dimensões em mm) [67].	52
Figura 3-6 – Foto do ensaio de espalhamento	52
Figura 3-7 – Corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão	53
Figura 3-8 – Detalhe do ensaio de compressão	54
Figura 3-9 – Detalhe do corpo de prova (dimensões em mm), adaptado de (83)	55
Figura 3-10 – Detalhe do ensaio de flexão em prismas	56
Figura 3-11 – a) Viga armada no domínio 2 b) Viga armada no domínio 3	58
Figura 3-12 – Detalhe do ensaio de flexão em quatro pontos	58
Figura 3-13 – Ensaio de flexão de quatro pontos na viga	59
Figura 4-1 – Ilustração: a) Espalhamento do concreto; b) Diâmetro encontrado	60
Figura 4-2 – Rompimento aos 28 dias de corpos de prova cilíndricos moldado com CUAD e 160kg/m^3 de fibras de aço	62
Figura 4-3 – a) Gráfico tensão x Δ/L b) Gráfico tensão x dias	62
Figura 4-4 – a) Rompimento de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 40kg/m^3 de fibras de aço b) Fissura de corpo de	

prova prismático moldado com CUAD e 40kg/m ³ de fibras de aço	63
Figura 4-5 – a) Rompimento de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 160kg/m ³ de fibras de aço b) Fissura de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 160kg/m ³ de fibras de aço	64
Figura 4-6 – tensão-CMOD à flexão de corpos de prova prismáticos moldados com CUAD e: a) com 40kg/m ³ de fibras de aço (escala ampliada) b) com 40kg/m ³ de fibras de aço c) com 160kg/m ³ de fibras de aço	64
Figura 4-7 – Tenacidade-CMOD à flexão de corpos de prova prismáticos moldados com CUAD e 160kg/m ³ de fibras de aço	66
Figura 4-8 – Modos de falha das vigas estudadas a) 8mm CC; b) 8mm CUAD; c) 16mm CC; d) 16mm CUAD	67
Figura 4-9 – Força deslocamento das vigas estudadas a) 8mm; b) 8mm trecho inicial; c) 16mm; d) 16mm trecho inicial	68
Figura 4-10 – Momento x curvatura das vigas estudadas.	69
Figura 4-11 – Deflexão x vão das vigas estudadas a) 8mm CC; b) 8mm CUAD; c) 16mm CC; d) 16mm CUAD	72
Figura 4-12 – Momento x Abertura de fissura das vigas estudadas	75
Figura 4-13 – Perfis de deformação e deformação relativa das vigas estudadas a) 8mm CC (deformação relativa máxima de 4,5%); b) 8mm CUAD (deformação relativa máxima de 3,0%).	75
Figura 4-14 – Perfis de deformação e deformação relativa das vigas estudadas a) 16mm CC (deformação relativa máxima de 8,0%); b) 16mm CUAD (deformação relativa máxima de 1,8%);	76
Figura 4-15 – a) Momento x tensão do aço b) Momento x deformação do aço	76
Figura 4-16 – Deformação x tempo do aço das vigas estudadas	78
Figura 4-17 – Momento x curvatura a) Autor b) (47)	79
Figura 4-18 – Momento x abertura de fissura a) Autor b) (47)	80
Figura 4-19 – Momento x tensão no aço a) Autor b) (47)	80

Lista de tabelas

Tabela 3-1 – Composição dos concretos utilizados	50
Tabela 3-2 – Resultados do ensaio de compatibilização dos corpos de prova (83)	56
Tabela 4-1 – Resultado do ensaio de compressão axial da matriz E2.	61
Tabela 4-2 – Resultados do ensaio de tração na flexão	65
Tabela 4-3 – Resultados das resistências residuais	66
Tabela 4-4 – Análise comparativas dos momentos	71
Tabela 4-5 – Índices de ductilidade	74
Tabela 4-6 – Deformações do concreto	74

Lista de símbolos

L	Comprimento da fibra
L_{cr}	Comprimento crítico da fibra
h_{sp}	Altura do corpo de prova menos o entalhe
$f_{R,j}$	Tensão equivalente à carga P_j
P_j	Carga no ponto de abertura de fissura j
b	Largura da viga
h	Altura da viga
d	Altura útil da viga
x	Profundidade da linha neutra
A_s	Área de aço
ϵ_c	Deformação do concreto
ϵ_s	Deformação do aço
λ	Coefficiente para altura efetiva do bloco de compressão
α_c	Coefficiente de ajuste da resistência
f_{ck}	Resistência à compressão característica
σ_s	Tensão na armadura
F_c	Força de compressão no concreto
F_s	Força na armadura
M_k	Momento resistente
M_{CRF}	Momento resistente do concreto reforçado com fibras
f_{Ftu}	Resistência à tração pós-fissuração última
w_u	Abertura de fissura
f_{Fts}	Resistência residual de serviço
σ_{LOP}	Tensão no limite de proporcionalidade
ρ	Taxa de armadura
E	Módulo de elasticidade
$CMOD_{FL}$	Abertura da fissura correspondente ao limite de proporcionalidade
f_L	Tensão correspondente ao limite de proporcionalidade
$F_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima

F_L	Força máxima
T_4	Tenacidade correspondente à abertura de fissura de 4 mm
M_{CA}	Momento resistente do concreto armado
f_yk	Resistência ao escoamento do aço
M_{CARF}	Momento resistente do concreto armado reforçado com fibras
$1/\rho$	Curvatura
F_{cm}	Resistência média de dosagem
$M_{m\acute{a}x}$	Momento máximo
$M_{0,001}$	Momento em que a deformação do concreto é 1/1000
$\Delta_{m\acute{a}x}$	Deflexão máxima
$\Delta_{0,001}$	Deflexão em que a deformação do concreto é 1/1000
μ	Índice de ductilidade

Lista de Abreviaturas e Siglas

CUAD	Concreto de ultra-alto desempenho
CC	Concreto convencional
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
NBR	Norma técnica
ACI	American Concrete Institute
CAR	Concreto de alta resistência
CAD	Concreto de alto desempenho
CP-I	Cimento Portland Comum
CP-II F	Cimento Portland Composto com Filler
CP-V ARI	Cimento Portland de alta resistência Inicial
CMOD	Crack mouth opening displacement
LOP	Limite de proporcionalidade
TR	Technical Report
UHPC	Ultra High Performance Concrete
HSC	High Strength Concrete
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
CRF	Concreto reforçado com fibras
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
CARF	Concreto armado reforçado com fibras
MEC	Método do empacotamento compressível
VER	Norma europeia
DIC	Digital Image Correlation

*“Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram conquistadas
do que parecia impossível.”*

Charles Chaplin

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo. Com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, estruturas mais esbeltas vêm sendo desejadas, acompanhadas da necessidade de materiais apropriados, com elevada relação resistência/peso, por exemplo. Sendo assim, o concreto passou a não ser apenas uma mistura de cimento, água e agregados, mas também constituído por outros elementos com capacidade de modificar suas propriedades e corrigir algumas deficiências dos concretos convencionais.

Dentre os desafios, buscava-se aumentar a resistência e a durabilidade do concreto convencional sem comprometimento de sua trabalhabilidade, necessária para a moldagem de elementos estruturais. Surgiu então o CAD (concreto de alto desempenho), um material que apresenta comportamento em patamar mais elevado que os CC (concretos convencionais), atendendo satisfatoriamente às exigências requeridas pelo proprietário ou pelo usuário em conformidade com os projetistas da estrutura de concreto (1).

Com relação à nomenclatura, é importante diferenciar o concreto de alta resistência (CAR) do concreto de alto desempenho (CAD). Além da alta resistência oferecida pelo primeiro, o CAD possui outras características tais como baixa permeabilidade, baixa retração ou elevada durabilidade (2).

Posteriormente, o Concreto de Pós Reativos (CPR), também conhecido como Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) (1), surgiu como uma evolução ao CAD, com resistência superior, ausência de agregados graúdos e utilização de diferentes materiais, como microfibras de aço, em sua composição.

A utilização do CUAD pode levar a reduções tanto do custo global de reparação quanto diminuição do número de intervenções ao longo da vida útil da estrutura. Dentre os benefícios, está a maior capacidade resistente à fadiga

(associada à fissuração), à abrasão (desgaste superficial) e às intempéries (efeito térmico, poluição do ar, água da chuva). A adição de fibras promove uma grande capacidade de absorção de energia e redistribuição de esforços (3).

Segundo Buttignol et al. (2018), em diversos países, a utilização do concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é adotada em construções de grande porte devido à necessidade da utilização de elementos estruturais com características diferenciadas. Porém, a disseminação da sua utilização é dificultada devido ao seu alto custo e necessidade de mão de obra especializada, para a definição de um padrão correto de produção (4).

Engenheiros americanos observaram após alguns anos de utilização, danos relevantes em pontes que comprometem a sua vida útil, mostrando a necessidade da utilização de soluções mais duradouras e com propriedades mecânicas superiores às alcançadas com a utilização do concreto convencional (3). A partir de 1990, o concreto de ultra-alto desempenho passou a ser utilizado com frequência em reformas de pontes e rodovias americanas, mostrando também que a utilização do CUAD aumenta a agilidade na montagem de peças e painéis modulares (5). Além dos Estados Unidos, alguns países como o Canadá, França, Espanha, Japão, Coreia do Sul, Alemanha, Áustria e Malásia utilizaram este material para a realização de obras públicas (3).

Richard (6) estudou a composição e a aplicabilidade do concreto de pós-reativos, onde foi possível alcançar uma resistência à compressão de 810MPa através da aplicação de um certo número de princípios básicos como: Aumento da homogeneidade por eliminação de agregados graúdos; Aumento da densidade compactada por otimização da mistura granular e aplicação de pressão antes e durante a preparação; Melhoria da microestrutura por tratamento térmico pós-cura; Aumento da ductilidade através da incorporação de fibras de aço de pequeno porte; Manter os procedimentos de mistura e fundição o mais próximo possível da prática existente.

Raheem et al. (7) investigaram o efeito de materiais constituintes como pó de quartzo, sílica, fibras de aço e tamanho do agregado sobre a resistência à compressão e às propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho. Os resultados mostraram que o uso de 20% de pó de quartzo,

areia combinada e 2% fibras de aço obteve um resultado positivo pois aumentou a resistência a compressão em todas as idades.

Alsaman et al. (8) realizaram um estudo onde foi analisado o módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho utilizando materiais disponíveis localmente. Foram examinados efeitos da graduação de areia, teor e tipo de aglutinante, e fibras de aço. O módulo de elasticidade variou de 36,9 Gpa a 45,9 Gpa.

Na sequência serão citadas algumas obras de destaque quando mencionamos a utilização do concreto de ultra-alto desempenho. A primeira ponte a ser construída com o CUAD no mundo foi a passarela de Sherbrooke, no Canadá, em 1997. A passarela possui 60 metros de comprimento e foi erguida em um sistema de treliça com seis segmentos pré-moldados de CUAD com 10 metros de comprimento, compondo um arco de 60 metros de vão (Figura 1-1). Cada segmento possui 3 metros de altura, como se observa na Figura 1-2, que representa a seção transversal da viga inferior da passarela (1).



Figura 1-1 – Passarela de Sherbrooke no Canadá, construída com concreto de alto desempenho (9)

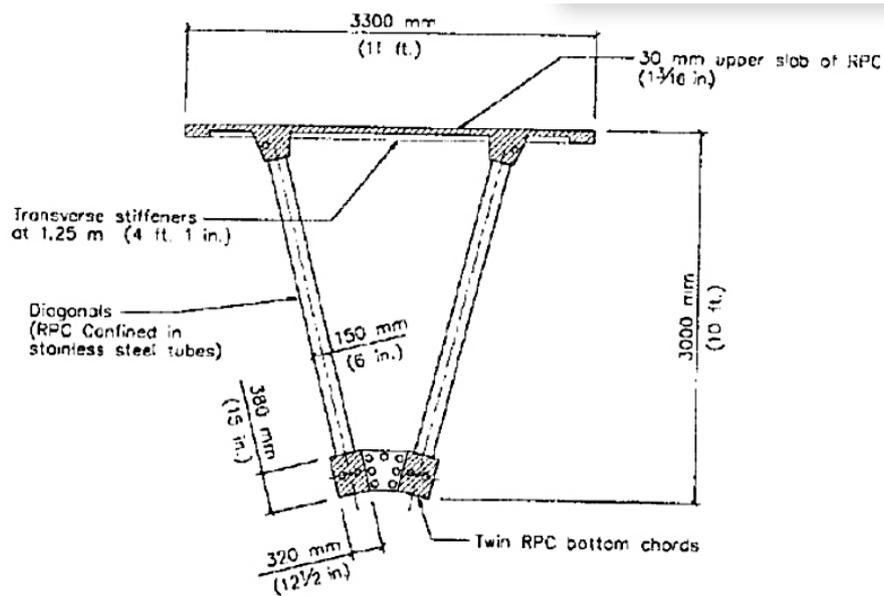


Figura 1-2 – Seção transversal da viga inferior da passarela de Sherbrooke (10)

Influenciada pela obra canadense, também vale destacar a passarela para pedestres que liga a capital da Coreia do Sul, Seoul, à ilha de Seonyu. Inaugurada em 2002, a passarela conta com 120 metros de vão livre e tabuleiro de apenas 3 cm de espessura (Figura 1-3). Ela está localizada em um parque com espécies de bambus, e o projeto busca homenagear justamente a flexibilidade da madeira (5).



Figura 1-3 – Passarela para pedestres que liga a capital da Coreia do Sul, Seoul, à ilha de Seonyu (5)

A primeira ponte construída em concreto fibroso de ultra-alto desempenho na América do Norte é a Ponte Mars Hill em Wapello County, Iowa, EUA, em 2006 (Figura 1-4). Com um vão único de 33,5 metros, a superestrutura possui vigas de seção “I” com 1,14m de altura. As vigas pré-fabricadas protendidas não possuem armadura de cisalhamento (11,12).



Figura 1-4 – Ponte de Mars Hill, Wapello County, IA. (13)

Outro exemplo da utilização do CUAD é a ponte acima do rio Lez, a *pont de la République* (Figura 1-5). Ela precisava ser extremamente resistente à corrosão e umidade química. A estrutura foi elaborada com CUAD, com 17 metros de largura e 74 metros de comprimento. Inclui três seções de comprimento igual, cada uma compreendendo vigas pré-moldadas apoiadas por dezessete pilares protendidos pré-moldados de CUAD (13).



Figura 1-5 – Ponte de la republicue 2013 (14)

A utilização do CUAD é bastante interessante na construção de estruturas espaciais leves, tabuleiro de pontes, vigas, colunas, passarelas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimentos de fachadas (4).

A LafargeHolcim possui o concreto Ductal, que se trata de um concreto de ultra-alto desempenho, apresentando características de resistência, ductilidade e durabilidade superiores aos concretos convencionais e de alta resistência. A seguir serão mostradas algumas obras em que foi utilizado esse material, onde as principais características são elementos esbeltos e mais leves, diminuindo o peso total da estrutura, indicado para arquitetura com elementos mais minimalistas ou as formas mais complexas.

A estrutura do Yuhang Opera House (Figura 1-6), localizado em Hangzhou, na China, está revestida em um padrão de fachada gráfica que faz referência ao gelo rachando no lago congelado. A solução com Ductal foi lançada com um conjunto de painéis com forma de triângulo. O maior painel é de 3000mm x 9000mm x 20mm, com acabamento suave (Figura 1-7) (15).



Figura 1-6 – Yuhang Opera House (15)



Figura 1-7 – Detalhes Yuhang Opera House (15)

O Estádio Jean Bouin (Figura 1-8), localizado em Paris, na França, possui a fachada ondulada revestida com Ductal que cobre 23.000m². Situado em frente à famosa instalação esportiva Parc des Princes, o Estádio foi projetado para ser leve e arejado. Graças às propriedades superiores do concreto de ultra-alto desempenho da Ductal, foi possível construir um envelope fino e leve e um telhado impermeável a partir de 3.500 painéis auto-portantes (15).



a)



b)

Figura 1-8 – a) Estádio Jean Bouin b) Cobertura do Estádio Jean Bouin (15)

1.2 MOTIVAÇÃO

Apesar de o concreto convencional ser um dos materiais mais utilizados na construção civil, com o avanço da tecnologia e com construções cada vez mais desafiadoras, foi necessário o aprimoramento deste tipo de concreto de forma que surgissem elementos estruturais cada vez mais leves e mais agradáveis no ponto de vista arquitetônico. Além disso, havia também a necessidade de superar as limitações que o concreto convencional apresenta como a baixa resistência a tração e a pouca ductilidade. Dessa forma, são necessários mais estudos a respeito da utilização de concreto com melhor desempenho, analisando a inclusão de fibras na sua constituição. Sua utilização em elementos estruturais já vem sendo estudada nos últimos anos (16–23). Busca-se aumentar a sua utilização com finalidade estrutural de forma que sejam fabricadas peças menores e mais leves, principalmente para obras de grande porte e solicitadas por grandes esforços. O estudo da sua utilização em vigas com armaduras é de grande importância para verificar o comportamento à flexão destes elementos estruturais, assim como a influência da utilização desse material no comportamento das barras de aço. Sendo assim, se torna de extrema importância a avaliação desses efeitos em vigas com diferentes taxas de armaduras, para analisar os benefícios da utilização do concreto de ultra-alto desempenho.

Outro ponto a ser mencionado é que a NBR 6118 (24) não contempla recomendações para o dimensionamento de concretos de ultra-alto desempenho (somente para concretos com resistência máxima de 90MPa), sendo assim, este trabalho contribui a nível nacional, para avaliar se a metodologia da NBR 6118 pode ser estendida para esse material e quais os cuidados necessários.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com diferentes taxas de armaduras e constituídas por concreto convencional e concreto de ultra-alto desempenho, verificando a influência da utilização desses materiais em suas propriedades mecânicas e na ductilidade das peças.

Também serão comparados os resultados obtidos nos ensaios experimentais das vigas analisadas com os resultados obtidos teoricamente. O dimensionamento foi baseado em normas como, NBR 6118:2014 (24), Model Code 2010 (25) e ACI 544.4R-18 (26), onde, de forma simplificada, o dimensionamento das vigas foi realizado computando-se o momento resistente relacionado a cada reforço de forma separada e depois, combinando-os para obtenção da resposta do reforço híbrido (26), verificando assim a possível utilização das suas recomendações no dimensionamento das peças estruturais de concreto de ultra-alto desempenho.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto de sete capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: é o capítulo que ressalta a relevância do tema, a motivação do estudo, os objetivos da pesquisa e a estrutura do trabalho;

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: é o capítulo que aborda os fundamentos do concreto de ultra-alto desempenho, sua composição, assim como as suas características mecânicas;

Capítulo 3 – Programa experimental: é o capítulo que descreve as características dos materiais utilizados e os procedimentos para a fabricação dos concretos e execução dos ensaios;

Capítulo 4 – Análise dos resultados: é o capítulo em que são apresentados os resultados obtidos e as análises dos mesmos;

Capítulo 5 – Conclusão: é o capítulo que compreende as conclusões obtidas por meio da análise feita de todo o programa experimental e apresenta as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 6 – Sugestão para trabalhos futuros: é o capítulo que apresenta as sugestões de estudos para os próximos trabalhos.

Capítulo 7 – Referências: é o capítulo que apresenta as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para entender o funcionamento do concreto de ultra-alto desempenho, é necessário, primeiramente, realizar um estudo teórico sobre seus fundamentos. Assim, este capítulo descreve os princípios básicos para obtenção do CUAD, suas propriedades e o estudo do comportamento de estruturas com esse material.

2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

O CUAD (concreto de ultra-alto desempenho) é caracterizado pela utilização de apenas agregados finos, eliminando os grãos, e pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos. São compostos basicamente de pós (pó de quartzo, cimento, sílica ativa, areia fina), fibras de aço de pequenas dimensões, superplastificante e água, onde os sólidos possuem dimensões inferiores a 2 mm e baixíssima relação água/ cimento, com valores próximos a 0,15 (27).

O desenvolvimento do CUAD resultou em um profundo estudo da utilização desses concretos especiais. Segundo Almeida (28), o potencial de aplicação pode ser agrupado em três categorias gerais: propriedades que beneficiam o processo de construção; aumento das propriedades mecânicas; e aumento das propriedades que geram maior durabilidade.

É possível atribuir diversas vantagens a esse tipo de material, dentre as quais pode-se citar: maior eficiência do projeto estrutural; peças com seções menores e mais leves, podendo reduzir custo com transporte e montagem; menor tempo gasto com instalação; menor permeabilidade, resultando em melhor resistência ao ataque de sulfatos e outros produtos químicos; estruturas com maior tempo de vida útil; e redução de danos durante a manipulação e colocação (28).

