



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

EDUARDO COSTA GRANATO

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
UTILIZANDO CONCRETO DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS**

CAMPINAS
2020

EDUARDO COSTA GRANATO

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
UTILIZANDO CONCRETO DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO EDUARDO COSTA GRANATO E ORIENTADO PELO PROF. DR. JOSÉ LUIZ ANTUNES DE OLIVEIRA E SOUSA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR:

**CAMPINAS
2020**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G762r Granato, Eduardo Costa, 1993-
Reforço de vigas de concreto armado utilizando concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras / Eduardo Costa Granato. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa.
Coorientador: Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto de alta resistência. 2. Concreto armado - Construção - Manutenção e reparos. 3. Vigas de concreto. 4. Pesquisa experimental. I. Sousa, José Luiz Antunes de Oliveira e, 1951-. II. Buttignol, Thomaz Eduardo Teixeira. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fiber reinforced concrete

Palavras-chave em inglês:

High strength concrete

Concrete construction - Maintenance and repair

Concrete beams

Experimental methods

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol [Coorientador]

Leandro Mouta Trautwein

Tulio Nogueira Bittencourt

Data de defesa: 08-10-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-4930-246X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7367836400056344>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
UTILIZANDO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO
REFORÇADO COM FIBRAS**

EDUARDO COSTA GRANATO

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol
Presidente e Co-orientador/FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Tulio Nogueira Bittencourt
EPUSP

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 08 de outubro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, especialmente meus pais, Nilton e Lourdes, pelo incentivo e incondicional apoio durante a execução desta pesquisa.

À minha namorada, Ana Júlia, pelo companheirismo e apoio.

Ao Prof. Dr. José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa pela oportunidade de realizar este trabalho, por sua orientação e seus conselhos durante todo o curso de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Thomaz Eduardo Buttignol pelo acompanhamento do trabalho nas últimas etapas e ajuda com a revisão deste texto.

Aos professores Dr. Leandro Mouta Trautwein, Dr. Luiz Carlos de Almeida e Dr. Túlio Nogueira Bittencourt que participaram das bancas de Qualificação e Defesa deste trabalho e deram contribuições para a realização da pesquisa.

A todos os professores do Departamento de Estruturas da FEC-UNICAMP que contribuíram para minha formação durante todo o curso de pós-graduação

Aos colegas do Laboratório de Modelagem Estrutural e Monitoramento da UNICAMP pelas discussões e colaboração durante a realização do trabalho.

À equipe do Laboratório de Estruturas da UNICAMP, especialmente Luciano e Fábio, pelo grande auxílio na realização dos ensaios.

À equipe do Laboratório de Ensaios Dinâmicos da UNICAMP pela ajuda na realização dos ensaios.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (número do processo 88882.435158/2019-01).

RESUMO

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) é um material relativamente recente com excepcionais propriedades mecânicas e de durabilidade com uma vasta gama de aplicações na engenharia estrutural. Neste trabalho discute-se como a aplicação do CUADRF em vigas de concreto armado pode ser uma solução para o aumento da capacidade de carga e da ductilidade em geral. São discutidas as principais propriedades do concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras em seus estados fresco e endurecido de modo a explicitar sua viabilidade como material de reforço em vigas. Dentre os benefícios do uso do CUADRF como material de reforço estão o aumento da resistência mecânica, da rigidez dos elementos, maior capacidade resistente à fadiga e à corrosão das armaduras, maior capacidade de absorção de energia e redistribuição de esforços, e maior ductilidade. É aplicado um método de empacotamento de partículas para determinação do traço do CUAD a partir da granulometria dos componentes adotados e realizado um estudo experimental para avaliação das propriedades do material obtido por meio de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. É estudada de modo analítico e experimental a aplicação do CUADRF como camada de reforço na região comprimida de vigas de concreto armado superarmadas. Neste caso, é observado que a substituição do cobrimento pelo CUADRF promove ganhos da ordem 45% na capacidade de carga última e de 32% na rigidez à flexão. É possível observar um potencial ganho na ductilidade das vigas devido à redistribuição de esforços internos, mostrando-se um método adequado de reforço estrutural. Foi observado um modo de ruptura pelo descolamento da camada de reforço, indicando a necessidade de atenção quanto ao papel das tensões de cisalhamento neste tipo de reforço. Tal falha pode ser evitada utilizando-se outros métodos para aprimorar a transferência de tensões na interface.