O grande desafio de hoje é a possibilidade de utilizar esse material em elementos estruturais na construção civil de forma que seja aceito economicamente e reproduza um bom custo-benefício. O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) ainda não é amplamente utilizado em construções de grande escala devido a requisitos específicos (como a velocidade dos misturadores e o tempo de pega, por exemplo) para a mistura de compostos, equipamentos industriais e qualificação de mão-de-obra (29).

2.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Os materiais utilizados na composição do concreto de ultra-alto desempenho devem ser escolhidos com atenção, pois possuem características próprias de grande importância no desempenho final do concreto. A análise e o estudo desses materiais devem ser realizados separadamente para melhor compreensão do seu papel na produção do CUAD.

A escolha do tipo de cimento exige uma indispensável verificação de compatibilidade entre cimentos e aditivos superplastificantes redutores de água (6). A utilização de cimentos mais finos não é recomendável, pois devido a sua maior área específica necessária a ser hidratada, maior o consumo de água necessário, gerando conseqüentemente um aumento na sua relação água/cimento com impacto em propriedades como resistência, permeabilidade e durabilidade do CUAD. Além disso, o maior consumo de água aumenta a velocidade da reação inicial do superplastificante, causando comprometimento em sua eficiência (30).

Na produção do concreto de ultra-alto desempenho, é aconselhada a escolha de cimentos mais puros possíveis, devido à grande quantidade de adições pozolânicas de qualidade superior às adições incorporadas nos cimentos comerciais, que serão acrescentadas à mistura de concreto. Sendo assim, recomenda-se a utilização de cimentos CP-I e CP-V ARI, sem levar em conta o tamanho das partículas. Apesar disso, outros tipos de cimentos também podem ser utilizados, desde que previamente estudados (1).

A granulometria exerce papel fundamental para a obtenção de bons resultados. A utilização somente da areia como único agregado, eliminando a utilização da brita, diminui a permeabilidade do concreto de ultra-alto

desempenho devido a uma maior homogeneização dos materiais, eliminando vazios do compósito. Além disso, a maior área de superfície gerada pelo menor diâmetro das partículas, resulta em uma melhor aderência entre a matriz e o agregado (2).

Richard et al. (6) explicam que os diâmetros das partículas devem ser definidos pelos valores de máximo e mínimo. As partículas máximas devem ser de 600 μ m e as partículas mínimas devem ser de 150 μ m, para que não cause interferência com os grãos máximos do cimento.

A sílica ativa é a adição mineral mais utilizada no Concreto de ultra-alto desempenho, no Brasil. Por ser extremamente fina (10 a 100 vezes menor que o grão de cimento), preenche o vazio entre os grãos maiores, propiciando uma estrutura mais compacta (31,32).

O emprego da sílica ativa em concretos de ultra-alto desempenho é justificado pela capacidade de diminuição da permeabilidade da pasta, aumento da resistência de aderência com o agregado miúdo (menor zona de transição), e pelo acréscimo das reações pozolânicas, intensificado pelo tratamento térmico durante etapa de cura (33). Devido ao pequeno diâmetro de suas partículas, possui grande superfície específica, o que justifica a sua reatividade, melhorando a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e volume de vazios no concreto.

O pó de quartzo é um ingrediente essencial durante o tratamento térmico do CUAD. A reatividade máxima durante a cura térmica é obtida para partícula de tamanho entre 5 μ m e 25 μ m. O tamanho médio da partícula do pó de quartzo usado para CUAD é de 10 μ m e é, portanto, da mesma classe granular do cimento. O material é adicionado à mistura para contribuir para o fechamento do pacote granulométrico, preenchendo os vazios deixados pelos grãos de areia e intensificar as reações pozolânicas quando submetido ao tratamento térmico (1).

Quanto aos superplastificantes, atualmente existem tipos identificados como de última geração. São mais eficientes e seus agentes dispersadores são à base de poliácrlato ou policarboxilato. Para o CUAD, as dosagens experimentais feitas com os superplastificantes de última geração utilizaram taxa de 1,5% a 2,5% do consumo de cimento, sendo mais utilizada a taxa de 2% (27).

O uso de aditivo é imprescindível para a produção dos concretos de ultra-alto desempenho, devendo ter alta eficiência para garantir a baixa relação água/cimento, levando ao aumento de resistência, durabilidade e aumento da trabalhabilidade sem mudança na composição da mistura. Como nem todos os tipos e marcas de aditivos superplastificantes reagem da mesma forma com um determinado cimento, a escolha do aditivo estará restrita aos ensaios de compatibilidade cimento-aditivo (34).

Segundo Collepardi et al. (35), os superplastificantes causam a dispersão das partículas aglomerantes do cimento na pasta do concreto. Essa dispersão causa um aumento da fluidificação na mistura de cimento. Porém, nem todos os superplastificantes comerciais possuem a mesma eficiência na dispersão de partículas de cimento dentro da mistura, na redução da quantidade de água e no controle da reologia de um traço com relação água/cimento muito baixa (33).

As fibras de aço utilizadas em elementos de construção contemplam uma grande variedade de geometrias. As primeiras utilizações em concreto ocorreram no início dos anos 60, com fibras retas e teores que variavam de 90 a 100kg/m³ (36). Elas dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade (37). No estado de pós-fissuração, as fibras atuam com o efeito de “costurar” e interceptar a progressão das microfissuras, evitando uma ruptura brusca, aumentando a tenacidade e conseqüentemente a durabilidade do compósito, conforme mostrado na Figura 2-1 (38). Para os concretos de ultra-alto desempenho, as fibras utilizadas possuem pequenas dimensões, como 13 mm de comprimento por 0,15 mm de diâmetro (6,39), 12mm por 0,20mm (40) e 13mm por 0,175mm (41).

Para que ocorra um bom aproveitamento das propriedades da fibra, se espera que a resistência ao seu arrancamento seja similar à sua resistência à ruptura. Quando a resistência ao arrancamento é muito inferior à resistência de ruptura, ocorre arrancamento da fibra com subutilização da mesma (28).

Pode ser analisado o efeito do comprimento da fibra em termos de mecanismos de transferências de tensão. O comprimento crítico, denominado como L_{cr} , pode ser definido como o comprimento mínimo necessário para que a tensão de cisalhamento resultante do atrito entre a fibra e a matriz seja igual à resistência de ruptura da fibra (28). Quando o comprimento da fibra (L) é

inferior ao comprimento crítico, ou seja, $L < L_{cr}$, a fibra não possui comprimento embutido suficiente para transferir ao concreto por aderência uma força equivalente à sua carga de ruptura. Quando uma fibra intercepta uma fissura, espera-se que o lado de menor comprimento embutido seja arrancado da matriz (17). Se o comprimento da fibra é consideravelmente maior que L_{cr} , todo o potencial da fibra consegue ser alcançado e o modo de falha é caracterizado por sua ruptura, aumentando sua tenacidade (28). A diferença entre comprimentos não só está relacionada à eficiência do reforço, mas também com seu modo de ruptura.

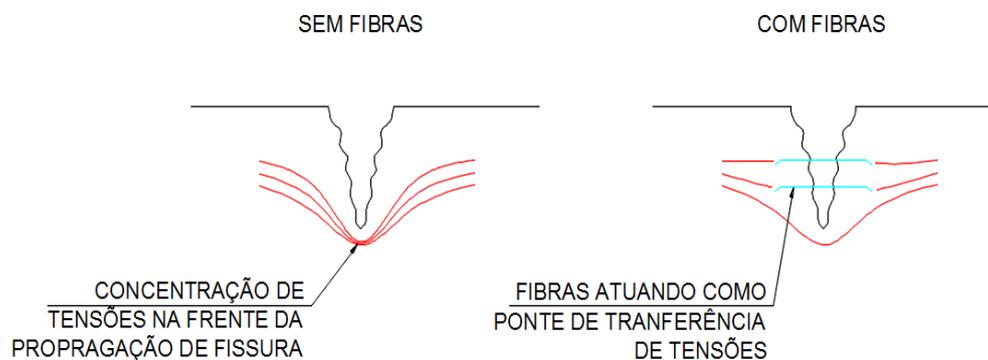


Figura 2-1 – Princípio da transferência de tensões em matrizes fissuradas

As matrizes de concreto de alto desempenho, graças à baixa relação água/cimento e pelos efeitos pozolânicos das adições, possuem zona de transição fibra-matriz menos porosa em virtude da presença reduzida de cristais de hidróxido de cálcio (Figura 2-2). Conseqüentemente, maior será a força necessária para arrancar a fibra após a fissuração da matriz, podendo ocorrer sua ruptura antes mesmo do seu arrancamento. Como a energia gasta para a ruptura da fibra é menor do que a necessária para o seu arrancamento, a tenacidade à flexão dos compósitos de matrizes de alta resistência pode diminuir (33). Esse problema pode ser solucionado com a utilização de fibras retas e lisas. Para esse tipo de fibras, as resistências ao arrancamento serão tão maiores quanto forem suas razões de aspecto e, quanto mais longas forem, mais eficiente será o incremento nas capacidades mecânicas do compósito (60).

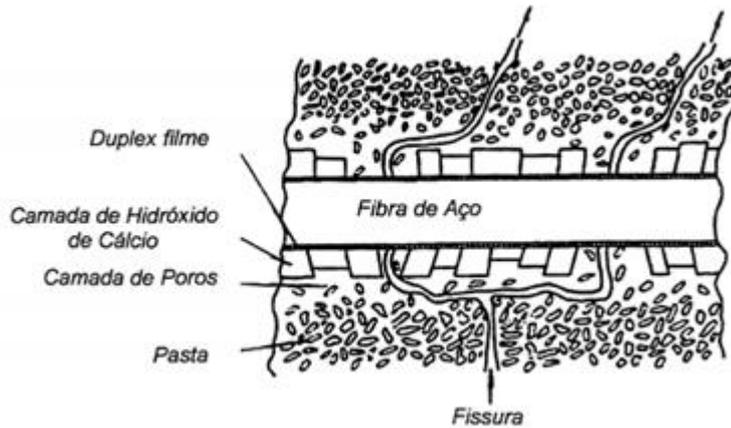


Figura 2-2 – Detalhe da zona de transição pasta-fibra (42)

De acordo com Aveston et al. (43), o volume crítico de fibras ($V_{f(crit)}$) é aquele para qual o compósito mantém uma resistência residual pós-fissuração igual à resistência à tração da matriz sendo determinado através da Equação 2.1. Concretos mais resistentes demandam maior volume de fibras para a manutenção da sua resistência, podendo prejudicar o comportamento pós-fissuração em função dos vazios provenientes da má compactação.

$$V_{f(crit)} = \frac{E_c}{E_m} \cdot \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu}} \quad (2.1)$$

Onde,

E_c = módulo elástico do compósito;

E_m = módulo elástico da matriz;

σ_{mu} = tensão de ruptura da matriz;

σ_{fu} = tensão de escoamento das fibras de aço;

Normalmente o volume crítico para as fibras de aço está na ordem de 1% (cerca de 80 kg/m³) para os concretos de resistência normal e de alto desempenho (32). Até esse valor, os concretos reforçados não apresentam aumento na sua capacidade portante, mas ocorre um aumento na tenacidade, podendo ser útil para sua aplicação como material de construção. No CUAD, o volume de fibra de aço utilizado é muito superior aos concretos normais e de

alto desempenho, podendo ocasionar perda de fluidez. O volume total de fibra varia de 1,5 a 3,0% do volume total da mistura, sendo 2% o valor correspondente mais econômico, aproximadamente 155 kg/m^3 de concreto (33).

Segundo Aïtcin (27), as matrizes de CUAD apresentam comportamento puramente elástico e ruptura frágil. A ductilidade é melhorada com o uso de fibras de aço com relação diâmetro/comprimento de acordo com o efeito de escala desejada. A Figura 2-3 mostra ensaios de CUAD desenvolvidos na Universidade de Sherbooke com 1,8% de fibras de 12mm de comprimento (140 kg/m^3). Se o CUAD for confinado em tubos de aço, a resistência à compressão e ductilidade aumentam, tendo sido obtido o valor de 375 MPa com deformação aproximada de 1%.

O ACI 544.1R (44) define como razão de aspecto o comprimento da fibra dividido pelo seu diâmetro equivalente. Valores típicos de razão de aspecto variam de 30 a 150 para fibras de 6,4 a 76mm. O aumento da razão de aspecto das fibras melhora propriedades do concreto endurecido, porém dificulta a trabalhabilidade no estado fresco (38).

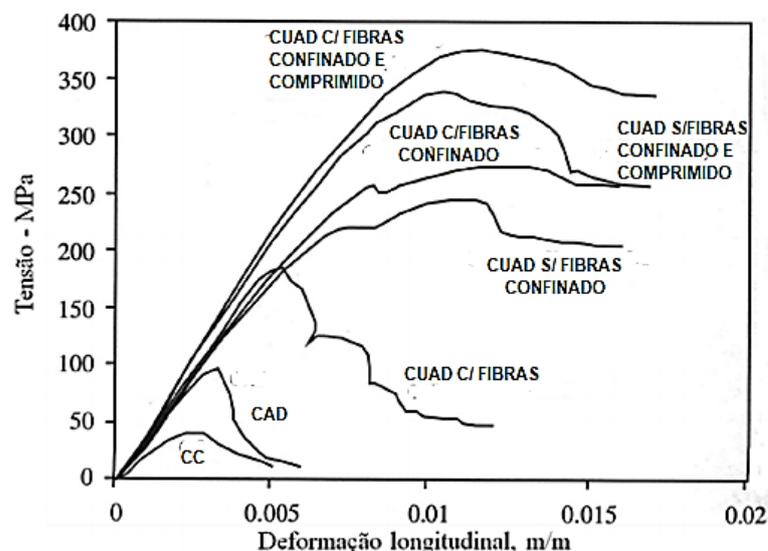


Figura 2-3 – Curvas tensão-deformação de diversos tipos de concretos: convencional, de alto desempenho, de ultra-alto desempenho sem e com fibras, com e sem confinamento e/ou pressão. Adaptado de (27)

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

As propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho são muito elevadas quando comparadas com o concreto convencional. Alguns ensaios permitem a obtenção dos parâmetros necessários ao desenvolvimento de uma lei de comportamento do material.

2.3.1 Tenacidade

A capacidade de absorver energia antes da ruptura, resistência à propagação de fissuras, significativa resistência residual pós-fissuração, ductilidade e capacidade de suportar grandes deformações é conhecida como tenacidade. A obtenção da tenacidade do compósito pode ser realizada através da área sob a curva carga – deflexão, conforme mostrado na Figura 2-4 (45).

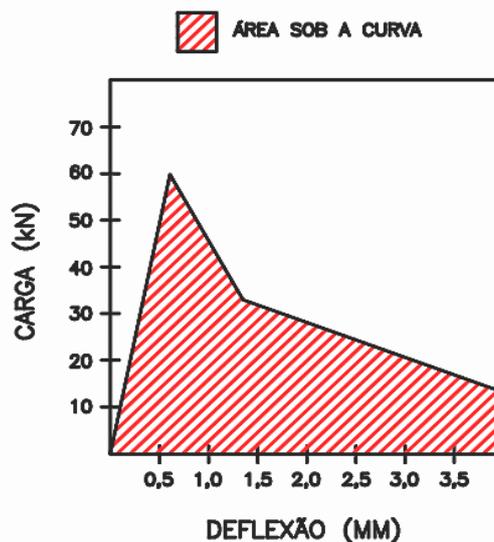


Figura 2-4 – Curva carga x deflexão

A fibra possui o importante papel de realizar o reforço do concreto na zona de pós-fissuração, pois garante a transferência de tensões ao longo das fissuras, gerando uma espécie de “costura” da matriz fissurada. Essa atuação poderá gerar um aumento na resistência do compósito se comparado à matriz, provocando uma elevação nas curvas de carga x deflexão depois do aparecimento da primeira fissura, aumento assim a tenacidade (38).

2.3.2 Resistência à compressão

De acordo com Richard e Cheyrezy (6), a densidade da mistura é um fator que influencia bastante a resistência à compressão do CUAD. Esta densidade também pode ser aumentada pela aplicação de pressão no concreto, antes e durante a concretagem, provocando redução do ar incorporado, remoção do excesso de água e compensação da retração química.

No caso do concreto convencional reforçado com fibras de aço (CRFA), as fibras atuam com efeito na ductilidade e tenacidade do concreto, não gerando efeito significativo na sua capacidade de carga. Já em concretos de ultra-alto desempenho, o efeito das fibras no aumento da capacidade de deformação do concreto somado à alteração dos materiais utilizados na fabricação da matriz, gera aumento na capacidade resistente. A Figura 2-5 mostra uma comparação desses três tipos de concreto (46).

As fibras de aço funcionam como pontes de transferência de tensões durante a expansão lateral do concreto na compressão. À medida que aumenta o carregamento, ocorre o arrancamento das fibras de aço, responsáveis pela maior tenacidade e ductilidade do compósito, assim como sua resistência residual (46–48).

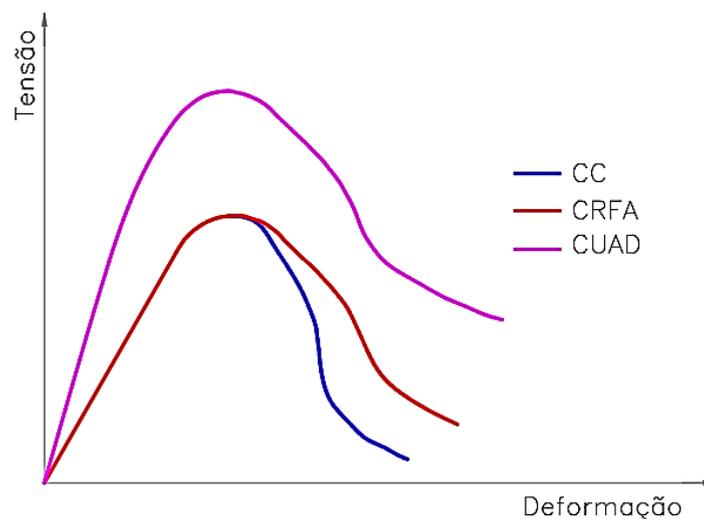


Figura 2-5 – Curvas tensão-deformação usuais

2.3.3 Resistência à tração na flexão

A adição de fibras em uma matriz de concreto influencia diretamente em sua resistência a flexão. Segundo a ACI 544.1R (44), a melhora no comportamento do compósito em ensaios de flexão é consideravelmente maior que nos ensaios de tração e compressão.

Naaman e Reinhardt (49) classificam o comportamento à flexão de concretos reforçados com fibras de duas maneiras: *deflection-softening* que se caracteriza pela queda na tensão após a abertura da única fissura na matriz; e *deflection-hardening* que se caracteriza pelo aumento na tensão após a primeira fissura. Após a fissuração neste último caso, múltiplas fissuras se formam enquanto a deformação aumenta até a tensão máxima. A Figura 2-6 exemplifica os dois comportamentos.

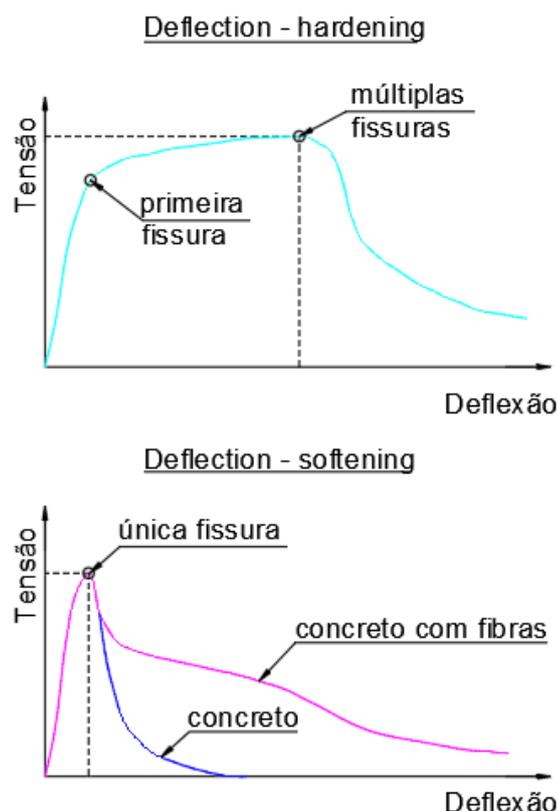


Figura 2-6 – Comportamento de deflection-hardening e deflection-softening em concretos reforçados com fibras, adaptado (47)

Diversas normas são utilizadas para se avaliar o comportamento do compósito à flexão. Entre elas podemos citar a JSCE-SF4 (50), a ASTM

C1609-12 (51) e VER 14651 (52). Como no estudo do concreto de ultra-alto desempenho o maior interesse é analisar o comportamento da zona pós-fissuração, costuma-se utilizar a recomendação da norma europeia VER 14651 (52). Trata-se de prismas com um entalhe no centro da parte inferior que permite a indução da formação da fissura nesse plano. O ensaio é circuito fechado (closed loop) com a velocidade do atuador sendo controlada pela abertura de fissura (CMOD – crack mouth opening displacement) obtida pelo clip-gauge, tendo assim maior estabilidade na resposta do material (45). Ao se calcular a tenacidade do compósito por este ensaio, despreza-se a dissipação de energia em outras partes do corpo de prova, considerando-se apenas a parcela de energia atribuída à abertura da fissura (53).