Palavras-chave: concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras, reforço de estruturas, materiais compósitos, ensaio experimental

ABSTRACT

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is a relatively recent material with exceptional mechanical and durability properties with a wide range of applications in structural engineering. In this work, it is discussed how the application of UHPFRC as a strengthening layer can be a solution for the increase of load bearing capacity and the ductility of reinforced concrete structures. The main properties of UHPFRC in its fresh and hardened state are discussed in order to make explicit its viability as strengthening and rehabilitation material in beams. Among the benefits of using UHPFRC as a strengthening material are: increased mechanical strength, increased stiffness of the elements, improved corrosion protection of the steel reinforcement, greater energy absorption and ductility and greater stress redistribution capacity. It was used a particle packing method to design the mix of the UHPC from the particle size distribution of the concrete components and an experimental study was carried out to evaluate the properties of the material by means of compressive strength and modulus of elasticity tests. The application of the UHPFRC as strengthening layer in the compressed region of over-reinforced concrete beams is studied in analytical and experimental ways. In this case it is observed that the replacement of concrete cover by UHPFRC promotes gains in the order of 45% in the load bearing capacity and 32% in flexural stiffness. It is possible to observe a potential to increase the beam's ductility due to the redistribution of internal stresses, proving to be an adequate strengthening technique. In the tests, it was observed a failure due to the debonding of the strengthening layer, indicating a need to pay special attention to the role of shear stresses in strengthened beams. Such failure can be avoided by using different means of bonding between the strengthening layer and the substrate.

Keywords: ultra-high performance fiber reinforced concrete, strengthening of structures, composite materials, experimental tests

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – comparativo entre comportamento em tração dos diferentes materiais ...	21
Figura 2 – exemplo de proporções de mistura por volume.	24
Figura 3 – fissura fictícia de matriz reforçada com fibras	31
Figura 4 – Esquerda: comportamento da matriz e da fibra durante carregamento e Direita: distribuição de tensões elástica e por atrito	33
Figura 5 – modelo de distribuição de tensões em elemento reforçado por fibras	33
Figura 6 – curvas médias de carga por deslocamento obtidas em ensaio de tração na flexão para diferentes consumos de aço.	34
Figura 7 – distribuição de tensões em função do comprimento crítico	35
Figura 8 – método modificado proposto por Hassan, Jones e Mahmud (2012)	39
Figura 9 – modelo bi linear de comportamento pós fissuração	41
Figura 10 – comportamento em tração antes e depois da macro fissuração	42
Figura 11 – modelo AFGC-SETRA com pseudo-encruamento em tração	43
Figura 12 – modelo AFGC-SETRA sem pseudo-encruamento em tração	44
Figura 13 – reforço de elementos mais críticos em pontes	56
Figura 14 – reforço de lajes e vigas com CUAD	56
Figura 15 – barreira de proteção protegida com camada de CUADRF	57
Figura 16 – comparação entre vigas de concreto convencional (RC), reforço sem armadura adicional (NR) e reforço com armadura adicional (R): a) no estágio II e b) depois do escoamento da armadura	59
Figura 17 – Fluxograma para determinação do diagrama momento-curvatura	63
Figura 18 – seção transversal genérica	64
Figura 19 – modos de falha de vigas de concreto armado reforçadas	67
Figura 20 – moldagem dos corpos de prova do <i>slant shear test</i>	71
Figura 21 – esquema e dimensão das vigas VC e VR	72
Figura 22 – arranjo do ensaio	74
Figura 23 – instrumentação das vigas	75
Figura 24 – resultados da determinação do traço	76
Figura 25 – esquema do ensaio <i>slant shear test</i>	79
Figura 26 – falha típica por compressão do substrato	81
Figura 27 – falha típica do substrato	82

Figura 28 – falha mista típica	82
Figura 29 – ensaios para determinação do módulo de elasticidade.....	84
Figura 30 – resultado dos ensaios de módulo.....	86
Figura 31 – tensões na seção transversal no ELU para as duas vigas.....	87
Figura 32 – esquema das dimensões da viga	88
Figura 33 – gráfico de força por deslocamento das vigas VC	89
Figura 34 – ruptura típica da viga VC.....	90
Figura 35 – resultados do ensaio VC1	91
Figura 36 – resultados do ensaio VC2	91
Figura 37 – gráficos de força por deslocamento de todas as VR.....	92
Figura 38 – falha de compressão na camada de reforço a) vista superior b) vista lateral	93
Figura 39 – comparação entre as vigas reforçadas e as de controle	94
Figura 40 – falha por descolamento da camada de reforço	94
Figura 41 – resultados do ensaio VR1	95
Figura 42 – resultados do ensaio VR2	96
Figura 43 – resultados do ensaio VR3	96
Figura 44 – resultados do ensaio VR4	97
Figura 45 – distribuição de deformações experimental na ruptura.....	98
Figura 46 – vista inferior da placa de CUADRF após a falha	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – classificação proposta por Pliskin (1992)	16
Tabela 2 – classificação proposta por Aitcin e Neville (1993)	16
Tabela 3 – Características propostas por Shah (2000)	17
Tabela 4 – Classificação proposta por Zia <i>et al.</i> (1993)	18
Tabela 5 – Classificação proposta por Goodspeed <i>et al</i> (1996).....	18
Tabela 6 – comparação entre diversos traços na literatura em kg/m ³ , exceto A/C ...	25
Tabela 7 – traço adotado para o CUADRF nos ensaios de aderência.....	71
Tabela 8 – traço do CUADRF das vigas reforçadas.....	74
Tabela 9 – massa específica dos componentes.....	76
Tabela 10 – traço encontrado pelo método de empacotamento ótimo.....	77
Tabela 11 – resistência à compressão dos materiais.....	79
Tabela 12 – resultado dos testes de aderência.....	80
Tabela 13 – resultados médios para cada concretagem	83
Tabela 14 – média geral dos resultados	84
Tabela 15 – resultados dos ensaios de compressão do CUADRF.....	85
Tabela 16 – média geral dos resultados do CUADRF.....	86
Tabela 17 – previsão do momento resistente das vigas	87
Tabela 18 – dimensões medidas nas vigas	89
Tabela 19 – comparação dos resultados	98

SUMÁRIO

1. Introdução e justificativa.....	13
2. Objetivos	14
2.1. Objetivos específicos	14
3. Revisão bibliográfica	15
3.1. Histórico do CUAD e CUADRF	15
3.1.1. Histórico e classificação	15
3.1.2. Desenvolvimento do UHPC	19
3.2. Aprimoramento das propriedades do concreto	22
3.3. Composição do CUADRF	23
3.3.1. Materiais constituintes	25
3.4. Papel do reforço de fibras	29
3.4.1. Interação fibra-matriz.....	31
3.4.2. Fatores que afetam o comportamento do compósito.....	33
3.5. Propriedades do CUADRF	37
3.5.1. Compressão	37
3.5.2. Tração	39
3.5.3. Modelos constitutivos	41
3.5.4. Durabilidade	44
3.6. Desenvolvimento do traço.....	46
3.6.1. Empacotamento de partículas sólidas	46
3.6.2. Algoritmo para otimização de traço utilizando o método modificado de Andreasen e Andersen.....	48
3.7. Reforços de estruturas.....	50
3.7.1. Uso do CUAD e CUADRF como reforço de estruturas.....	54
3.7.2. Modelo analítico para reforço com CUADRF.....	62

3.8. Falha por cisalhamento na interface	65
4. Materiais e métodos	69
4.1. Determinação do traço	69
4.2. Ensaio de aderência (<i>slant shear test</i>)	70
4.3. Reforço na região comprimida	72
5. Resultados e discussão	76
5.1. Determinação do traço do CUADRF	76
5.2. Ensaio de aderência.....	78
5.3. Ensaio de caracterização	83
5.1. Resultados analíticos e numéricos.....	87
5.2. Ensaio de vigas reforçadas	88
5.3. Discussão da falha por descolamento do reforço	99
5.4. Discussão.....	101
6. Conclusões	104
7. Sugestões para trabalhos futuros	105

1. Introdução e justificativa

O concreto é o material mais consumido, e o concreto armado é o material estrutural mais importante no mundo. Sua aplicação na engenharia de estruturas é amplamente difundida e suas propriedades o tornam um material economicamente competitivo. Sua boa durabilidade garante aos elementos estruturais vida útil longa, desde que estes sejam corretamente projetados e exista devida manutenção. Entretanto, pode existir a necessidade de intervenções em diversas situações, como elementos que necessitem de adequação para cargas diferentes daquelas a que foram projetados, no caso de danos causados por utilização além dos limites de serviço, entre outras.

Assim, a necessidade de reforço e reabilitação de vigas de concreto armado é frequente na engenharia civil. É comum que pontes rodoviárias ou vigas em edifícios sejam sujeitas a cargas acima de seus limites de serviço ou que especificações de projeto não sejam atendidas durante a vida útil da estrutura, levando a danos, fissuração e deslocamentos excessivos. Além disso, a precária manutenção das estruturas também é comum. Outra situação em que o reforço é necessário é a adequação de estruturas existentes a normas atualizadas, como no caso da alteração de trechos tipo em normas de cálculo de pontes. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de algum método de reforço de estruturas que seja prático e eficaz, visando à utilização dos materiais de forma prática e econômica, além de garantir resistência e durabilidade às estruturas.

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras é um material relativamente recente, que apresenta excepcionais propriedades mecânicas e de durabilidade. A análise de suas propriedades demonstra que este material se mostra adequado para aplicação no contexto de reforços em estruturas, podendo levar a um aumento da capacidade resistente de vigas e aumentar sua durabilidade, o que é extremamente desejável para o reforço de estruturas. Esta possibilidade pode se mostrar economicamente viável, visto que o aumento da durabilidade pode reduzir as intervenções de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é avaliar um método de reforço de vigas de concreto armado utilizando o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras sem alteração das dimensões da seção transversal, aplicando o CUADRF na região comprimida de vigas superarmadas.