As cargas residuais em quatro pontos de abertura de fissura (CMOD = 0,5, 1,5 2,5 e 3,5 mm) e limite de proporcionalidade (LOP) são os parâmetros obtidos do ensaio de flexão em três pontos (Figura 2-7). A Equação 2.2 apresenta o cálculo dos valores de tensão com base nessas forças.

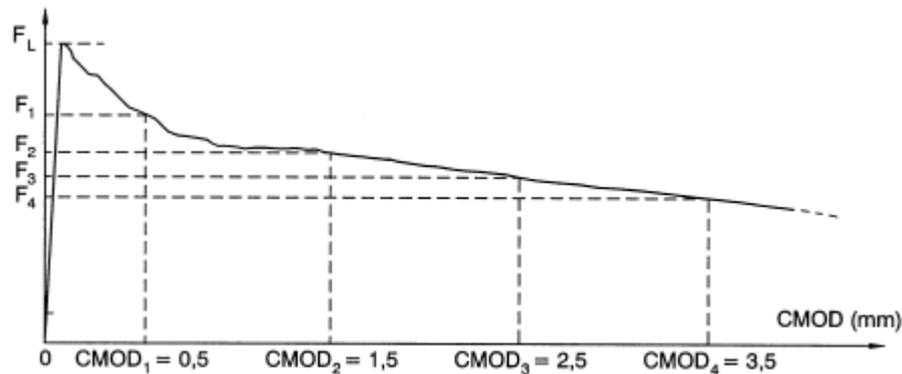


Figura 2-7 – Carga x CMOD (53)

$$f_{R,j} = \frac{3P_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (2.2)$$

Onde h_{sp} é a altura do corpo de prova menos o entalhe feito e $f_{R,j}$ é a tensão equivalente à carga P_j no ponto de $CMOD_j$, para $j = 1, 2, 3$ e 4 equivalentes a $CMOD = 0,5, 1,5, 2,5$ e $3,5$ mm (55).

2.4 VIGAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Diversos estudos (16,42,54-57) mostraram a eficiência da utilização de fibras de aço em conjunto com barras de aço como reforço de vigas de concreto. No geral, com a utilização das fibras de aço em vigas de concreto armado é possível ver um aumento na ductilidade dos elementos, além de uma mudança no padrão de fissuração e um aumento na capacidade de carga última, com resultados mais relevantes para reforços fibrosos com taxas de armaduras menores (47). Porém, ultimamente, alguns resultados mostraram perda de ductilidade provocada pela adição de fibras, em função do fenômeno de localização da fissura (56–58).

Bentur & Mindess (59) estudaram a adição de 120 kg/m³ de fibras de aço em concreto com taxa de armadura de 0,56%, onde foi observado um aumento de 55% na capacidade de carga. Já Pereira (60) concluiu que vigas de concreto de alta resistência (73 MPa) com taxa de armadura de 0,45% e com volume de fibras curtas de aço de 160 kg/m³ alcançam a mesma capacidade de carga de vigas sem fibras e com uma taxa de armadura de 0,70%.

Mertol et al. (61) analisaram vinte vigas com taxas de armaduras variando de 0,20% a 2,50%, com volume de fibras de aço de 77 kg/m³. Para taxas de armadura até 0,40%, os valores de carga última se mostraram superiores para todas as vigas reforçadas com fibras de aço quando comparadas com as vigas de concreto convencional, no entanto, os valores de deflexão última se mostraram menores para o CRFA (concreto reforçado com fibras de aço). Já para vigas com taxas de armadura maiores que 0,40%, os valores de deflexão última para o CRFA aumentaram até 300% em comparação ao concreto convencional.

Harajli et al. (62) estabeleceram um modelo para analisar a ligação entre as barras de aço e o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Observaram que a utilização de concreto reforçado com fibras de aço resultou em aumento de ductilidade e tenacidade relacionadas ao deslizamento da barra de aço no concreto, aumentando a dissipação de energia da ligação.

Ashour et al. (20) analisaram vinte e sete vigas com resistência à compressão do concreto variando de 49,79MPa a 102 MPa, taxas de

armaduras de 1,18 ,1,77 e 2,37% e volume de fibras 0,40 e 80 kg/m³. Foi observado que os momentos resistentes aumentaram com o aumento do volume de fibras, porém esse aumento foi menos significativo conforme o aumento da taxa de armaduras. Também foi observado através do resultado dos ensaios que o aumento da resistência à compressão e do volume de fibras gerou um aumento na rigidez à flexão.

Tan et al. (63) fizeram um estudo em dez vigas com taxa de armaduras de 1,60% e com volume de fibras variando de 0 a 160 kg/m³. Foi verificado que a utilização de 2% de fibras de aço reduz em aproximadamente 20% o tamanho das fissuras, quando realizada a comparação com uma referência sem fibras. Também foi observada uma estabilização mais rápida das fissuras que a do concreto armado convencional, quando analisadas as vigas em longo prazo.

Ning et al. (64) analisaram sete vigas de concreto de alta resistência (65 MPa) com taxas de armaduras variando de 0,76 a 1,18% e com volume de fibras de 30 e 50 kg/m³. Foi observado que com o aumento da taxa de armaduras, diminui a possibilidade de formação de uma fissura principal com abertura maior. Além disso, a utilização de fibras diminui a tensão atuante nas barras de aço.

Manfredi (47) em seu estudo utilizou vigas de concreto convencional com barras de 8mm, com diferentes volumes de fibras. As tensões pós primeira fissura foram comparadas e discutidas com base no ACI 544.4R-18, Model Code 2010 e TR 34. As normas de dimensionamento analisadas apresentaram resultados próximos aos experimentais, com o modelo rígido plástico descrito no Model Code 2010 se mostrando mais conservador em sua abordagem.

2.5 VIGAS DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Diversos estudos foram encontrados a respeito do Concreto de Ultra-alto desempenho com fibras de aço. Campione (16) e Yang et al. (17,18) verificaram que o uso de 1% e 2% de fibras de aço em concreto de ultra-alto desempenho, combinado com reforço de aço tradicional, leva a um comportamento mais dúctil e a uma maior eficácia no controle de fissuras. Já o aumento da capacidade de carga das vigas é realizado com quantidades de

fibras acima de 2%. Liang et al. (65) também verificaram um aumento no controle de fissuras com a utilização do CUAD, e que aumento da taxa de armaduras poderia aumentar a capacidade à flexão das vigas.

Nos estudos realizados por Ashour (20,23), Yoo et al. (21) e Yanping et al. (22), foi verificado que a capacidade à flexão aumenta à medida que a resistência a compressão e o volume de fibras também aumentam. Segundo eles, o aumento do teor de fibras aumenta os momentos máximos atingidos pelos elementos estruturais.

Yang et al. (19) apresentaram uma comparação do comportamento à flexão de vigas de CAD e de CUAD. Foi verificado que a adição de fibras de aço ao concreto melhorou a capacidade de absorção de energia das vigas, fazendo com que elas falhassem através da ruptura das barras de aço, melhorando assim o seu desempenho (Figura 2-8).

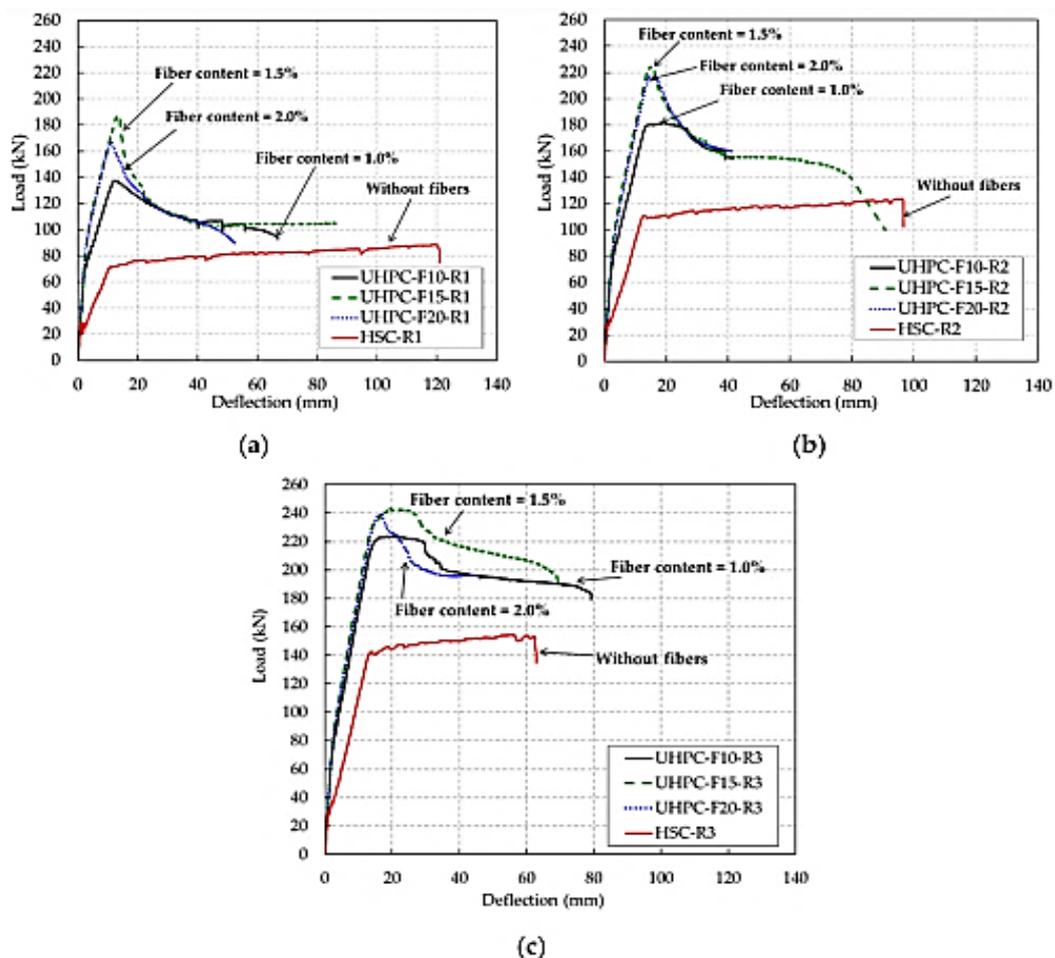


Figura 2-8 – Comparação de curvas carga – deflexão entre CAD e CUAD, variando com a taxa de armaduras: a) 0,79%, b) 1,18% e c) 1,58 (Yang I-H, 2020)

Com as imagens da Figura 2-9 é possível observar a mudança do padrão de fissuração e no modo de falha com a utilização do CUAD, ocorrendo o aparecimento de microfissuras em grandes quantidades e mostrando uma maior resistência na zona comprimida.

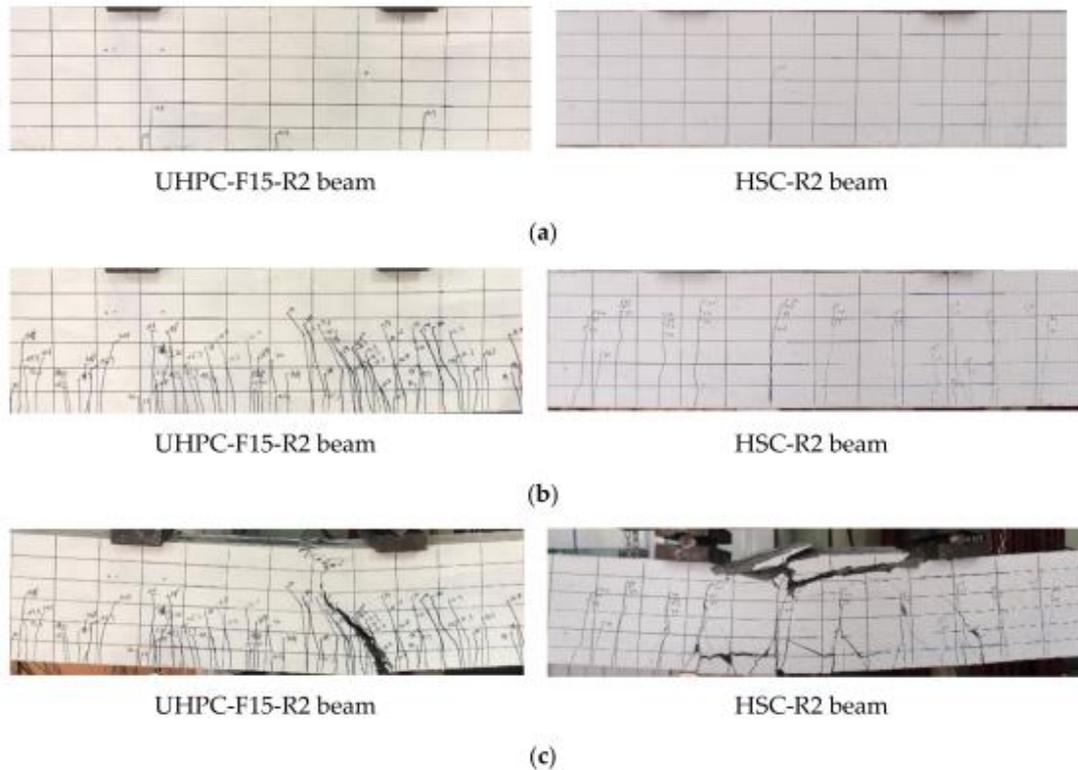


Figura 2-9 – Padrões de fissuração e modos de falha típicos de CAD e CUAD a) Fase inicial b) Durante o ensaio e c) Ruptura (Yang I-H, 2020)

2.6 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO SUBMETIDAS À FLEXÃO

Diversos documentos surgiram com o intuito de orientar o dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras. Entre eles estão o ACI 544.1R-96 (44), as recomendações da RILEM TC 162-TDF (66), o Model code 2010 (25), as práticas recomendadas IBRACON/ABECE (67), o ACI 544.4R-18 (26), TR-34 (68) e a NBR 16935 (69).

Para a realização do dimensionamento do M_{CA} (momento resistente do concreto armado), adota-se a distribuição de tensões no estado limite último, adotando-se como premissa básica a adoção de bloco retangular de tensões no concreto comprimido, conforme Equação 2.3 e Equação 2.4. Essas equações são sugeridas na NBR 6118 (24) para concretos de classe de C50 a C90, que serão utilizadas nesse trabalho para efeitos de avaliação do resultado final (71). Também assume-se, em geral, que a armadura encontra-se em escoamento, o que precisa ser confirmado a partir da distribuição de deformações na seção. A Figura 2-11 mostra a distribuição seccional de deformações, tensões e forças em uma viga de concreto armado.

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}, \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

$$\alpha_c = 0,85 \cdot \left[1,0 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{200} \right) \right], \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

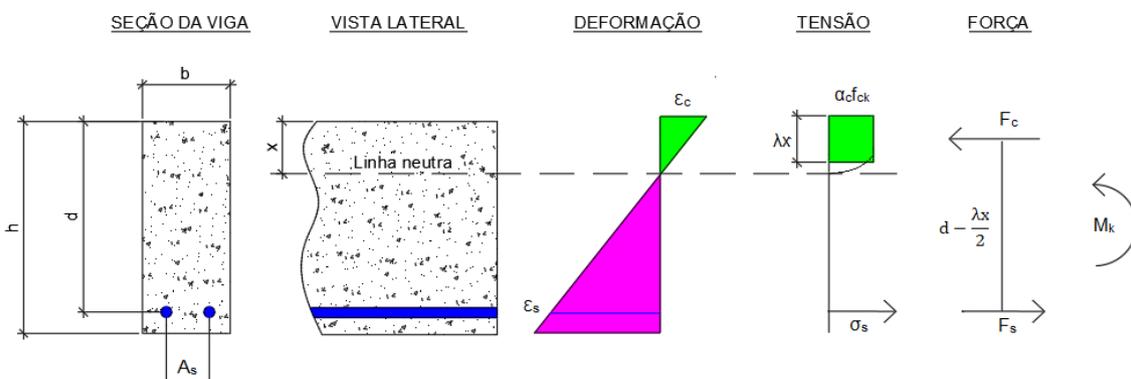


Figura 2-11 – Distribuição seccional de deformações, tensões e forças em uma viga de concreto armado

Onde:

b – Largura da viga

h – Altura da viga

d – Altura útil da viga

x – Profundidade da linha neutra

A_s – Área de aço

ϵ_c – Deformação do concreto

ϵ_s – Deformação do aço

λ – Coeficiente para altura efetiva do bloco de compressão

α_c – Coeficiente de ajuste da resistência

f_{ck} – Resistência à compressão característica

σ_s – Tensão na armadura

F_c – Força de compressão no concreto

F_s – Força na armadura

M_k – Momento resistente

Com relação ao cálculo do M_{CRF} (Momento resistente do concreto reforçado com fibras de aço), segundo o Model Code 2010 (25), duas leis constitutivas simplificadas podem ser definidas a partir do ensaio de abertura de fissura: Um comportamento rígido plástico, ou um comportamento linear pós-fissuração (endurecimento ou amolecimento), como mostrado esquematicamente na Figura 2-12, onde o f_{Fts} representa a resistência residual de serviço, e f_{Ftu} representa a resistência à tração pós-fissuração última.

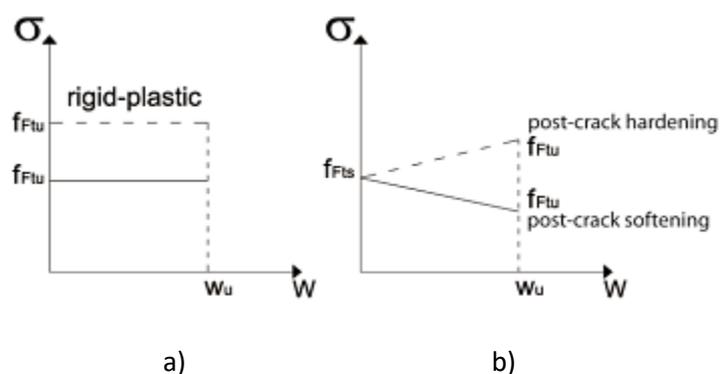


Figura 2-12 – Modelos constitutivos simplificados para relação tensão-deformação do CRF pós-fissuração, sendo a) Modelo Rígido-Plástico e b) Modelo Linear (25)

No caso do modelo rígido plástico (Figura 2-13), a tensão de tração última do CRF fissurado é relacionada com a tensão na abertura de fissura no ponto em que $CMOD_3 = 2,5$ mm. Já no modelo linear (Figura 2-14), os valores de tração do CRF e momento resistente da seção irão variar conforme o estado limite utilizado. É assumida uma relação linear entre a resistência em $CMOD_1 =$

0,5 mm e $CMOD_3 = 2,5$ mm, sendo o valor em $CMOD_1 = 0,5$ mm utilizado no ELS e o valor no ELU irá variar conforme a abertura de fissura escolhida (w_u), tendo seu valor máximo definido como 2,5 mm (25). Os parâmetros para a determinação do momento resistente da seção, no estado limite último, são mostrados na Equação 2.5.

$$M_{CRF} = f_{R3} \frac{bh^2}{6} \quad (2.5)$$

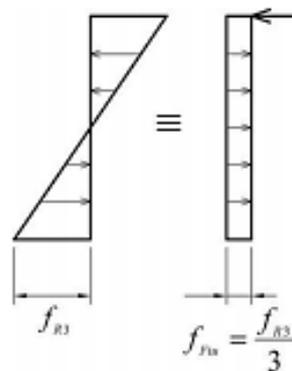


Figura 2-13 – Modelo simplificado adotado no modelo rígido plástico (25)

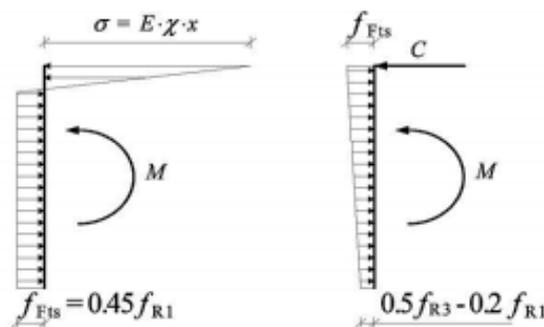


Figura 2-14 – Diagrama de tensão para a determinação do f_{Fis} e f_{Flu} , no modelo linear (25)

Após os momentos resistentes de cada tipo de reforço serem determinados separadamente, pode-se determinar, de forma aproximada, o momento resistente do concreto armado reforçado com fibras a partir da equação 2.6 (26). É importante destacar que essa abordagem não leva em

conta de forma adequada a compatibilidade de deformações entre os dois modelos. Um modelo que leva em conta essa compatibilidade pode ser encontrado em Cardoso et al. (56). A Figura 2-14 apresenta um diagrama para a distribuição das tensões ao longo da seção fissurada do CARF.

$$M_{CARF} = M_{CA} + M_{CRF} \quad (2.6)$$

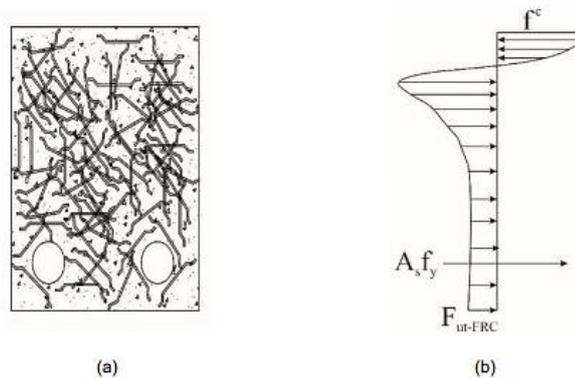


Figura 2-15 – Diagrama para uma seção de CRFA fissurado, sendo a) a seção e b) o diagrama de tensões e forças simplificado (47).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem como objetivo descrever o programa experimental adotado para caracterização e avaliação do comportamento mecânico de elementos estruturais fabricados com concreto de ultra-alto desempenho.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Cimento

Para a preparação da matriz de concreto de ultra-alto desempenho, o cimento utilizado foi o cimento Portland CPV-ARI do fabricante Lafarge Holcim, cujas especificações dos lotes recebidos atendiam às condições especificadas nas normas NBR 16697 (72) e NBR 11578 (73).

3.1.2 Agregado

Neste estudo foi utilizado apenas agregado miúdo de areia natural. A areia possuía diâmetro máximo de 1,18 mm e módulo de finura de 2,6. A Figura 3-1 mostra a distribuição granulométrica da areia, determinada de acordo com a NBR NM 248 (74).

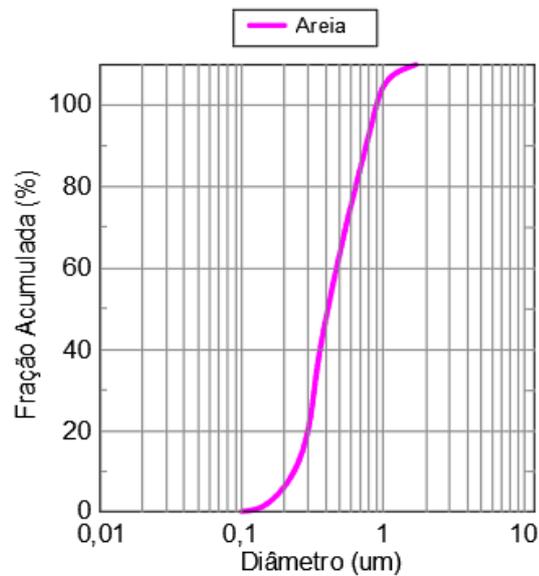


Figura 3-1 – Distribuição granulométrica da areia

3.1.3 Adições

As adições utilizadas foram a Sílica Ativa SILMIX® do tipo D (densificada) e pó de quartzo, proveniente da indústria cerâmica, denominada neste estudo como Sílica 325. A Figura 3-2 mostra a distribuição granulométrica das adições utilizadas.

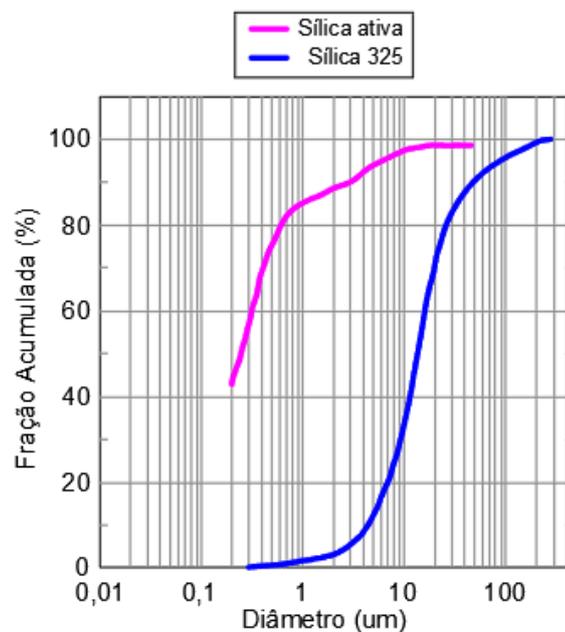


Figura 3-2 – Distribuição granulométrica das adições

3.1.4 Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado foi o MasterGlenium® 51, que tem base em éter policarboxílico. O aditivo foi produzido pelo fabricante BASF dentro do que estabelece a norma NBR 11768 (75,76).

3.1.5 Fibras de aço

As fibras de aço (Figura 3-3) utilizadas neste trabalho foram do fabricante Dramix, lisas e possuíam as seguintes características:

- Comprimento de 13mm e diâmetro de 0,20mm;
- Módulo de elasticidade de 200 Gpa;
- Resistência nominal à tração de 2750 MPa;
- Razão de aspecto igual a 65.



Figura 3-3 – Fibras de aço utilizadas

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O traço utilizado neste estudo foi desenvolvido por Silva et al. (42), baseado no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) desenvolvido por de Larrard (77) para o problema de empacotamento de partículas para a dosagem do concreto. Este modelo se difere dos demais métodos, pois avalia todos os materiais para a distribuição do tamanho da partícula, assim como a interação entre elas (78). Foi necessária a adaptação da quantidade e granulometria da areia utilizada de forma que a sua obtenção para a moldagem

do concreto no meio comercial fosse facilitada. A Tabela 3-1 mostra os traços adotados para a fabricação dos concretos utilizados no estudo.

Tabela 3-1 – Composição dos concretos utilizados

Composição	E1 (kg/m³)	E2 (kg/m³)	E3 (kg/m³)
Cimento CP-V ARI	1011	1011	--
Cimento CP II F 32	--	--	270
Areia (1,18mm)	883	883	--
Areia	--	--	514
Brita 0	--	--	353
Brita 1	--	--	625,5
Sílica Ativa	58	58	--
Pó de quartzo	80	80	--
Superplastificante	50	50	0,41
Água	175,5	175,5	134,5
Fibras de aço	40	160	--
A/C	0,17	0,17	0,50

Os traços E1 e E2 correspondem ao concreto de ultra-alto desempenho com frações de fibras de 40 kg/m³ (comumente utilizada em concretos convencionais) e 160 kg/m³ (comumente utilizada em concretos de ultra-alto desempenho), respectivamente. O traço E3 corresponde ao concreto convencional utilizado no estudo como referência. O traço E3 e as propriedades do concreto foram obtidos a partir dos estudos reportados por Tinoco (79) e Teixeira (80).

3.3 PROCEDIMENTOS DE MISTURA DO CUAD

O processo de mistura foi realizado em cinco etapas, baseado no estudo realizado por Silva et al. (42), da seguinte forma:

1º: Misturou-se os materiais secos por cerca de um minuto.

2º: Metade da quantidade de água e metade da quantidade de superplastificante foram adicionados, mantendo a mistura por 8 minutos.

3º: Após esse tempo, adicionou-se o restante da água, deixando misturar por mais 8 minutos.

4º: Foi adicionado o restante do superplastificante, homogeneizando por mais 3 minutos.

5º: Por fim, as fibras de aço foram colocadas gradualmente, adicionando mais 3 minutos à mistura até chegar a uma aparência homogênea.

Para a realização da mistura (Figura 3-4), foram utilizados os misturadores planetários com capacidades de 20L e 30L, dependendo da quantidade de concreto necessária para o ensaio.



Figura 3-4 – Mistura do concreto de ultra-alto desempenho

3.4 ENSAIOS NA ESCALA DO MATERIAL

3.4.1 Ensaio de espalhamento – cone de abrams invertido

O ensaio de espalhamento foi realizado com base na norma NBR 15823-2 (81) para avaliar as propriedades do concreto de ultra-alto desempenho no

estado fresco, correspondente à mistura E2, a qual foi utilizada para elaborar os elementos estruturais para o estudo. Para a realização do ensaio foi utilizado o cone de Abrams, que se trata de um molde em forma de tronco de cone, com as dimensões mostradas na Figura 3-5.

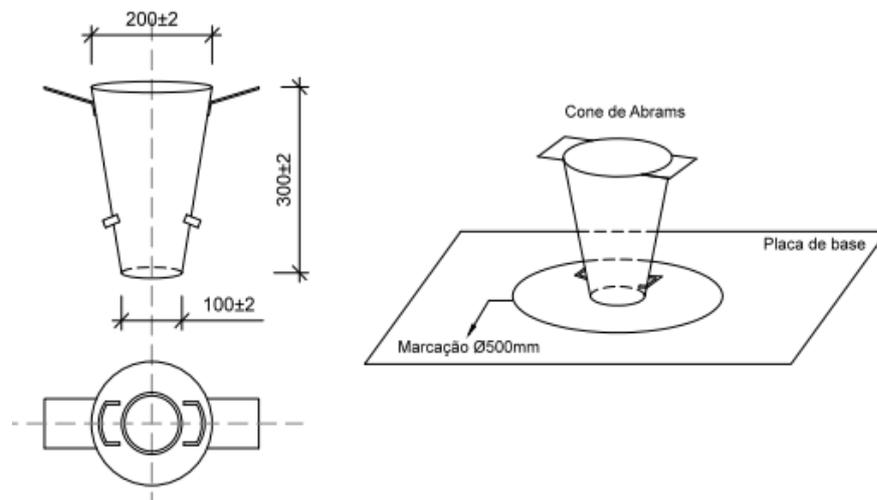


Figura 3-5 – Ilustração com as dimensões do cone de Abrams (dimensões em mm) [67].

O concreto foi colocado dentro do molde apoiado sobre uma base metálica e posteriormente o molde foi puxado cuidadosamente na direção vertical, liberando a mistura que estava em seu interior. O diâmetro da circunferência gerada pelo espalhamento do concreto foi registrado para avaliação do resultado do ensaio. A Figura 3-6 mostra o ensaio de espalhamento sendo realizado.



Figura 3-6 – Foto do ensaio de espalhamento

3.4.2 Ensaio de resistência a compressão axial e módulo de elasticidade

O ensaio para a determinação da resistência de compressão axial e módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a NBR 7215: 2019 (82).

Para este estudo, foram moldadas três séries de corpos de prova cilíndricos de 50x100mm. Previamente ao ensaio, todas as amostras foram desmoldadas após 24 horas e levadas a câmara úmida onde ficaram em processo de cura até os 28 dias de idade. Além disso, os cilindros tiveram suas extremidades regularizadas através de faceamento mecânico. A Figura 3-7 mostra as amostras após a moldagem.



Figura 3-7 – Corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão

A resistência à compressão axial foi determinada para o traço E2 para três diferentes idades, a saber: aos 7, 14 e 28 dias. Para a determinação do módulo de elasticidade, os deslocamentos longitudinais foram obtidos aos 28 dias, através de dois transdutores de deslocamento acoplados na região central do corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 3-8.

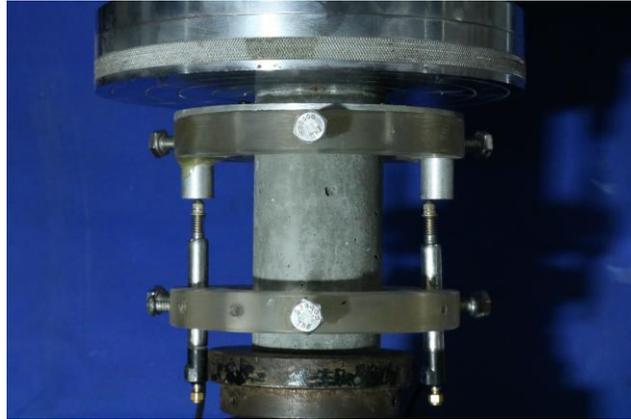


Figura 3-8 – Detalhe do ensaio de compressão

O ensaio foi realizado na máquina de ensaio mecânico MTS modelo 810 com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN, com controle por deslocamento a uma taxa de 0,1 mm/s.

3.4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de flexão em três pontos com entalhe é o método de ensaio para o controle do concreto reforçado com fibras para aplicações estruturais segundo as recomendações do Model Code 2010 (25). Nesse ensaio, os prismas com entalhe artificial introduzido na região tracionada, no meio do vão, são sujeitos a flexão, sendo possível obter uma curva de carga por abertura de fissura (CMOD – Crack mouth opening displacement), conforme estabelecido pela norma europeia VER14651 (52). Esta norma define os corpos de prova prismáticos com dimensões nominais (largura e altura) de 150 mm e comprimento variando entre 550 mm e 700 mm. A possibilidade de se utilizar ensaios alternativos é prevista no Model Code 2010 (25), mas a correlação com o ensaio de referência (52) deve ser comprovada (55).

Neste ensaio foi utilizado como referência o estudo feito por Castoldi (83), onde foram adotadas novas dimensões para os prismas, sendo elas 400 mm de comprimento e seção transversal quadrada de 100 mm (Figura 3-9). O comprimento do entalhe no centro do vão passou de 25mm para 15 mm.

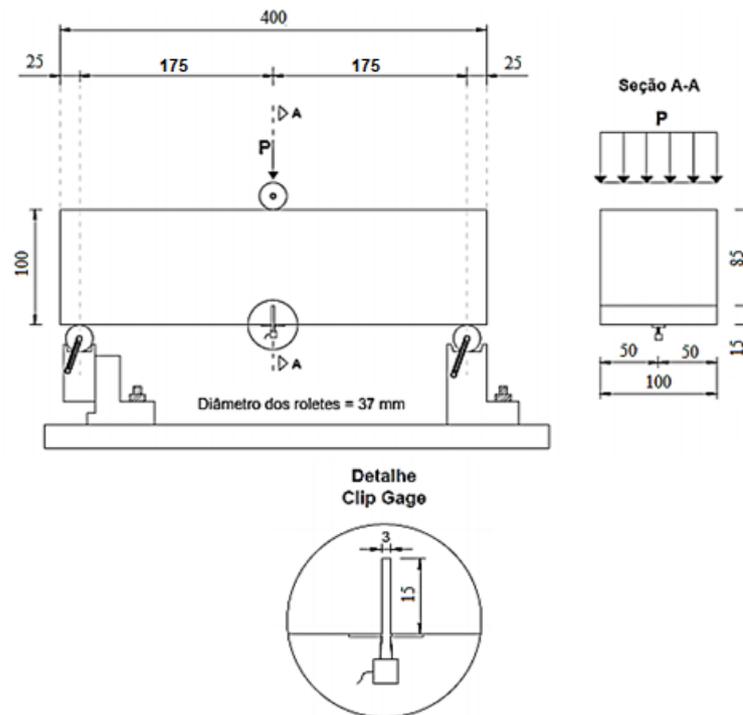


Figura 3-9 – Detalhe do corpo de prova (dimensões em mm), adaptado de (83)

Com a mudança da escala dos prismas, Castoldi (83) realizou um estudo de compatibilização dos resultados de ensaios elaborados em prismas com as dimensões padrões por norma e em prismas com as novas dimensões. A autora observou que as curvas obtidas seguiram o mesmo padrão em ambas as geometrias, indicando que a mudança de escala não interferiu no comportamento à flexão do compósito. Além disso, os valores de tensão no limite de proporcionalidade (σ_{LOP}) e as tensões residuais à flexão ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) não apresentaram diferenças consideráveis com a mudança de escala, conforme mostrado na Tabela 3-2.

A Figura 3-10 mostra detalhes do ensaio de flexão. O transdutor (clip gauge) foi encaixado em duas placas metálicas fixadas no corpo de prova na região do entalhe, de tal forma que a distância entre a borda inferior do prisma e a linha de medição do clip gauge fosse menor ou igual a 5 mm. A velocidade de ensaio foi controlada pelo aumento do CMOD em 0,05 mm/min até que o CMOD atingisse valor igual a 0,1 mm. A partir desse ponto, a taxa de carregamento foi aumentada para 0,2 mm/min até o término do ensaio, que ocorreu para um valor de CMOD superior a 3,5 mm.

Tabela 3-2 – Resultados do ensaio de compatibilização dos corpos de prova (83)

Compósito	σ_{LOP} (MPa)	IR,1 (MPa)	IR,2 (MPa)	IR,3 (MPa)	IR,4 (MPa)
M1 PP – 500x150x150	4,59 (0,34)	1,23 (0,01)	1,46 (0,06)	1,67 (0,10)	1,70 (0,12)
M1 PP – 400x100x100	6,49 (1,03)	1,62 (0,28)	1,97 (0,43)	2,21 (0,49)	2,27 (0,55)
M2 PP – 500x150x150	3,52 (0,06)	1,32 (0,21)	1,31 (0,19)	1,42 (0,20)	1,46 (0,18)
M2 PP – 400x100x100	3,73 (0,49)	0,87 (0,25)	1,07 (0,30)	1,24 (0,34)	1,32 (0,31)
M2 SI – 500x150x150	3,32 (0,19)	1,28 (0,25)	1,25 (0,26)	0,93 (0,22)	0,73 (0,20)
M2 SI – 400x100x100	4,43 (0,33)	1,26 (0,38)	0,77 (0,14)	0,51 (0,09)	0,37 (0,05)



Figura 3-10 – Detalhe do ensaio de flexão em prismas

Foram moldadas duas séries de corpos de prova, cada uma contendo três prismas. Em uma série foi utilizado o concreto correspondente a mistura E1 (volume de fibras de 40kg/m³) e na outra, foi utilizado o concreto correspondente a mistura E2 (volume de fibras de 160kg/m³). Previamente ao

ensaio, todas as amostras foram desmoldadas após 24 horas e levadas a câmara úmida onde ficaram em processo de cura até os 28 dias de idade.

3.5 ENSAIOS ESTRUTURAIS

Para avaliar o comportamento e a influência do concreto de ultra-alto desempenho nos elementos estruturais, foram moldadas quatro vigas com seção retangular de 150x150mm e comprimento de 1200 mm: duas foram feitas com concreto de ultra-alto desempenho (CUAD), correspondente a mistura E2 e duas foram feitas com concreto convencional (CC), correspondente à mistura E3. Para avaliação da resposta nas condições subarmada e normalmente armada, uma das amostras de cada grupo foi fabricada com armadura longitudinal de tração composta por barras de aço de 8mm (8mm CC e 8mm CUAD), enquanto na outra foram usadas barras de 16mm (16mm CC e 16mm CUAD), correspondendo a taxas de armadura de 0,44% e 1,78%, respectivamente. Para prevenir ruptura por cortante, com base na NBR 6118, foram dimensionados estribos de aço nos vãos de cisalhamento da viga. A Figura 3-11 mostra detalhes dos reforços convencionais utilizados.

O concreto de ultra-alto desempenho foi preparado como descrito no item 3.3 e seguindo o traço da mistura E2 mostrada na Tabela 3-1 do item 3.2. O concreto convencional foi preparado em betoneira de 40L, seguindo o traço da mistura E3 mostrada na Tabela 3-1 do item 3.2. As vigas permaneceram em processo de cura em câmara úmida até o 28º dia após a concretagem, sendo retiradas para a realização do ensaio.

Os corpos de prova foram testados em uma máquina hidráulica de teste com capacidade de carga de 500kN e com controle de deslocamento em uma taxa de 1mm/min. A deflexão das vigas foi medida através de um transdutor de deslocamento localizado no meio do vão das mesmas. Um strain gauge também foi posicionado em cada armadura de flexão para capturar a evolução das deformações do aço ao longo do ensaio. Além disso, foi usado um strain gauge na face superior da viga para acompanhamento das deformações no concreto. A Figura 3-12 mostra detalhes do ensaio realizado.