2.1. Objetivos específicos

- Estudo de traços do concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras e propriedades de lançamento e adensamento;
- Determinação das propriedades mecânicas do material por meio de ensaios de caracterização em laboratório e comparação com a bibliografia;
- Avaliar a aplicação no reforço de vigas a partir de modelos analíticos baseando-se nos resultados dos ensaios de caracterização.
- Avaliar o comportamento de vigas reforçadas em ensaios experimentais e comparar com os resultados analíticos.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Histórico do CUAD e CUADRF

3.1.1. Histórico e classificação

Ao longo da história do concreto, sempre foram procurados métodos para modificar suas características e otimizar o seu desempenho. Inicialmente, eram propostas diferentes proporções entre os constituintes e realizados ensaios para verificar suas propriedades. Posteriormente, começaram a ser investigadas as propriedades dos materiais e possibilidade de emprego de novos constituintes, destacando-se alguns subprodutos industriais, como a sílica ativa e as cinzas volantes. Além disso, foi observado que o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes também eram uma alternativa para melhorar o desempenho do concreto em seu estado fresco e também no estado endurecido.

No contexto histórico de ampliação dos centros urbanos e verticalização dos edifícios, era necessário encontrar materiais com melhores propriedades mecânicas, em especial a resistência à compressão. Segundo Caldarone (2009), na década de 1960 ocorreram grandes avanços na tecnologia do concreto, principalmente devido ao aumento de uso de aditivos. Nesta época, foram obtidos concretos com resistências entre 40 a 60 MPa, denominados concretos de alta resistência (*high strength concrete, HSC*). Já na década de 1980, concretos de resistência muito alta (*very high strength concrete, VHSC*) eram produzidos de modo comercial, com destaque para o Two Union Square, em Seattle, que utilizou concretos com resistência à compressão da ordem de 130 MPa.

De acordo com Fernandes (2011), com o passar do tempo começou a existir uma preocupação com as outras propriedades do concreto além da resistência à compressão em vista da necessidade do aumento da durabilidade das estruturas de concreto. Assim foi introduzido o conceito de concretos de alto desempenho, um termo bem mais amplo que engloba outras características do material.

Na década de 1980 foi introduzido por Birchall *et al* (1981) e Bache (1981) um tipo de concreto utilizando uma matriz altamente compacta, com altos valores de resistência à flexão e baixa permeabilidade. Atualmente, este tipo de concreto é conhecido como concreto de ultra alto desempenho (*ultra-high performance concrete, UHPC*).

Segundo Casagrande (2017), o desenvolvimento do CUAD foi derivado de pesquisas que objetivavam o aumento da resistência à compressão do CAD, levando o material a um nível superior.

Vários autores e códigos normativos apresentam classificações para diferenciação dos concretos convencionais, de alto desempenho e de ultra alto desempenho. Normalmente, a classificação é feita baseada na resistência à compressão, mas podem ser consideradas outras propriedades do material uma vez que somente a resistência à compressão pode ser muito restritiva.

Como exemplo, é possível citar as classificações de Pliskin (1992) e a de Aïtcin e Neville (1993) observadas na Tabela 1 e Tabela 2, dadas em função da resistência à compressão do concreto.

Tabela 1 – classificação proposta por Pliskin (1992)

Classe	f_{ck} (MPa)
Concreto convencional	20 a 50
Concreto de alto desempenho	50 a 100
Concreto de ultra alto desempenho	100 a 150
Concreto excepcional	>150

Fonte: Pliskin, 1992

Tabela 2 – classificação proposta por Aïtcin e Neville (1993)

Classe	f_{ck} (MPa)
I	50 a 75
II	75 a 100
III	100 a 125
IV	125 a 150
V	>150

Fonte: Aïtcin e Neville, 1993

Aïtcin e Neville (1993) também propõe a utilização de outro parâmetro na classificação dos CAD: a relação água cimento, propondo um limite superior de 0,4. Outros autores corroboram com a ideia de limitar o valor da relação A/C, como de Larrard e Sedran (1994), Pliskin (1992), entre outros.

Shah (2002) propõe uma classificação baseada em diversos parâmetros, como resistência à compressão, trabalhabilidade, tenacidade e durabilidade. Azevedo (2002) compila estas propriedades na Tabela 3.

Tabela 3 – Características propostas por Shah (2000)

Parâmetro	Concreto convencional	Concreto de alto desempenho	Concreto de ultra alto desempenho
Resistência à compressão (MPa)	<50	≈ 100	<200
Relação água/cimento	>0.5	≈ 0.3	<0.2
Aditivos	Não necessário	Necessário uso de plastificante ou superplastificante	Essencial uso de superplastificante
Adição mineral	Não necessário	Cinzas volantes ou sílica ativa	Essencial a inclusão de sílica ativa
Uso de fibras	Benéfico	Benéfico	Essencial
Agente introdutor de ar	Necessário	Necessário	Não necessário
Processamento	Convencional	Convencional	Tratamento térmico ou pressão
Coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário ($10^{-12} m^2/s$)	1	0.6	0.02

Fonte: Shah, 2000

Também há a publicação (ZIA; AHMAD; LEMING, 1997) do *Federal Highway Administration* (FHWA), que define requisitos para o concreto de alto desempenho no âmbito da rede de infraestrutura de estradas americanas. A publicação é baseada nos trabalhos desenvolvidos por Goodspeed et al (1996) e Zia et al (1993), que definem critérios a serem satisfeitos pelo CAD em termos de alta resistência inicial e durabilidade. Os critérios propostos pelos autores são descritos na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4 – Classificação proposta por Zia *et al.* (1993)