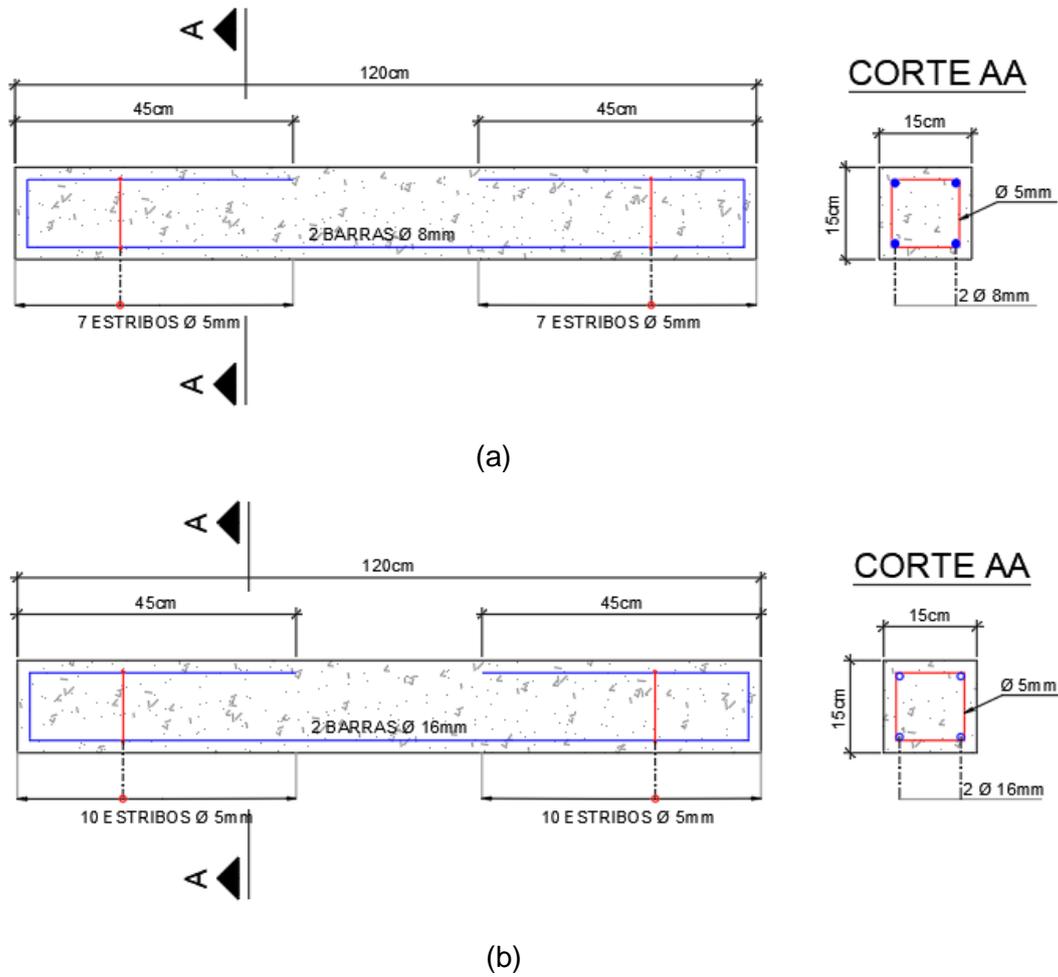


Figura 3-11 – a) Viga armada no domínio 2 b) Viga armada no domínio 3

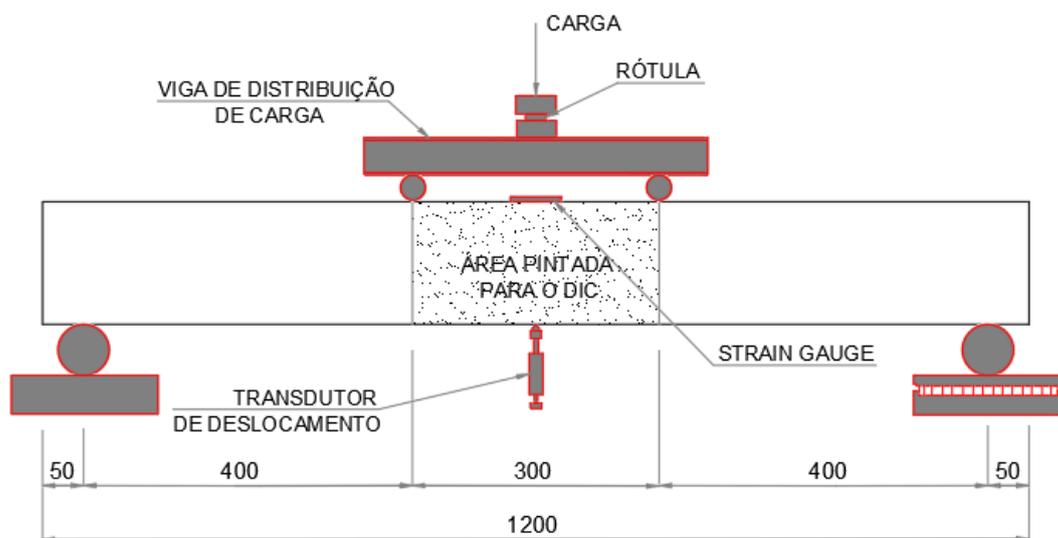


Figura 3-12 – Detalhe do ensaio de flexão em quatro pontos

Para monitoramento do campo de deformações e do acompanhamento da evolução das fissuras, a técnica de Correlação de Imagem Digital (em inglês *Digital Image Correlation*, DIC) foi adotada. Sendo assim, a região central da viga foi preparada com uma pintura de fundo branco fosco, com sobreposição de borrifo esparso de cor preta. Para análise dos dados, foram retiradas fotos a cada 10 segundos e o software GOM Correlate (84) foi utilizado. A Figura 3-13 mostra detalhes do ensaio de flexão em quatro pontos realizado nas vigas.



Figura 3-13 – Ensaio de flexão de quatro pontos na viga

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, os resultados experimentais obtidos são analisados e comparados com resultados obtidos em estudos de outros autores.

4.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO – CONE DE ABRAMS INVERTIDO

Como a matriz escolhida para os ensaios estruturais foi a E2 (160kg/m^3 de fibras de aço), então foi necessário verificar suas propriedades no estado fresco, avaliando o valor do diâmetro da circunferência obtida a partir do espalhamento da mistura. Não foram observados problemas relacionados com a segregação dos materiais do traço ou exsudação de água. O diâmetro encontrado foi de 740mm, conforme mostrado na Figura 4-1. Segundo a NBR 15823-2 (81), o concreto é classificado como autoadensável quando o diâmetro da circunferência formada pelo espalhamento é superior a 550 mm. Sendo assim, com este resultado, pode-se classificar a matriz como concreto autoadensável (CAA) de classe SF2 (660mm a 750mm).

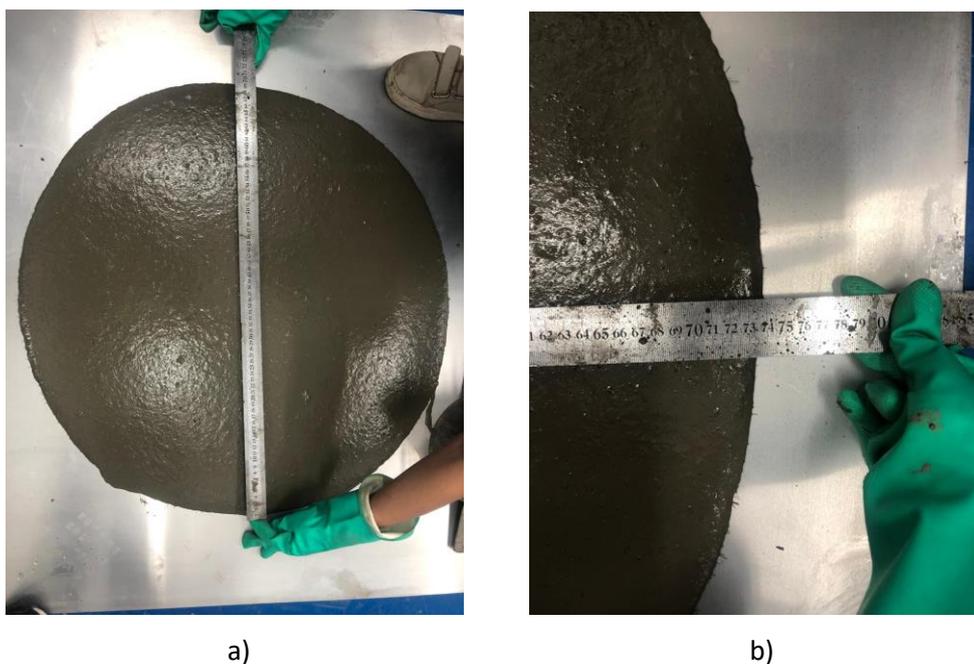


Figura 4-1 – Ilustração: a) Espalhamento do concreto; b) Diâmetro encontrado

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Conforme mostrado anteriormente no item 3.2, a dosagem do concreto seguiu o estudo realizado por Silva et al. (42), adaptando-se a dosagem da areia para facilitar a utilização de materiais disponíveis comercialmente, sendo o diâmetro máximo de 1,18mm. Neste trabalho, o concreto de ultra-alto desempenho correspondente a matriz E2 atingiu resistência à compressão axial média de 142,3 MPa aos 28 dias de idade e o módulo de elasticidade encontrado foi de 38,68 Gpa, mostrando semelhança com os valores obtidos nos resultados de alguns dos trabalhos citados anteriormente (8,16–18,22,65). Os resultados das resistências obtidas nos ensaios das amostras em 7, 14 e 28 dias, assim como os módulos de elasticidade aos 28 dias calculados estão apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Resultado do ensaio de compressão axial da matriz E2.

<i>Amostra</i>	Resistência à compressão (MPa)			E(Gpa)
	<i>7 dias</i>	<i>14 dias</i>	<i>28 dias</i>	
<i>CP1</i>	104,17	115,68	142,52	42,58
<i>CP2</i>	104,83	112,55	148,65	34,55
<i>CP3</i>	104,29	115,66	135,80	38,91
<i>Média</i>	104,43	114,63	142,32	38,68
<i>Desvio padrão</i>	0,35	1,80	6,43	4,02
<i>CV</i>	0,34	1,57	4,52	10,39

Sendo:

E = módulo de elasticidade;

CV = coeficiente de variação.

A Figura 4-2 mostra os modos de falha das amostras analisadas aos 28 dias. A ruptura dos corpos de prova moldados com concreto de ultra-alto desempenho tende a ter um comportamento explosivo devido às altas cargas ao qual é submetido, porém esse comportamento é atenuado devido à utilização das fibras de aço, pois estas funcionam como pontes de

transferência de tensões durante a expansão lateral do concreto na compressão.



Figura 4-2 – Rompimento aos 28 dias de corpos de prova cilíndricos moldado com CUAD e 160kg/m³ de fibras de aço

A resistência à compressão do concreto de ultra-alto desempenho já se apresentou alta em apenas 7 dias e foi aumentando de acordo com a idade (Figura 4-3), conforme esperado, sendo esse aumento de 9,77% de 7 para 14 dias de idade e de 24,15% de 14 para 28 dias de idade.

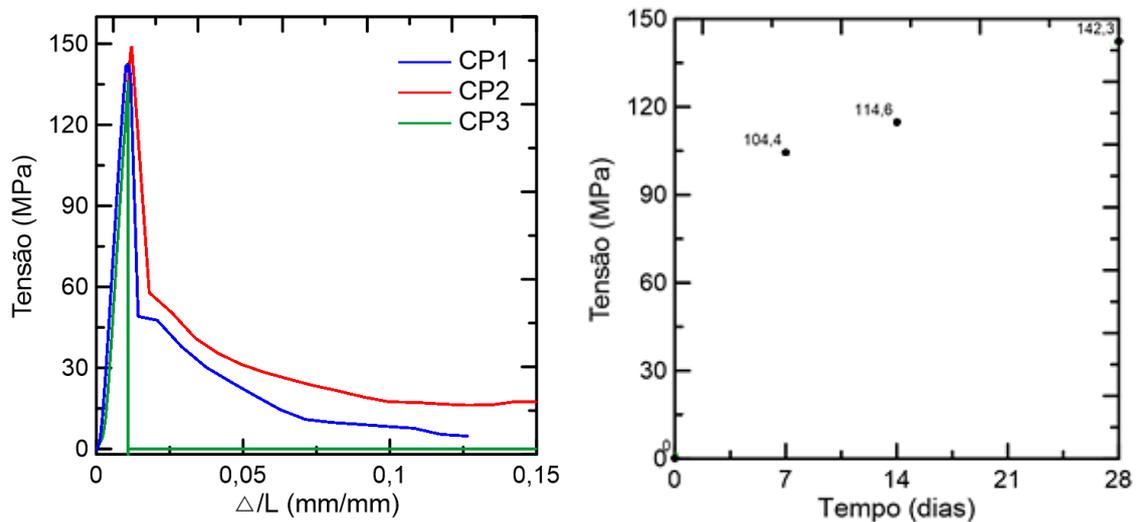


Figura 4-3 – a) Gráfico tensão x Δ/L b) Gráfico tensão x dias

A resistência à compressão axial de 34,66 MPa e o módulo de elasticidade de 31,83 Gpa do concreto convencional E3 foram obtidos a partir do estudo realizado por Tinoco (79) e do estudo realizado por Teixeira (80).

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

No ensaio de resistência a tração na flexão realizado em prismas com a fração volumétrica de fibras igual a 40kg/m^3 , somente foi possível obter a carga máxima atingida pois os corpos de prova obtiveram uma ruptura brusca, caracterizado pela sua baixa capacidade resistente, indicando que as fibras de aço não foram suficientes para prover a ductilidade necessária ao material. Já no ensaio dos prismas com fração de 160kg/m^3 de fibras, foi possível observar um aumento na capacidade de carga e na ductilidade durante a realização do ensaio. A Figura 4-4 e Figura 4-5 mostram os corpos de prova após a ruptura.

Os ensaios de flexão realizados no concreto de ultra-alto desempenho, resultaram na resistência média de $5,23\text{ MPa}$, para a fração volumétrica de fibras de 40kg/m^3 , apresentando um comportamento *strain-softening* e resistência média de $20,40\text{MPa}$, para fração volumétrica de fibras de 160kg/m^3 , apresentando um comportamento *strain-hardening* (vide Figura 4-6). Os resultados se mostraram compatíveis com a literatura citada anteriormente (42,47)



85)



b)

Figura 4-4 – a) Rompimento de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 40kg/m^3 de fibras de aço b) Fissura de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 40kg/m^3 de fibras de aço

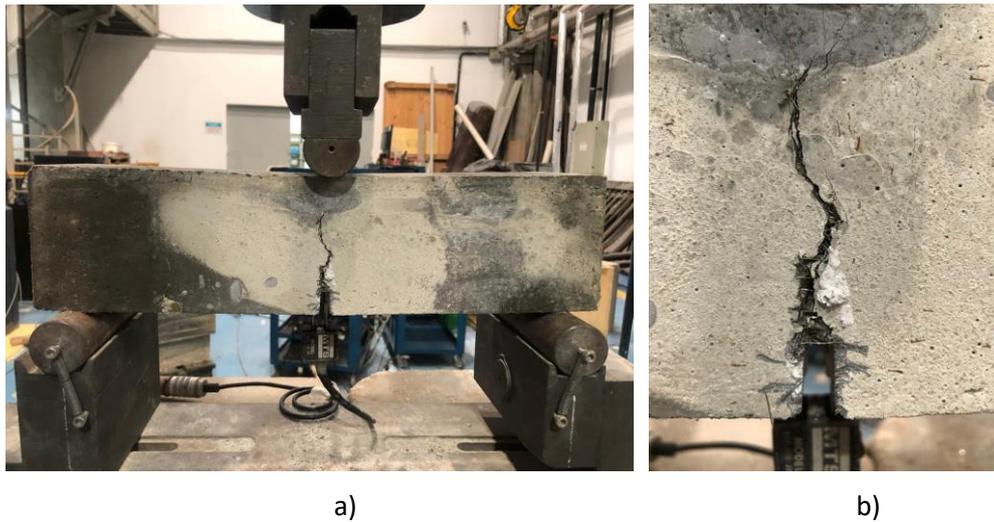


Figura 4-5 – a) Rompimento de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 160kg/m^3 de fibras de aço b) Fissura de corpo de prova prismático moldado com CUAD e 160kg/m^3 de fibras de aço

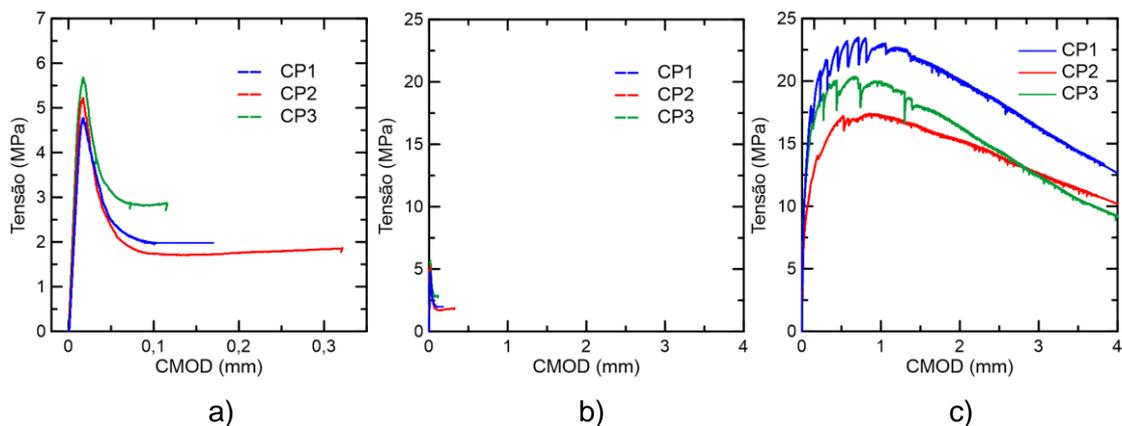


Figura 4-6 – tensão-CMOD à flexão de corpos de prova prismáticos moldados com CUAD e: a) com 40kg/m^3 de fibras de aço (escala ampliada) b) com 40kg/m^3 de fibras de aço c) com 160kg/m^3 de fibras de aço

Assim como na Figura 4-4 e na Figura 4-5, a Figura 4-6 mostra que a ruptura dos corpos de prova acontece de forma que as fibras de aço conseguem transferir a tensão, como se fosse uma “ponte”, aumentando assim a ductilidade do material. Porém o que difere os dois resultados é que, na matriz com 160kg/m^3 de fibras de aço, pode-se observar que a abertura de fissura atinge o limite mínimo de 4mm estabelecido pela norma, sendo possível chegar a valores ainda maiores. Já na matriz com 40kg/m^3 de fibras, essa fração não foi suficiente para aumentar ductilidade do material.

O valor de tenacidade para a mistura E2 foi apresentado na Tabela 4-2 e na Figura 4-7 foi calculado pela média da área sob a curva Força-CMOD para cada corpo de prova, até o fim do ensaio (CMOD = 4 mm). O limite de proporcionalidade (LOP) foi calculado como sendo a maior tensão dentro do intervalo de CMOD de 0 a 0,05 mm (f_L). A força máxima (F_L) e $CMOD_{FL}$, são definidos como a carga e a abertura de fissura correspondente à tensão f_L , respectivamente. Não foi possível obter a tenacidade correspondente à família E1, pois, devido à fragilidade dos corpos de prova, a abertura de fissura não chegou a 4mm.

Tabela 4-2 – Resultados do ensaio de tração na flexão

Resistências médias e energia de deformação						
<i>Família</i>	<i>CMOD_{FL}(mm)</i>	<i>f_L (MPa)</i>	<i>CV (%)</i>	<i>F_{máx} (MPa)</i>	<i>CV (%)</i>	<i>T₄ (J)</i>
<i>E1</i>	0,0174	5,226	8,61	5,226	8,61	--
<i>E2</i>	0,05	9,04	17,03	16,336	14,90	88,73

Sendo:

$CMOD_{FL}$ = Abertura da fissura correspondente ao limite de proporcionalidade;

f_L = tensão correspondente ao limite de proporcionalidade;

$f_{máx}$ = tensão máxima;

T_4 = tenacidade correspondente à abertura de fissura de 4 mm;

CV = coeficiente de variação.

Para avaliar o ganho de resistência residual, foram calculadas tensões (f_j) equivalente à CMOD igual à 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm para j igual à 1, 2, 3 e 4 respectivamente, sendo mostrados na Tabela 4-3.