Categoria do CAD	Resistência à compressão mínima	Máxima relação A/C	Fator de durabilidade ao gelo mínimo
Tipo A	14 MPa em 6 horas	0.40	80%
Tipo B	17.5 MPa em 4 horas	0.29	80%
Alta resistência inicial	17.5 MPa em 24 horas	0.35	80%
Resistência inicial muito alta	70 MPa em 28 horas	0.35	80%

Fonte: Zia *et al.* (1993)Tabela 5 – Classificação proposta por Goodspeed *et al.* (1996)

Característica	Critério	Classe de desempenho			
		1	2	3	4
Durabilidade ao gelo	x =módulo de elasticidade dinâmico relativo após 300 ciclos	$60\% \leq x < 80\%$	$80\% \leq x$		
Resistência à delaminação	x =classe visual após 50 ciclos	$x = 4.5$	$x = 2.3$	$x = 0.1$	
Resistência à abrasão	Profundidade média de desgaste	$1 \leq x < 2$	$0.5 \leq x < 1$	$x < 0.5$	
Permeabilidade a cloretos	x =coulombs $\times 10^3$	$2 < x \leq 3$	$0.8 < x \leq 2$	$x \leq 0.8$	
Resistência	MPa	$41 \leq x < 55$	$55 \leq x < 69$	$69 \leq x < 97$	$x \geq 50$
Elasticidade	GPa	$28 \leq x < 40$	$40 \leq x < 50$	$x \geq 50$	
Retração em 180 dias	$x = \%$	$600 < x \leq 800$	$400 < x \leq 600$	$x \leq 400$	
Fluência em 180 dias	$x = \%/MPa$	$60 < x \leq 75$	$45 < x \leq 60$	$30 < x \leq 45$	$x \leq 30$

Fonte: Goodspeed *et al.* (1996)

As diversas classificações do CAD e CUAD explicitam a dificuldade de uma definição única para estes materiais, uma vez que é um material com uma vasta gama de propriedades desejáveis. Assim, as definições costumam ser adaptadas ao uso esperado do material, com diversos autores e institutos criando definições próprias.

Com uma abordagem mais ampla, o ACI propôs uma definição para o CAD, e Russel (1999) discute os critérios adotados pela instituição, explicitando o aspecto de desempenho do material. Segundo o ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2013), o CAD é um concreto que atende à critérios de desempenho e uniformidade que não necessariamente são alcançados utilizando métodos e materiais convencionais. Exemplos de propriedades desejáveis são: trabalhabilidade, facilidade de concretagem, alta resistência inicial, propriedades mecânicas em longo prazo, impermeabilidade, tenacidade, densidade, calor de hidratação, entre outros. Azevedo (2002) cita que este conjunto de características não são independentes e podem ser relacionadas entre si em função dos materiais e processos utilizados. Assim, a tentativa de influenciar uma das propriedades obrigatoriamente repercutirá nas outras.

Entretanto, apesar das diferentes abordagens de classificação, da importância de se observar diferentes propriedades e da definição genérica apresentada, é conveniente adotar somente um parâmetro claro e objetivo para classificação. Segundo Naaman e Wille (2012), uma definição relativamente comum e bastante aceita na comunidade científica é adotar como parâmetro resistências à compressão acima de 150 MPa como definição de concretos de ultra alto desempenho.

3.1.2. Desenvolvimento do UHPC

Segundo Brandão (2005), as pesquisas na área do concreto de ultra desempenho seguem dois principais procedimentos:

- a) Obtenção de um concreto com matriz granular densa (*densified small particle, DSP*). É um concreto com alto conteúdo de superplastificante e microssílica.
- b) Utilização de argamassa modificada com polímero (*macro defect free, MDF*). Um processo de polimerização preenche os poros do concreto, resultando em matrizes resistentes e compactas. É um material de fabricação complexa de alto custo, além de apresentar deformações por fluência consideravelmente altas.

De acordo com Brandão (2005), em ambos os processos o material resultante é muito compacto e conseqüentemente frágil. Devido às grandes dificuldades de fabricação e alto custo, o MDF é um produto menos atrativo. Já a matriz DSP deu origem ao

concreto de ultra alto desempenho, um material com altas resistências à compressão e boas características de durabilidade.

Devido à fragilidade da matriz, é natural a ideia de adição de fibras para incrementar a resistência à tração e ductilidade. Daí surge o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF, do inglês *ultra high performance fiber reinforced concrete*, *UHPFRC*). Neste contexto, várias linhas de pesquisa surgiram para investigação da influência das fibras. Segundo Casagrande (2017), este novo conceito levou a três frentes principais:

- a) *Compact Reinforced Composites* (CRC), que utilizam 5 a 10% de fibras de aço, com comprimento máximo de 6mm e 0,15mm de diâmetro;
- b) *Reactive Powder Concrete* (RPC), que utilizam até 2,5% de fibras de aço com no máximo 13mm de comprimento e 0,16mm de diâmetro;
- c) *Multi-Scale Fibre Reinforced Concrete* (MSFRC), que utilizam fibras de aço curtas e longas em conjunto.