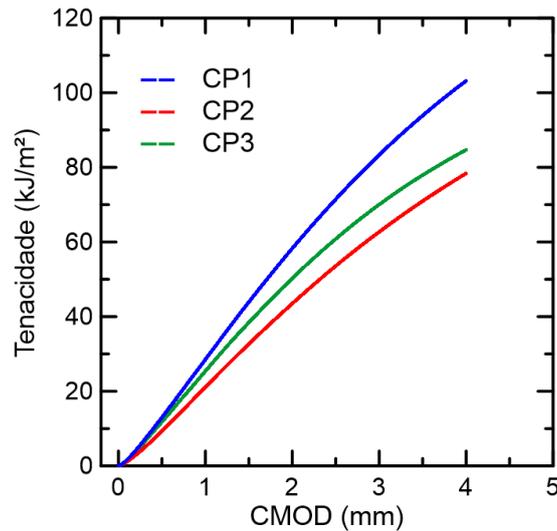


Figura 4-7 – Tenacidade-CMOD à flexão de corpos de prova prismáticos moldados com CUAD e 160kg/m³ de fibras de aço

Tabela 4-3 – Resultados das resistências residuais

Resistências médias								
Família	$f_{R,1}(MPa)$	CV (%)	$f_{R,2}(MPa)$	CV (%)	$f_{R,3}(MPa)$	CV (%)	$f_{R,4}(MPa)$	CV (%)
E2	19,543	13,565	18,616	14,928	15,593	15,416	12,090	16,663

Sendo:

$f_{R,1}$ = tensão correspondente à abertura de fissura de 0,5 mm;

$f_{R,2}$ = tensão correspondente à abertura de fissura de 1,5 mm;

$f_{R,3}$ = tensão correspondente à abertura de fissura de 2,5 mm;

$f_{R,4}$ = tensão correspondente à abertura de fissura de 3,5 mm.

4.4 ENSAIOS ESTRUTURAIS

Este item se destina à avaliação do desempenho à flexão das vigas de concreto armado agrupadas em duas séries de corpos de prova. Conforme mencionado anteriormente, uma série foi realizada com concreto convencional e a outra com o concreto de ultra-alto desempenho, com fibras de aço na fração volumétrica de 160kg/m³.

Ao observar a Figura 4-8, podemos comparar os modos de falha das vigas estudadas. Pode-se perceber uma falha predominante por esmagamento do concreto nas vigas de concreto convencional, enquanto que nas vigas de

concreto de ultra-alto desempenho, a maior resistência do concreto modificou esse modo de falha. A viga de 16mm CC, por exemplo, claramente é uma viga que falhou por compressão e possivelmente com pequenas deformações na armadura, o que poderá ser verificado na análise das deformações das barras, mais a frente. O modo de falha se alterou quando o CUAD foi adotado.

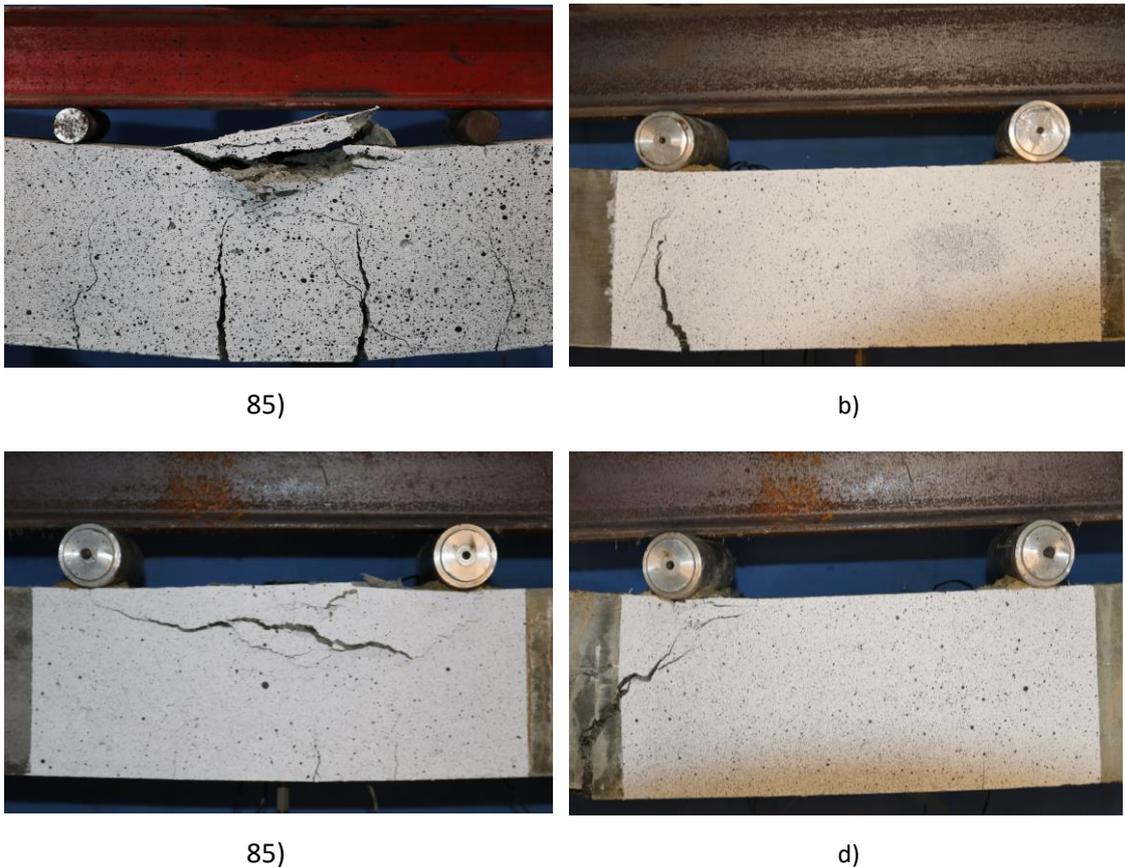


Figura 4-8 – Modos de falha das vigas estudadas a) 8mm CC; b) 8mm CUAD; c) 16mm CC; d) 16mm CUAD

A Figura 4-9 mostra as curvas força x deslocamento das vigas ensaiadas. Do ponto de vista estrutural, observou-se que a capacidade de carga máxima das vigas foi aumentada ao passo que se aumentou a taxa geométrica de armaduras e se empregou o CUAD.

Ao analisarmos o impacto da utilização de concreto de ultra-alto desempenho, foi observado um aumento de aproximadamente 40% na capacidade de carga das vigas de 8mm e de aproximadamente 60% na capacidade de carga das vigas de 16mm, porém, devido a possível falha

prematura da viga de 16mm de CC, esse aumento de 60% pode ser menor. Ao utilizarmos o resultado da carga máxima obtida na viga 8mm CC como referência, pode-se observar que o ganho na capacidade de carga foi de aproximadamente 40% no aumento da taxa geométrica de armaduras e de 75% com o aumento da taxa de armaduras combinada com a utilização do CUAD.

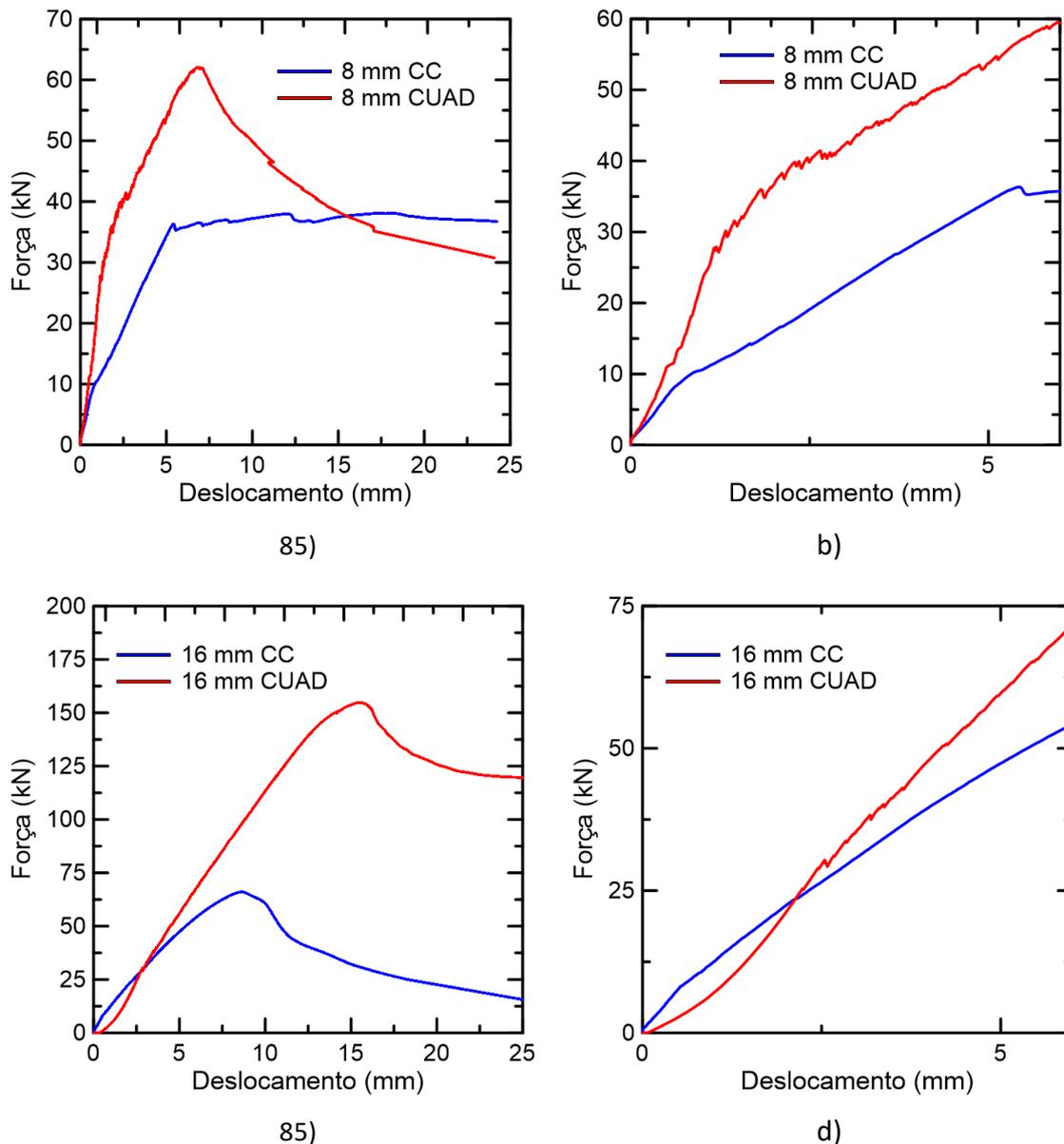


Figura 4-9 – Força deslocamento das vigas estudadas a) 8mm; b) 8mm trecho inicial; c) 16mm; d) 16mm trecho inicial

Conforme também visto nos modos de falha da Figura 4-8, o trecho inicial das vigas estudadas na Figura 4-9 mostra a diferença de comportamento do concreto convencional e do concreto de ultra-alto desempenho. As curvas de CC dos gráficos b e d apresentam algumas mudanças de direção que indicam os primeiros aparecimentos de fissuras. Já no concreto de ultra-alto desempenho aparecem microfissuras em grande quantidade, que podem ser percebidas graficamente nas curvas vermelhas do gráfico b e d da Figura 4-9. Essas microfissuras surgem conforme exemplificado na Figura 2-7 e são praticamente imperceptíveis a olho nu, conforme visto na Figura 4-8. Mais à frente serão mostrados mais resultados sobre o comportamento das fissuras das vigas estudadas.

Para a elaboração de curvas de momento x curvatura das vigas estudadas (Figura 4-10), foram analisados os strain-gauges posicionados na zona comprimida, nas barras de aço e as imagens capturadas através do DIC (correlação digital de imagens). Para a determinação da curvatura foi utilizada a Equação 4.3, onde ε_c é a deformação de compressão do concreto junto à face superior da viga (capturada através do DIC), ε_t é a deformação média de tração nas barras de aço (capturada pelos strain-gauges posicionados nas barras) e h é a altura da viga estudada.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{|\varepsilon_c| + |\varepsilon_t|}{h} \quad (4.3)$$

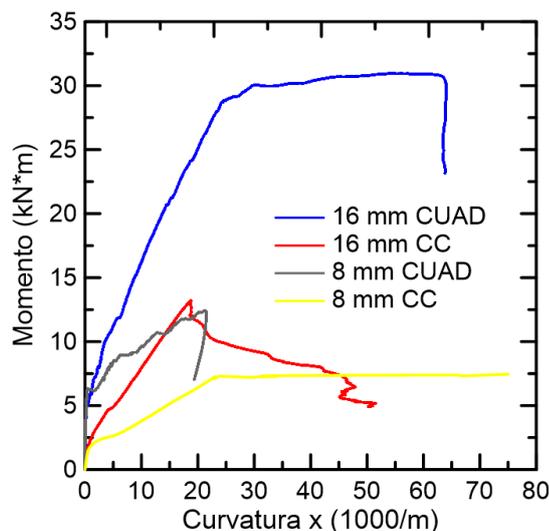


Figura 4-10 – Momento x curvatura das vigas estudadas.

É possível observar que ocorre um aumento de rigidez à medida que se aumenta o diâmetro das barras de reforço além de também aumentar com a utilização do concreto de ultra-alto desempenho, devido ao aumento do módulo de elasticidade do concreto e ao efeito da utilização das fibras de aço.

Conforme foi visto no item 2.6, no dimensionamento de vigas de concreto reforçado com fibras e com armadura convencional convém tratar cada reforço separadamente e depois analisar o reforço híbrido como um todo. Nesse caso, os momentos teóricos foram obtidos somando-se os momentos resistentes para uma seção de CRFA pura (M_{CRF}), com o momento resistente da seção de concreto armado (M_{CA}). A abordagem proposta pela NBR 6118 (24) válida apenas para concretos de até 90 MPa foi aqui considerada com o intuito de verificar o impacto dessa utilização através da comparação com o momento encontrado experimentalmente.

Para o cálculo do M_{CA} das vigas estudadas, foi considerado no dimensionamento o aço escoando ($f_{yk} = 500$ MPa) com o seu módulo de elasticidade igual a 200Gpa e a ruptura do concreto à compressão, com o f_{cm} igual a 34,66MPa para as vigas de concreto convencional e f_{cm} igual a 142,32MPa para as vigas de concreto de ultra-alto desempenho.

Para o cálculo do M_{CRF} , foi utilizada a Equação 2.4 e os parâmetros encontrados através dos ensaios de prismas submetidos à flexão, baseados na VER 14651 (52) mostrados no item 4.3 desse estudo. Os valores de $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$ correspondem a 19,54MPa e 15,59MPa, respectivamente.

A Tabela 4-4 mostra a comparação entre os momentos experimentais e os momentos teóricos encontrados após a utilização da Equação 2.5. Os resultados encontrados para o momento experimental e o momento teórico foram bem próximos para as vigas de CUAD, com diferença relativa consideravelmente baixa, o que não ocorreu para as vigas de concreto convencional. A viga de 8mm de CC apresentou um comportamento melhor que o esperado pelo resultado do momento resistente teórico e a viga de 16mm de CC, aparentemente falhou prematuramente por compressão com pequenas deformações na armadura, não chegando na sua capacidade teórica. Entretanto, foi possível verificar que a utilização do método de dimensionamento de vigas de concreto armado proposto na NBR 6118, para o cálculo do M_{CA} no dimensionamento de vigas de concreto de ultra-alto

desempenho, não obteve diferença significativa, apresentando valores bastante similares. Foi verificado também que a utilização do CUAD aumentou a capacidade de suporte, tanto para a viga com barras de 8mm quanto para a viga com barras de aço de 16mm.

Tabela 4-4 – Análise comparativas dos momentos

Comparação de Momentos			
<i>Família</i>	$M_{ELU}(kNm)$	$M_{experimental}(kNm)$	$(M_{ELU} - M_{EXP})/M_{ELU} * 100 (%)$
<i>8mm – CC</i>	6,18	7,62	-23,30
<i>8mm – CUAD</i>	13,61	12,41	8,82
<i>16mm – CC</i>	18,94	13,19	30,36
<i>16mm – CUAD</i>	30,23	30,95	-2,38

Foram plotados, ainda, os perfis de deflexão das vigas estudadas (Figura 4-11). O deslocamento foi capturado a partir de um LVDT instalado no meio do vão, onde foram analisados os resultados para diferentes níveis de momento atuante. Foi possível observar que, para as vigas com a mesma taxa de armadura, a utilização do CUAD diminuiu a deflexão para um dado nível de carregamento. Para um momento de 7kNm, por exemplo, correspondente ao momento máximo da viga de 8mm de CC, pode-se observar uma diminuição de deflexão de 5,13mm para 1,75mm, o que corresponde a uma diminuição de 66% no valor da deflexão com a utilização do concreto de ultra-alto desempenho.

Já para as vigas armadas com barras de 16mm, pode-se observar uma diminuição de deflexão de 8,16mm para 5,73mm, o que corresponde a uma diminuição de 30% no valor da deflexão com a utilização do concreto de ultra – alto desempenho, para um momento de 13kNm, correspondente ao momento máximo da viga de CC. Ao compararmos a deflexão entre as vigas com o mesmo tipo de concreto e diferentes taxas de armaduras, pode se observar que para um momento de 7kNm, houve uma diminuição na deflexão de 5,13mm para 3,46mm, correspondente a uma queda de 32%, quando se aumenta a taxa de armaduras das vigas de concreto convencional. Já para as vigas de concreto de ultra-alto desempenho, para um momento de 11kNm,

houve uma diminuição na deflexão de 5,21mm para 4,94mm, correspondente a uma queda de apenas 5%.

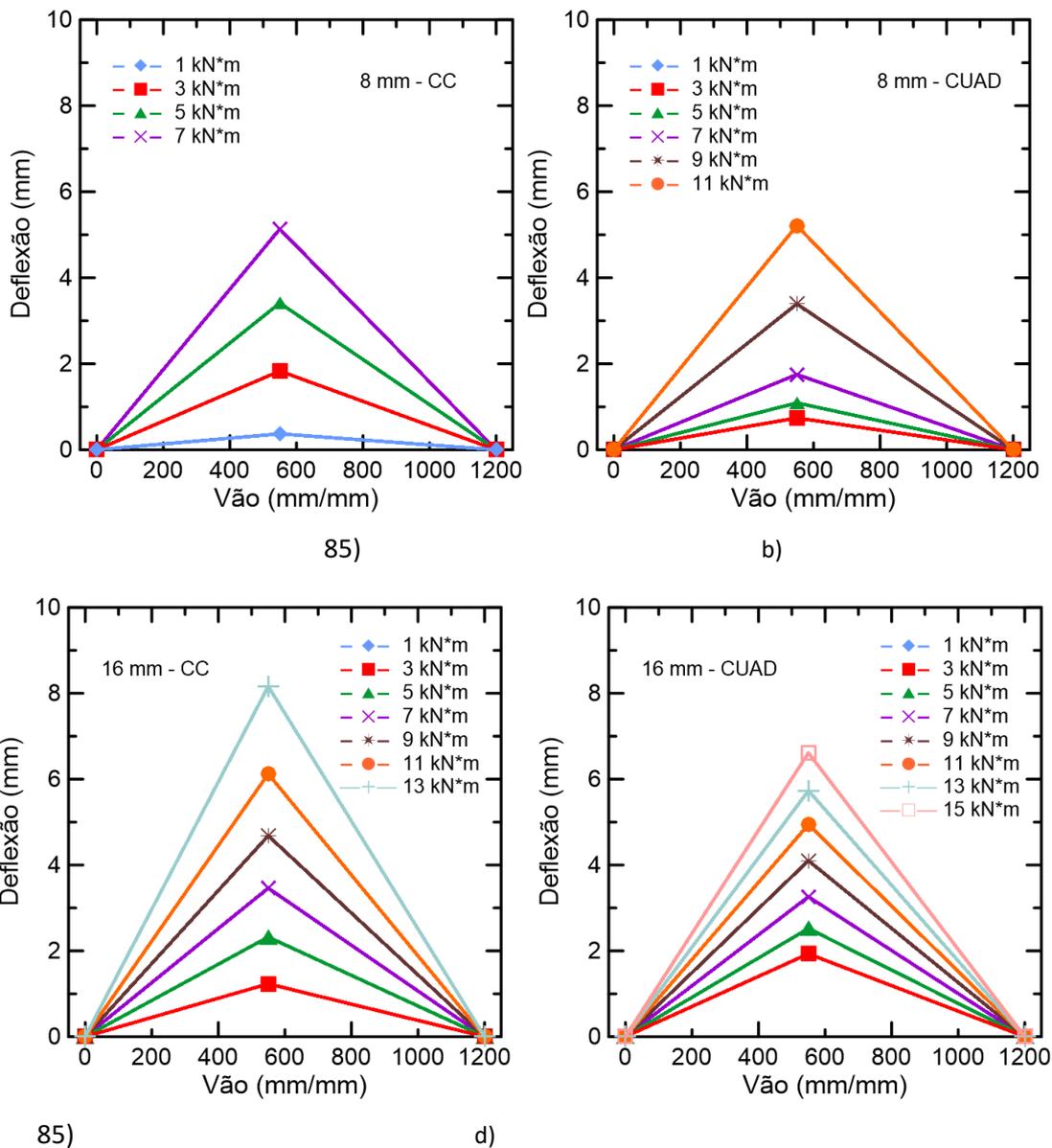


Figura 4-11 – Deflexão x vão das vigas estudadas a) 8mm CC; b) 8mm CUAD; c) 16mm CC; d) 16mm CUAD

Sendo assim, foi visto que a utilização de CUAD leva a um aumento da rigidez das vigas devido ao aumento do módulo de elasticidade do concreto e à capacidade de transferência de tensões de tração na zona tracionada, provida pelas fibras de aço. Essa diminuição da deflexão é mais significativa em vigas com uma taxa menor de armaduras, pois as vigas com maiores taxas já

possuem rigidez elevada normalmente. Foi possível observar que, o aumento da taxa de armadura também diminui a deflexão da viga, porém não tão significativamente como a mudança do concreto convencional para o concreto de ultra-alto desempenho.