O desenvolvimento do CRC teve início com Bache (1987). Em seu artigo, o autor define o CRC como um novo tipo de estrutura compósita com uma matriz extremamente densa e enrijecida com uma alta concentração de fibras de aço, obtendo um material estrutural resistente e dúctil, apresentando similaridades com as estruturas de aço.

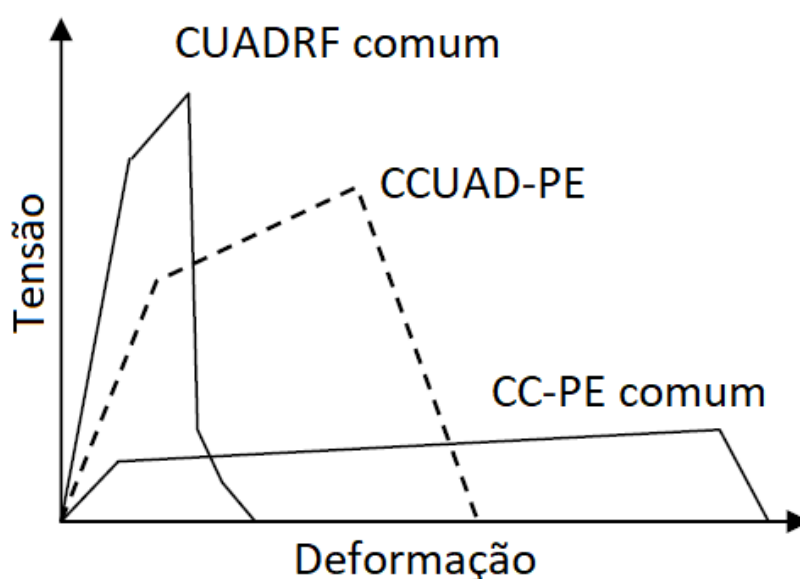
Os RPC foram introduzidos por Richard e Cheyrezy (1995), apresentando concretos de resistências de até 200 MPa elaborados em condições de obras e até 800 MPa quando foram incorporados agregados de aço à mistura. O RPC também apresentava energias de fratura da ordem de 40 kJ/m^2 .

Segundo Rossi (2004) o MSFRC foi desenvolvido com o intuito de aprimorar as propriedades do UHPC tanto em termos de propriedades do material (resistência à tração) quanto em termos da estrutura (ductilidade e aumento de capacidade de carga). O trabalho inicial foi publicado por Rossi (1997).

Outros compostos cimentícios foram desenvolvidos mais recentemente com o intuito de aplicar os desenvolvimentos dos já conhecidos compostos cimentícios com pseudo-encruamento (*strain hardening cementitious composites*, *SHCC*) e compostos cimentícios de alta performance reforçado com fibras (*high performance fiber*

reinforced concrete, HPFRC) à matriz do concreto de ultra alto desempenho (LI; WANG; WU, 2001; LI et al., 2000). Tais materiais se denominam compostos cimentícios de ultra alto desempenho projetados (*ultra high performance engineered cementitious composites*, UHPECC) ou compostos cimentícios de ultra alto desempenho com pseudo encruamento (*UHPSHCC, ou CCUAD-PE*). Tais materiais podem ser definidos como uma matriz cimentícia reforçada por fibras curtas, utilizando principalmente fibras de polietileno de ultra alto peso molecular (*ultra high molecular weight polyethylene*, UHMWPE), com excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade, especialmente em termos de deformações e resistência em tração (KUNIEDA et al., 2010). Sua diferença para o CUADRF é destacada na Figura 1, onde fica clara a maior capacidade de deformação do material aliada à sua alta resistência.

Figura 1 – comparativo entre comportamento em tração dos diferentes materiais



Fonte: Kunieda et al., 2010

O desenvolvimento destes materiais se baseia principalmente na capacidade de multifissuração dos compostos cimentícios e de pseudo-encruamento, entendida simplesmente como sendo a resistência à tração do composto maior que a resistência no início da fissuração. Assim, baseando-se em princípios da micromecânica, diversos autores desenvolveram compostos com capacidades de deformação excepcionais, que podem se mostrar relevantes no estudo de reforço de estruturas (CHEN; YU; LEUNG, 2018; DING et al., 2018; KHALIL et al., 2015; KUNIEDA et al., 2010; RANADE et al., 2013; YU et al., 2018, 2017).

3.2. Aprimoramento das propriedades do concreto

Para melhorar as propriedades mecânicas do concreto com um enfoque a partir da mecânica da fratura e da micromecânica, devem ser considerados três parâmetros: a pasta de cimento, a zona de transição entre agregado e cimento e os agregados.