Baseado em um estudo realizado por Jaeger et al. (85), Manfredi (47) mostrou em sua pesquisa a possibilidade de avaliar a ductilidade da viga. O coeficiente de ductilidade pode ser calculado de duas formas. A Equação 4.5 considera a curvatura no momento máximo e a curvatura no momento em que a deformação do concreto é 1/1000. A Equação 4.6 considera a deflexão no momento máximo e a deflexão no momento em que a deformação do concreto é 1/1000.

$$\mu = \frac{M_{máx}}{M_{0,001}} \times \frac{\varphi_{máx}}{\varphi_{0,001}} \quad (4.5)$$

Ou

$$\mu = \frac{M_{máx}}{M_{0,001}} \times \frac{\Delta_{máx}}{\Delta_{0,001}} \quad (4.6)$$

A Tabela 4-5 mostra os valores encontrados para os índices de ductilidade das quatro vigas ensaiadas. Comparando as vigas de concreto de mesma resistência, percebe-se um aumento significativo de ductilidade para as vigas com uma maior taxa de armadura. Esse aumento se dá pelo aumento do momento máximo. Quando comparadas as vigas de concreto com a mesma taxa de armadura, percebe-se um aumento de ductilidade nas vigas com um concreto de maior resistência à compressão. Isso também ocorre devido ao aumento do momento máximo. Esse aumento de ductilidade em vigas com taxas de armaduras de 1,78% pode ser menor, já que foi observado um momento máximo inferior que o esperado na viga de 16mm de CC, quando foi comparado anteriormente ao momento teórico calculado.

A Tabela 4-6 mostra as deformações do concreto obtidas na tensão máxima de cada viga estudada. Ao comparar as deformações, pode-se

verificar que com a utilização do CUAD diminui a deformação do concreto em aproximadamente 40% para os dois casos de vigas de concreto armado.

Tabela 4-5 – Índices de ductilidade

Ductilidade					
<i>Família</i>	ρ (%)	Fcm (MPa)	$M_{m\acute{a}x}/M_{0,001}$	$\Delta_{m\acute{a}x}/\Delta_{0,001}$	μ
8mm – CC	0,44	34,66	1,16	6,81	7,899
8mm – CUAD	0,44	130,01	2,18	5,03	10,965
16mm – CC	1,78	34,66	3,82	5,98	22,843
16mm – CUAD	1,78	130,01	4,35	4,65	35,972

Tabela 4-6 – Deformações do concreto

Deformações do concreto ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	CC	CUAD	Dif. Relativa (%)
8mm	402,66	234,12	41,85
16mm	557,31	340,65	38,87

A Figura 4-12 apresenta as curvas de momento x abertura da fissura principal das vigas ensaiadas. Para a elaboração desse gráfico, foi utilizado o DIC, onde foi possível monitorar a abertura das fissuras principais à medida que se aumentava o carregamento sobre os corpos de prova. As vigas de concreto de ultra-alto desempenho apresentaram abertura de fissura menor que as vigas de concreto convencional, para um mesmo momento atuante analisado. Isso se deve ao fato de que as fibras de aço funcionam como uma ponte de transferência de tensões, levando à formação de um maior número de fissuras com menor espaçamento entre elas e, conseqüentemente, à menores aberturas. Essa análise foi considerada no estado limite último, somente no trecho linear das curvas, antes da plastificação.

A Figura 4-13 e a Figura 4-14 mostram os perfis de deformação das vigas estudadas no instante anterior a ruptura. Esses perfis foram obtidos a partir da

deformação obtida do traçado de uma seção na zona tracionada da região central, preparada para a análise do DIC. As vigas de concreto convencional apresentam fissuras maiores com espaçamentos regulares, enquanto que nas vigas de concreto de ultra-alto desempenho foram formadas múltiplas fissuras, praticamente imperceptíveis na zona tracionada. As fibras mantêm a transferência de tensões interna mesmo nas seções fissuradas, fazendo com que o concreto atinja sua resistência à tração em múltiplos pontos, próximos entre si, levando a mais fissuras com conseqüente menor espaçamento entre elas.

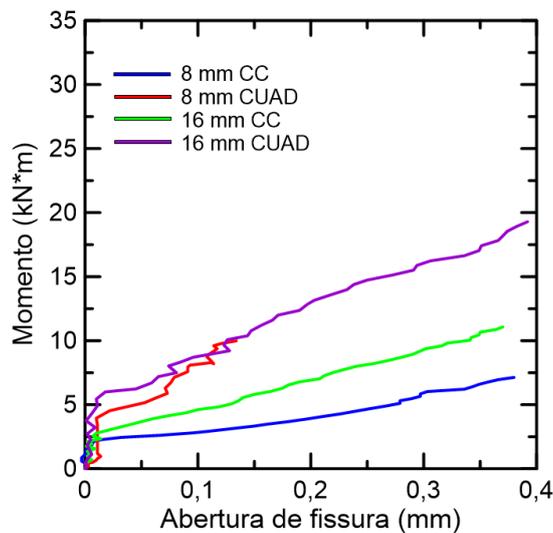


Figura 4-12 – Momento x Abertura de fissura das vigas estudadas

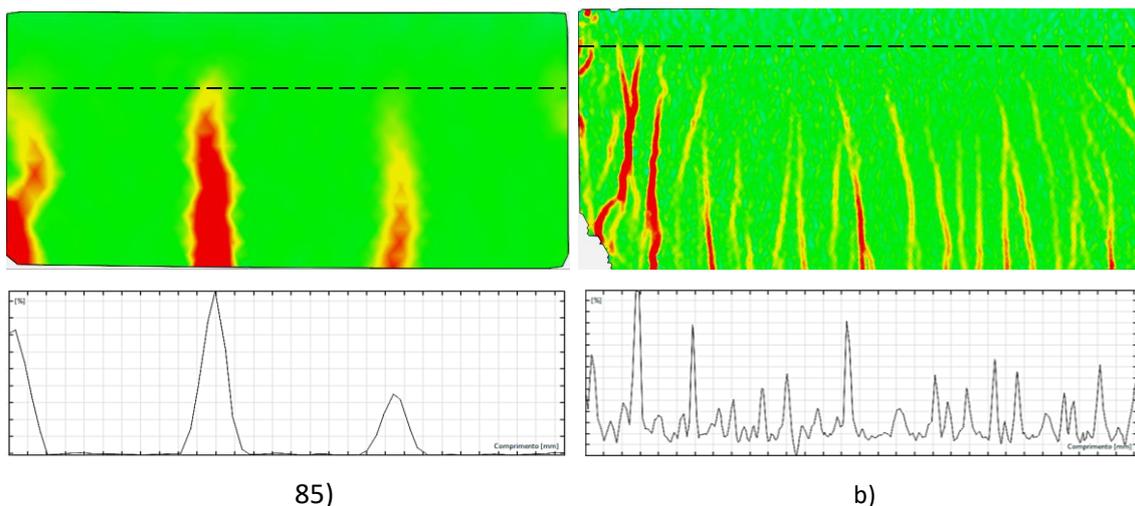


Figura 4-13 – Perfis de deformação e deformação relativa das vigas estudadas a) 8mm CC (deformação relativa máxima de 4,5%); b) 8mm CUAD (deformação relativa máxima de 3,0%).

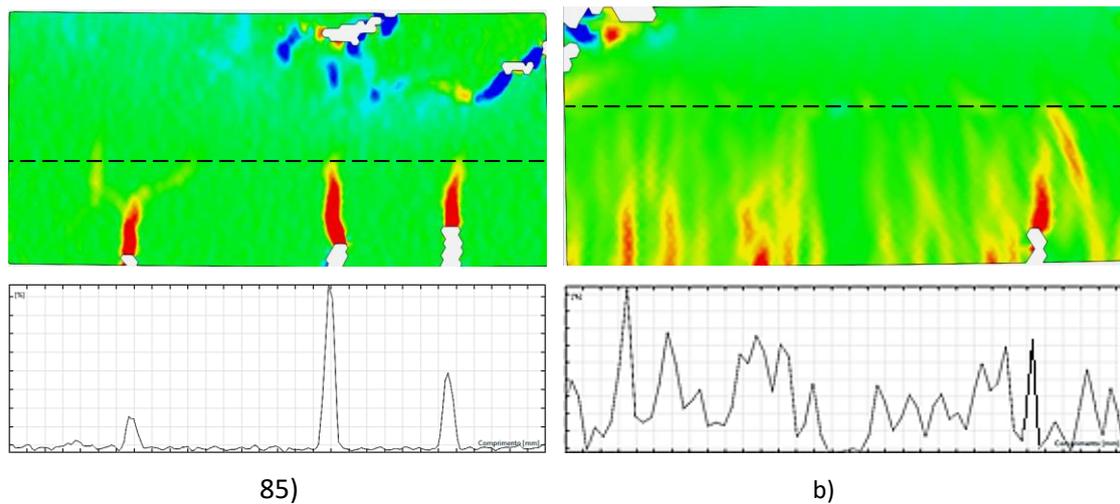


Figura 4-14 – Perfis de deformação e deformação relativa das vigas estudadas a) 16mm CC (deformação relativa máxima de 8,0%); b) 16mm CUAD (deformação relativa máxima de 1,8%);

Com o aumento da resistência do concreto, a área comprimida é menor e para compensar, aumenta-se a região tracionada elevando a posição da linha neutra. Foi possível verificar, também, que as aberturas de fissuras diminuem com a utilização do CUAD tanto nas vigas com armaduras de 8mm quanto nas vigas com armaduras de 16mm. Essas reduções ocorreram devido a utilização de fibras de aço que atuam interceptando a progressão das fissuras. A Figura 4-15 mostra os gráficos relacionados ao comportamento do aço nos ensaios.

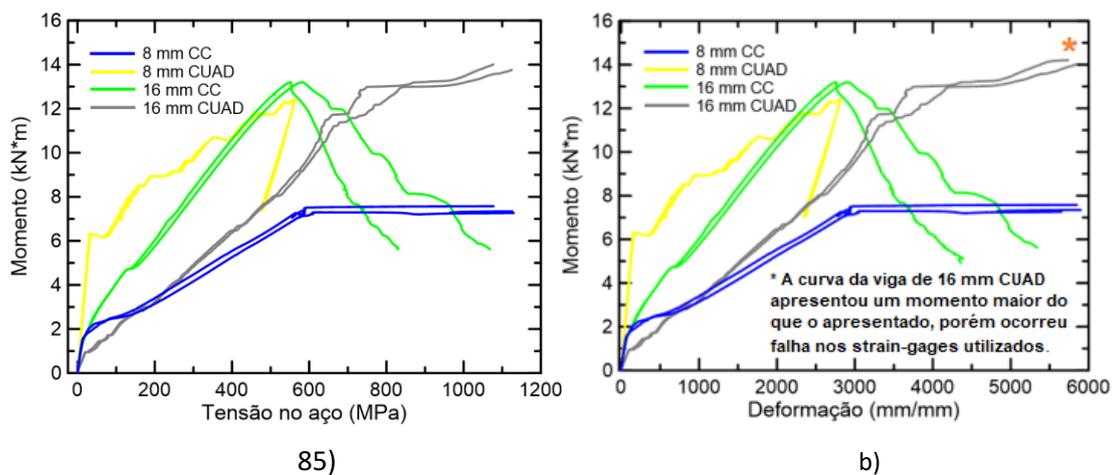


Figura 4-15 – a) Momento x tensão do aço b) Momento x deformação do aço

Analisando a Figura 4-15, é possível perceber que a viga de 8 mm de CUAD e a viga de 16 mm de CC não apresentaram escoamento da armadura, diferente do que ocorre com as vigas de 8 mm de CC e 16 mm de CUAD. Devido à baixa taxa de armaduras da viga de 8 mm de CUAD, as fibras contribuem significativamente para o aumento da rigidez. Sendo assim, as fibras estão absorvendo boa parte dos esforços de tração, gerando baixa sollicitação da armadura e conseqüentemente, baixas deformações. A partir de um certo momento, a fibra começa a perder a eficiência e ocorre uma perda de força gradual. Logo, se a armadura não tinha atingido o escoamento ainda, com a perda de força esse escoamento perde a possibilidade de acontecer. Esse fenômeno não ocorre para a viga de 16 mm CUAD, pois as armaduras possuem contribuição relativamente importante, possibilitando a ocorrência do escoamento. Já a viga de 16 mm CC, conforme já dito anteriormente, aparentemente falhou prematuramente por compressão devido à baixa resistência do concreto e a ausência de fibras, com pequenas deformações na armadura, não chegando na sua capacidade total de suporte.

Ao analisar os valores das deformações a partir dos strain gauges posicionados nas barras de aço, também é possível verificar a tensão média obtida nas barras, comparadas com um mesmo momento atuante. Comparando o CC com o CUAD, no caso do CUAD o braço de alavanca entre as forças internas de compressão e tração é maior (linha neutra mais próxima ao topo) e, portanto, para um mesmo momento, as deformações na armadura deveriam ser menores. Além disso, essa queda nas tensões das barras também é devido a atuação das fibras no elemento estrutural, diminuindo a sollicitação no aço. Então, há dois efeitos que, combinados, reduzem a tensão na barra para um dado momento.

Porém essa queda não ocorre na análise comparativa das vigas com barras de 16mm. Isso pode ter ocorrido devido a falha prematura por compressão na viga de 16 mm CC ocorrendo diminuição da sollicitação das barras de aço e também porque foi posicionado apenas um strain gauge no ponto central de cada barra de aço. O ponto analisado pode ter sido um com baixa tensão na barra, já que a viga de CC apresenta um espaçamento maior entre as fissuras. O mesmo não acontece com as vigas de CUAD, porque como os espaçamentos entre as fissuras são menores, provavelmente

capturou um ponto com uma alta tensão no aço. Por exemplo, para um mesmo momento de 7 kNm, as barras de aço apresentam valores de tensão de aproximadamente 560 e 240 MPa para as vigas de CC com barras de aço de 8mm e 16mm, respectivamente, e valores de tensão de aproximadamente 110 e 450 MPa para as vigas de CUAD com barras de aço de 8mm e 16mm, respectivamente.

A partir dos strain-gauges posicionados nas barras de aço, também foi possível traçar curvas referentes ao comportamento de cada barra de aço das vigas em análise (Figura 4-16). Ao observarmos as curvas referentes às vigas com barras de 8mm, podemos perceber que, nas vigas de concreto convencional, as barras de aço se deformam mais rápido que nas vigas de concreto de ultra-alto desempenho, devido a menor sollicitação das armaduras. Já as curvas referentes às vigas com barras de 16mm apresentaram uma deformação inicial semelhante apesar da diferença do tipo de concreto e baixa deformação inicial, o que já era esperado devido ao aumento no seu diâmetro. Porém, conforme visto anteriormente, são necessários mais strain-gauges ao longo das barras de aço para a obtenção de resultados mais precisos.

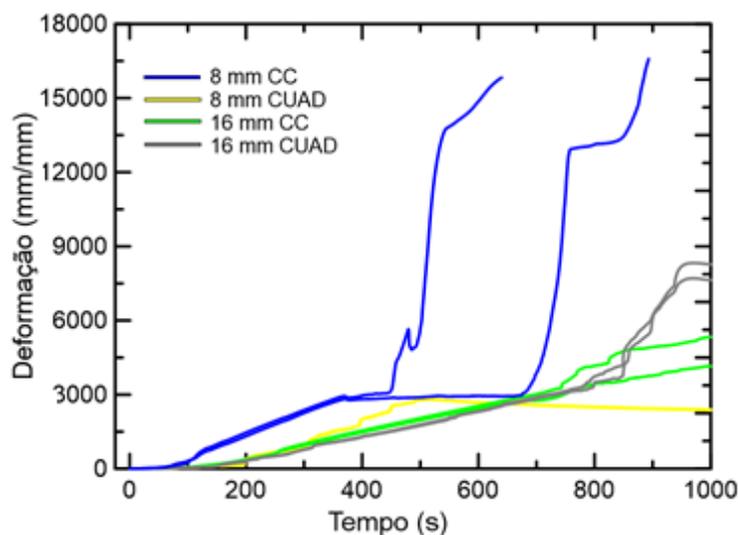


Figura 4-16 – Deformação x tempo do aço das vigas estudadas

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Manfredi (47) em seu estudo com vigas

de concreto convencional com barras de 8mm, com diferentes volumes de fibras. Em seu trabalho foi utilizada a fibra de aço com ganchos HE 80/60 da Belgo Bekaert Arames com comprimento de 60 mm, razão de aspecto de 80 e resistência nominal à tração de 1225 N/mm².

Ao compararmos os gráficos de momento x curvatura (Figura 4-17), momento x abertura de fissura (Figura 4-18) e momento x tensão do aço (Figura 4-19), é possível verificar que as vigas de 8mm CC apresentaram resultados compatíveis com os encontrados por Manfredi em suas vigas com fibras (47) e apesar do não escoamento da armadura, a viga de 8mm CUAD apresentou uma maior rigidez, um melhor controle de fissuras e uma menor solicitação das barras de aço para um mesmo momento analisado.

É interessante mencionar que a utilização de uma fração volumétrica de 40kg/m³ de fibras para um concreto convencional é o suficiente para um bom comportamento, enquanto que a utilização dessa fração em CUAD não foi o suficiente para manter a estabilidade do corpo de prova, conforme visto no ensaio de caracterização.

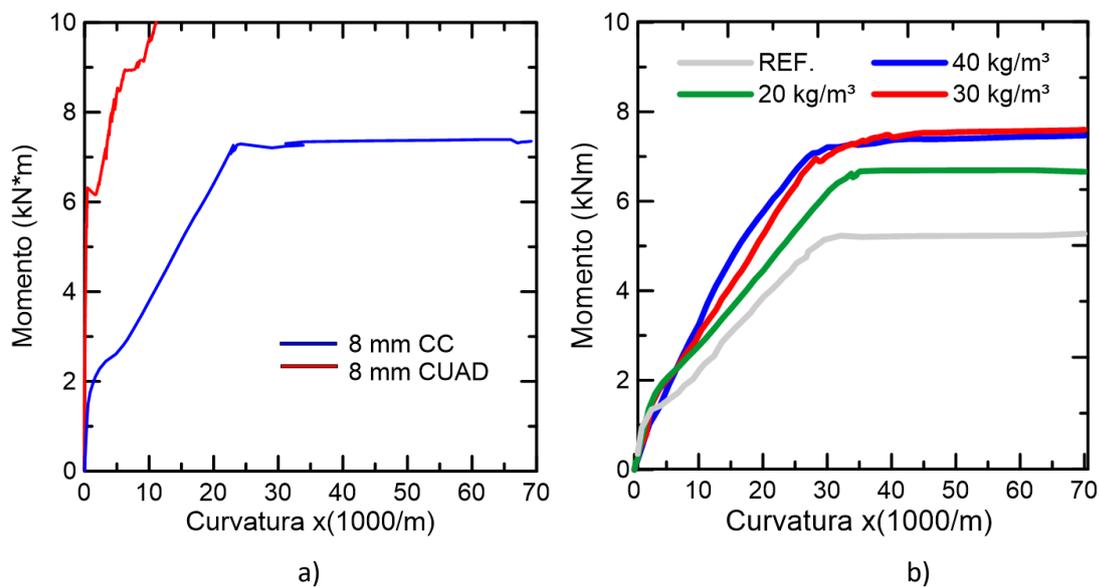


Figura 4-17 – Momento x curvatura a) Autor b) (47)

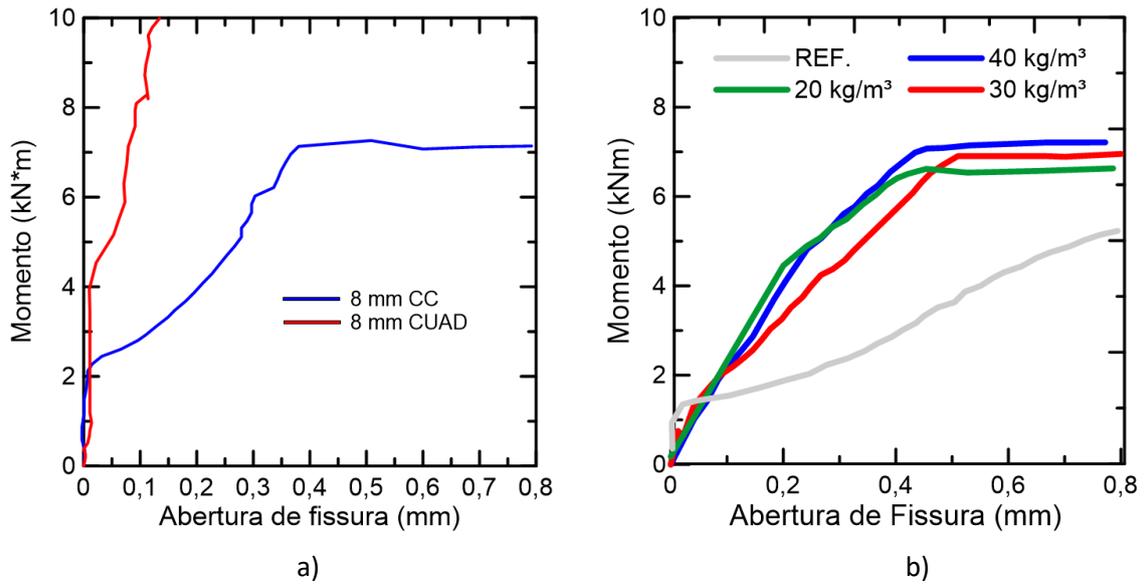


Figura 4-18 – Momento x abertura de fissura a) Autor b) (47)

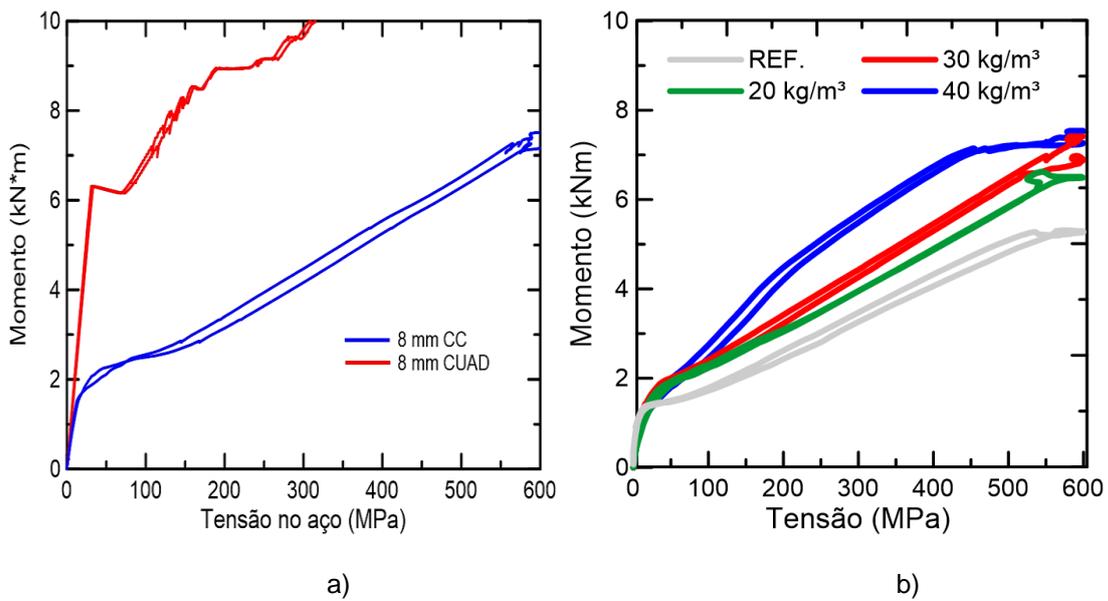


Figura 4-19 – Momento x tensão no aço a) Autor b) (47)

5 CONCLUSÃO

Após a realização do ensaio de caracterização dos corpos de prova submetidos à compressão, foi possível verificar uma alta resistência inicial já aos sete dias de idade do concreto de ultra-alto desempenho, devido à utilização do cimento de classe CPV – ARI.

Ao realizar os ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos, foi observada a fragilidade dos prismas com fração volumétrica de fibras de 40kg/m³. O corpo de prova obteve uma ruptura brusca, caracterizado pela sua baixa capacidade resistente, não suportando o acréscimo de carga após a abertura de fissura. A carga não se manteve devido à instabilidade e fragilidade do corpo de prova na máquina de ensaio. Foi possível observar um comportamento *strain-softening* pós-fissuração. Já nos corpos de prova com fração de 160kg/m³, foi possível observar um aumento na capacidade de carga e na ductilidade, além de ser observado um comportamento *strain-hardening* pós-fissuração. A resistência à tração na flexão apresentou um aumento de cerca de 290% com relação aos prismas com 40kg/m³ de fibras.

Sobre o ponto de vista estrutural, no geral, foram apresentados resultados melhores para as vigas de concreto de ultra-alto desempenho em comparação com as vigas de concreto convencional. A utilização do CUAD em vigas subarmadas apresenta valores similares às vigas normalmente armadas com CC. Além disso, quando combinadas a utilização do CUAD com o aumento da taxa de armaduras, os resultados melhoram significativamente, apresentando, por exemplo um ganho na capacidade de carga de aproximadamente 40% no aumento da taxa geométrica de armaduras e de 75% com o aumento da taxa de armaduras combinada com a utilização do CUAD.

Ao analisarmos os padrões de fissuração e os modos de falha das vigas estudadas, pode-se perceber uma maior sollicitação da zona comprimida nas vigas de concreto convencional, enquanto nas vigas de concreto de ultra-alto desempenho, a maior resistência do concreto permite absorver sollicitações

maiores. Além disso, as vigas de concreto convencional apresentam fissuras com espaçamentos regulares, enquanto as vigas de concreto de ultra-alto desempenho apresentam múltipla fissuração na zona tracionada. Conforme já mencionado anteriormente, as fibras nas microfissuras atuam como pontes de transferência de tensões, diminuindo a deflexão e consequentemente aumentando sua capacidade portante.

Ao compararmos os momentos experimentais e os momentos teóricos calculados, os resultados encontrados foram bem próximos nas vigas de CUAD, com diferença relativa de aproximadamente 8% para as vigas com barras de 8mm e de 2% para as vigas com barras de 16mm. Sendo assim, foi possível verificar que a utilização do método de dimensionamento de vigas de concreto armado proposto na NBR 6118, para o cálculo do M_{CA} no dimensionamento de vigas de concreto de ultra-alto desempenho, não obteve diferença significativa, apresentando valores bastante similares. É importante destacar que essa abordagem não leva em conta a compatibilidade de deformações entre o concreto armado e o concreto reforçado com fibras, sendo necessários mais estudos que considerem essa compatibilidade entre os modelos.

Foi possível observar que ocorre um aumento de rigidez com a utilização do concreto de ultra-alto desempenho, devido ao aumento do f_{ck} , à melhora na distribuição de tensões obtida pelas fibras de aço e à medida que aumenta o diâmetro das barras de reforço. Para as vigas com a mesma taxa de armadura, a utilização do CUAD diminuiu a deflexão para um dado nível de carregamento. Por exemplo, para as vigas com barras de 8mm, pode-se observar uma diminuição de deflexão de 5,13mm para 1,75mm, o que corresponde a uma diminuição de 66% no valor da deflexão com a utilização do concreto de ultra-alto desempenho. Já para as vigas armadas com barras de 16mm, pode-se observar uma diminuição de deflexão de 8,16mm para 5,73mm, o que corresponde a uma diminuição de 30% no valor da deflexão com a utilização do concreto de ultra – alto desempenho. Ao compararmos a deflexão entre as vigas com o mesmo tipo de concreto e diferentes taxas de armaduras, pode se observar uma diminuição na deflexão de 5,13mm para 3,46mm, correspondente a uma queda de 32%, quando se aumenta a taxa de armaduras das vigas de concreto convencional. Já para as vigas de concreto

de ultra-alto desempenho houve uma diminuição na deflexão de 5,21mm para 4,94mm, correspondente a uma queda de apenas 5%. Com relação à ductilidade, foi observado um aumento nas vigas com a utilização do CUAD e com o aumento da taxa de armaduras.

Analisando o comportamento das barras de aço das vigas estudadas, foi possível perceber que para vigas subarmadas, as fibras de aço podem dificultar o escoamento da armadura. Além disso, percebe-se uma diminuição de tensões nas barras de aço com o aumento da resistência do concreto, devido à elevação da linha neutra e também devido à atuação das fibras no elemento estrutural. Já nas vigas com barras de 16mm, a utilização do CUAD contribuiu para o escoamento da armadura devido às altas taxas de armaduras e utilização de fibras. Na viga de CC, devido a falha prematura por compressão, ocorreu diminuição da solicitação das barras de aço.

Foi observado também que as barras de aço com diâmetros menores se deformam mais rápido nas vigas de concreto convencional que nas vigas de concreto de ultra-alto desempenho, devido à menor solicitação das armaduras. Já nas vigas com barras diâmetros maiores, a deformação inicial é semelhante apesar da diferença do tipo de concreto, devido ao maior diâmetro das barras.

Na análise comparativa dos resultados desse estudo com os resultados obtidos por Manfredi (47) foi possível verificar uma melhora nas propriedades mecânicas das vigas de concreto armado com a utilização do CUAD.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A elaboração de vigas de concreto convencional com a mesma taxa de armaduras e a mesma quantidade de fibras utilizadas nas vigas analisadas nesse estudo. Desse modo, poderá ser analisada a influência do tipo de concreto no comportamento à flexão da viga, como o aumento da rigidez e a diminuição da deflexão.
- A elaboração de vigas de concreto de ultra-alto desempenho com reforço convencional de barras de aço, com diferentes seções, de forma que fosse possível avaliar a utilização de peças estruturais menores, com o mesmo comportamento à flexão, gerando economia de material.
- Uma análise comparativa entre vigas de concreto de ultra-alto desempenho com e sem a utilização do reforço com barras de aço, para ser verificado até que ponto pode ocorrer a substituição do reforço convencional devido a utilização do CUAD.
- A utilização da matriz de concreto de ultra-alto desempenho utilizada nesse estudo em diferentes elementos estruturais para analisar a influência da sua utilização no comportamento desses elementos.
- Uma análise mais detalhada das barras de aço de vigas de concreto de ultra-alto desempenho, utilizando uma maior quantidade de strain-gauges ao longo de toda sua extensão.

7 REFERÊNCIAS

1. VANDERLEI, R. D. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. Universidade de São Paulo, 2004.
2. AGUIAR, E. A. B. Projeto de pilares de concreto armado. Universidade de São Paulo, 2011.
3. BUTTIGNOL, T. E. T. et al. Aplicações do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em obras de reforço e recuperação de estruturas. In: Anais do 60º Congresso brasileiro do concreto. 2018.
4. ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. Concreto: Ciência e Tecnologia, n. 36, 2011.
5. BLOG ATEX DO BRASIL [Internet]. [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://www.atex.com.br/blog/materiais/conheca-o-uhpc-concreto-ultra-alto-desempenho/>
6. RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.
6. PINTEREST [Internet]. [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://br.pinterest.com/pin/353743745708130799/>
7. RAHEEM, A. H. A.; MAHDY, M.; MASHALY, A. A. Mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete. Construction and Building Materials, v. 213, p. 561–566, 1 jul. 2019.
8. ALSALMAN, A. et al. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, v. 153, p. 918–928, 1 out. 2017.
9. PINTEREST [Internet]. [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://br.pinterest.com/pin/353743745708130799/>
10. BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge — world's first reactive powder concrete structure. PCI Journal, p. 60-71, 1999.
11. ENDICOTT, W. A. A Whole New Cast. Aspire, p. 26-29, 2007.
12. GRAYBEAL, B. A.; RUSSEL, H. G. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. United States: Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2013.
13. DUCTAL | LAFARGE HOLCIM. Para que o mundo construa melhor. [Internet].

- [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://www.lafargeholcim.com.br/ductal>
14. PINTEREST [Internet]. [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://br.pinterest.com/pin/353743745708130799/>
 15. DUCTAL. Our projects with UHPC in architecture and civil engineering. [Internet]. [cited 2021 Aug 14]. Available from: <https://www.ductal.com/en/projects>
 16. CAMPIONE, G.; MANGIAVILLANO, M. Fibrous Reinforced Concrete Beams in Flexure: Experimental Investigation, Analytical Modelling and Design Considerations. *Engineering Structures*, v. 30, n. 11, p. 2970–2980, 1 nov. 2008.
 17. YANG, R. et al. Reply to the discussion by P.E. Grattan-Bellew of the paper “Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars”. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 4, p. 667–668, 2000.
 18. YANG, I. H.; JOH, C.; KIM, B.-S. S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Engineering Structures*, v. 32, n. 11, p. 3478–3487, 1 nov. 2010.
 19. YANG, I.-H. H. et al. An Experimental Study on the Ductility and Flexural Toughness of Ultrahigh-Performance Concrete Beams Subjected to Bending. *Materials*, v. 13, n. 10, p. 2225, 12 maio 2020.
 20. ASHOUR, S. A.; WAFI, F. F.; KAMAL, M. I. Effect of the concrete compressive strength and tensile fibers ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams. *Engineering Structures*, v. 22, n. 9, p. 1145–1158, 1 set. 2000.
 21. YOO, D. Y.; YOON, Y. S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, v. 102, p. 409–423, 1 nov. 2015.
 22. YANPING, Z. et al. Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra- high performance concrete (UHPC): A state of the art review. *Engineering Structures*, v. 205, p. 1–19, 31 dez. 2019.
 23. ASHOUR, S. A. Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams. *Engineering Structures*, v. 22, n. 5, p. 413–423, 1 maio 2000.
 24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento 2014.
 25. CONCRETE IFFS. FIB Model Code. 2010.
 26. ACI COMMITTEE 544. 544. 4R-18: Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete. 2018.
 27. AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, p. 1349–1359, 1 set. 2000.

28. ALMEIDA, I. R. Betões de alta resistência e durabilidade: Composição e características. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa (Tese de doutorado), 1990.
29. KUNTZ, E. G. Aplicação de concreto fibroso de ultra alto desempenho no projeto de uma ponte estaiada . Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE (Dissertação de mestrado), 2016.
30. COPPOLA, L. et al. Influence of Superplasticizer Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Mortars. Special Publication, v. 173, p. 537-558, 1997.
31. NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto-5ª Edição. Bookman Editora, 2015.
32. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 2006.
33. BIZ, C. E. Concreto de pós reativos. 2001.
34. AİTCIN, P-C. High performance concrete. CRC Press, 1998.
35. COLLEPARDI, S. et al. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete. ACI Journal, v. 186, p. 503–524, 1999.
36. FIGUEIREDO, A. D. Parâmetros de dosagem e controle do concreto projetado com fibras de aço. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. (Tese de doutorado), 1997.
37. AİTCIN, P-C. Binders for durable and sustainable concrete. CRC Press, 2007.
38. BASTOS, P. S. S. Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço. São Paulo: Universidade de São Paulo (Tese de doutorado), 1999.
39. BONNEAU, O. et al. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. ACI Materials Journal, v. 94, p. 286–289, 1 jul. 1997.
40. DALLAIRE, E.; AİTCIN, P-C.; LACHEMI, M. High-performance powder. Civil Engineering, v. 68, n. 1, p. 48, 1998.
41. DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concrete. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 29, n. 4, p. 233–240, 5 jan. 1996
42. SILVA, F. et al. Behavior Under Compression and Bending Loads of Multi-Scale High Performance Steel Fiber Reinforced Cement Based Composites. Brittle Matrix Composites 8. Anais...Elsevier Ltd, 2007
43. AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. The Properties of Fibre Composites. IPC Sci. Technol. Press, v. 4, p. 15–26, 1 jan. 1971.
44. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 544.1R: Stateof-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. United States, 2002.

45. SILVEIRA, P. H. T. T. Estudo do concreto reforçado com fibras de aço e sua aplicação em dormentes ferroviários. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica (Dissertação de mestrado), 2018.
46. FANELLA, D. A.; NAAMAN, A. E. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 82, n. 4, p. 475–483, 1985.
47. MANFREDI, R. P. Propriedades mecânicas e dimensionamento de estruturas de concreto reforçadas com fibras de aço. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica (Dissertação de mestrado), 2020.
48. OU, Y.-C. et al. Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 2, p. 207–215, fev. 2012.
49. NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 39, n. 5, p. 547–555, 2006.
50. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF4: Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fibre reinforced concrete. Japan, 1984.
51. ASTM C 1609/C1609M-19 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber reinforced concrete. ASTM 2005.
52. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN14651: Test method for metallic fibred concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels, 2005.
53. BRANDÃO, J. H. Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. 2005.
54. JÚNIOR, J. P. D. A. Projeto estrutural de vigas de concreto de alto desempenho. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (Dissertação de mestrado), 1999.
55. MONTE, R.; BARBOZA, A. S. R. Controle tecnológico do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. *Concreto e Construções*, p.33-38, 2017.
56. CARDOSO, D. C. T. et al. Influence of steel fibers on the flexural behavior of RC beams with low reinforcing ratios: Analytical and experimental investigation. *Composite Structures*, v. 222, 2019.
57. DANCYGIER, A. N.; KARINSKI, Y. S.; NAVON, Z. Cracking localization in tensile conventionally reinforced fibrous concrete bars. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 53-61, 2017.
58. DANCYGIER, N.; BERKOVER, E. Cracking localization and reduced ductility in

- fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios. *Engineering Structures*, v. 111, p. 411-424, 2016.
59. BENTUR, A.; MINDESS, S. Concrete beams reinforced with conventional steel bars and steel fibres: properties in static loading. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 5, n. 3, p. 199–202, 1 ago. 1983.
 60. PEREIRA, E. V. Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica (Dissertação de mestrado), 2017.
 61. MERTOL, H. C.; BARAN, E.; BELLO, H. J. Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 185–193, 2015.
 62. TANG, C. W. Local bond stress-slip behavior of reinforcing bars embedded in lightweight aggregate concrete. *Computers and Concrete*, v. 16, n. 3, p. 449–466, 2015.
 63. TAN, K. H.; PARAMASIVAM, P.; TAN, K. C. Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short- and long-term loadings. *Advanced Cement Based Materials*, v. 2, n. 4, p. 127–137, 1995.
 64. NING, X. et al. Experimental study and prediction model for flexural behavior of reinforced SCC beam containing steel fibers. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 644–653, 2015.
 65. LIANG, X. W. et al. Investigation on flexure capacity of reinforced ultra high performance concrete beams. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, v. 36, n. 5, p. 110–119, 1 maio 2019.
 66. VANDEWALLE L. et al. RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Design of steel fibre reinforced concrete using the sigma-w method: principles and applications. *Materials and Structures*, v.35, p. 262–78, 2002.
 67. IBRACON/ABECE. Práticas recomendadas IBRACON/ABECE: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. Brasil, 2016
 68. SOCIETY C. TECHNICAL REPORT 34. Concrete industrial ground floor slabs – a guide to their design and construction. 2016.
 69. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. 2021
 70. IBRAHIM, H. H. H.; MACGREGOR, J. G. Modification of the ACI rectangular stress block for high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, v. 94, n. 1, p. 40–48, 1997.

71. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento 2014.
72. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos 2018
73. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto 1991.
74. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica 2003.
75. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland 1992.
76. MOURA, G. B.; FERNANDES, R. C. Determinação da pasta de consistência normal e índice de consistência da argamassa - Cimento Portland CP-V ARI. Manaus: Universidade do Estado do Amazonas (UEA), 2014.
77. DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning. Concrete Mixture Proportioning, 4 mar. 1999.
78. STOMARIOR, M. J. Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
79. TINOCO, M. P. Comportamento mecânico de compósitos cimentícios do tipo SHCC utilizando reforços híbridos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica (Dissertação de mestrado), 2020.
80. TEIXEIRA, F. P.; SILVA, F. On the use of natural curauá reinforced cement based composites for structural applications. Cement and Concrete Composites, v. 114, 1 nov. 2020.
81. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro; 2017.
82. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão 2019.
83. CASTOLDI, R. Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica (Dissertação de mestrado), 2018.
84. GOM SOFTWARE 2020 (2020 Hotfix 2, Ver. 133088, Build 2020-11-19).
85. JAEGER, L. G.; MUFTI, A. A.; TADROS G. The concept of the overall performance factor in rectangular-section reinforced concrete members. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, p. 551-559, Sapporo, Japan, 1997.