Primeiramente, pode-se considerar o aumento da resistência da pasta de cimento. Segundo Aïtcin (2004), o aprimoramento das propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada se dá pelo controle de três principais fatores: porosidade, tamanho das partículas de hidratação e homogeneidade da mistura. Os principais fatores que influenciam a porosidade do concreto ou argamassa são o volume de água, o volume de cimento e o volume de ar aprisionados na mistura. Isto já havia sido observado por Féret (1892), que formulou uma expressão para determinação da resistência à compressão de pastas de cimento, onde fica claro que a redução da relação água/cimento implica em aumento da resistência do concreto. Além disso, a redução da quantidade de água na mistura favorece a formação de produtos de hidratação menores, que apresentam maior resistência.

Entretanto, é importante citar que a redução do fator água/cimento pode levar a reduções consideráveis da trabalhabilidade da mistura, induzindo a grandes quantidades de ar preso, que podem influenciar negativamente a resistência à compressão. Assim, a redução do fator água/cimento somente é válido se o espalhamento da mistura for melhorado por um empacotamento ótimo, mantendo os níveis de ar preso baixos (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011).

Além disso, quanto maior a homogeneidade da mistura, melhores as propriedades mecânicas do concreto. Assim, a remoção de ar na mistura do concreto fresco por meio do adensamento é essencial. Neste contexto, o uso de superplastificantes tem grande importância na redução de heterogeneidades da mistura.

Um segundo fator importante a ser considerado para aprimorar a resistência dos concretos é a chamada zona de transição. Segundo Aïtcin (2004), durante o adensamento partículas de agregado podem criar uma barreira, impedindo uma distribuição homogênea da água na mistura. Assim, perto dos agregados graúdos há a tendência de existir uma relação água/cimento maior que nas outras regiões da mistura, criando uma área com resistência inferior ao resto da matriz, conhecida como

zona de transição. O comprimento e espessura desta zona dependem do tipo e tamanho dos agregados e da relação água/cimento, sendo observado que a adição de sílica ativa tende a reduzir a formação destas barreiras.

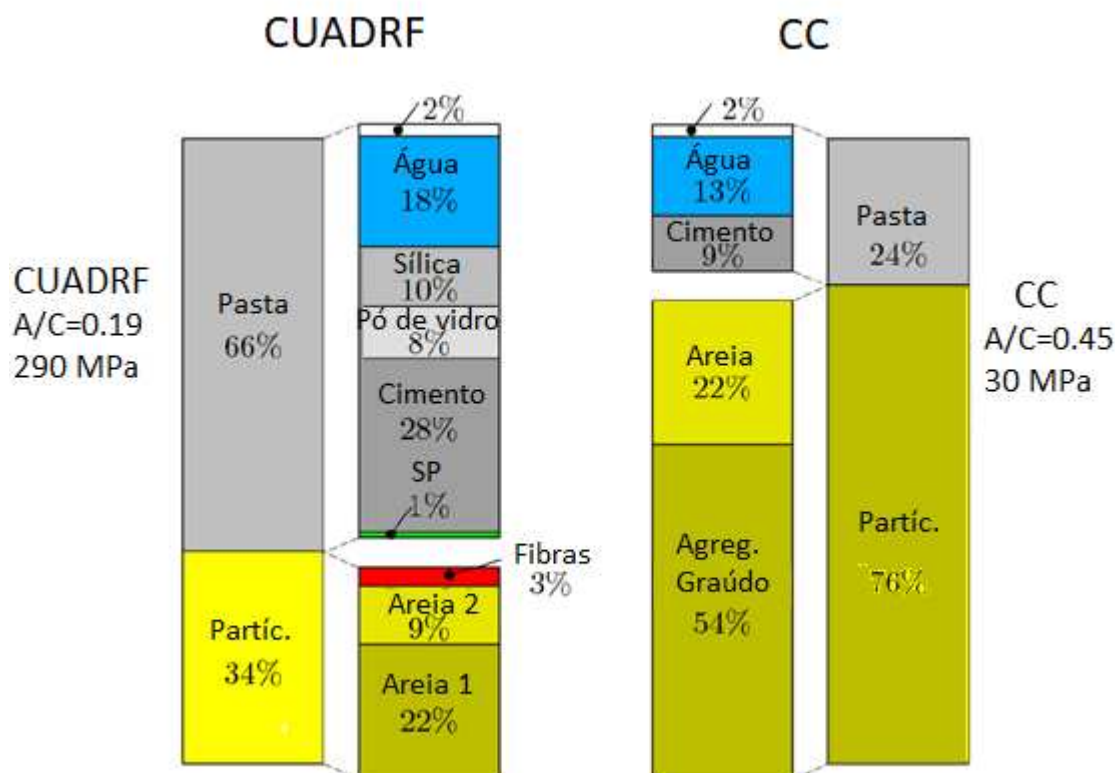
Além disso, a utilização de agregados com melhores propriedades mecânicas é importante para aumentar a resistência do concreto. Assim, para obter concretos com resistências excepcionais é importante selecionar os agregados considerando suas propriedades com atenção.

3.3. Composição do CUADRF

O concreto de ultra alto desempenho (CUAD) é um composto cimentício caracterizado pelo alto teor de cimento, agregados finos (diâmetros inferiores a 0,6 mm), materiais ligantes (cinzas volantes, sílica ativa, pozolanas), baixa relação água/cimento (menor que 0,2) e aditivos. Tal mistura cria uma matriz densa e interconectada, com alta homogeneidade, baixa permeabilidade e alta resistência à compressão. A incorporação de fibras na mistura melhora a resistência à tração e consequentemente aumenta a tenacidade do concreto.

As proporções dos materiais são significativamente diferentes dos concretos convencionais. São utilizadas grandes quantidades de aglomerantes, com teores de cimento ultrapassando 800 kg/m³, utilização da sílica ativa ou escória de alto forno granulada para controlar o calor de hidratação e redução da relação água/cimento (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; DUGAT; ROUX; BERNIER, 1996; RICHARD; CHEYREZY, 1995). A diferença entre materiais inertes e aglomerantes na mistura do UHPFRC e do concreto convencional é evidenciada na Figura 2.

Figura 2 – exemplo de proporções de mistura por volume.



Fonte: Naaman e Wille, 2012

De acordo com Yu, Spiesz e Brouwers (2014), a grande quantidade de materiais ligantes na mistura e a baixa relação de água/cimento gera um grau de hidratação baixo, sugerindo que uma parte dos materiais reativos possa ser substituída por agregados mais baratos, tornando o material mais econômico. Entretanto, o material ligante remanescente pode ser ativado após a fissuração do concreto, reduzindo ou até fechando as fissuras, conferindo propriedade regenerativa ao material e melhorando a impermeabilidade.

A partir da bibliografia, é possível obter diversos traços diferentes para o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras. Na Tabela 6, é possível ver a comparação entre os trabalhos de Dugat, Roux e Bernier (1996), Habel et al (2006) e Richard e Cheyrezy (1995) e os produtos patenteados Ductal® e CARDIFRC®, para visualização

Tabela 6 – comparação entre diversos traços na literatura em kg/m³, exceto A/C

kg/m ³	Cheyrezy	Dugat	Habel	Ductal	CARDIFRC
Cimento	1060	950	1050	705	855
Sílica	265	237	275	230	214
Areia	1170	997	730	1240	940
Fibras	185	146	470	190	390
Aditivo	17	17	35	17	28
Água	180	180	190	195	188
A/(C+S)	0,14	0,15	0,14	0,21	0,18

Fontes: Richard e Cheyrezy (1995), Dugat *et al* (1996), Habel *et al* (2006), Fernandes (2011)

3.3.1. Materiais constituintes

Embora os concretos de alto e ultra alto desempenho utilizem materiais já consagrados no estudo do concreto, são necessários alguns materiais com propriedades específicas para sua fabricação.

3.3.1.1. Cimento

As principais propriedades a serem consideradas no material final e que sofrem grande influência do tipo de cimento são a reologia do concreto fresco e as propriedades mecânicas do concreto endurecido. Conforme citado, a finura e a uniformidade do cimento são parâmetros essenciais para a escolha do cimento do CUAD. Além disso, a composição química também tem influência nas propriedades finais do material.

A finura do cimento está diretamente relacionada com a velocidade de hidratação, trabalhabilidade, consistência, segregação e resistência à fissuração devido à tração. Quanto mais finas as partículas, maior o ganho inicial de resistência do concreto, pois existe uma área de contato maior com a água. Tal processo, entretanto, leva a problemas de perda de trabalhabilidade e endurecimento rápido. Além disso, segundo Azevedo (2002), incrementos na resistência utilizando cimento com partículas mais finas somente são observadas em concretos com baixa idade, sendo inexistentes em idades avançadas.

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), para os cimentos nacionais, buscam-se os tipos mais puros possíveis. A melhor alternativa seria o CP V ARI que, apesar de ter uma finura excessiva, apresenta a maior pureza. Pode-se também considerar o CP II, que não apresenta pureza equivalente, mas tem finura menor que o CP V ARI.

3.3.1.2. Adições minerais

O UHPC pode ser produzido utilizando-se somente o cimento como material ligante. Entretanto, de acordo com Aïtcin (2004), a substituição de parte do cimento por materiais cimentícios complementares que não contenham C_3S , C_3A ou C_4AF pode contribuir positivamente para controle da reologia da massa fresca. Tal substituição pode ser atrativa do ponto de vista econômico, caso o custo dos materiais seja competitivo.

De acordo com Azevedo (2002), como exemplos destes materiais podem ser citados as cinzas volantes, sílica ativa, pozolanas naturais, escórias de alto forno granuladas, metacaulino e cinzas de casca de arroz. Segundo Mehta (1994), tais materiais usualmente são subprodutos industriais, contribuindo também sob o ponto de vista ambiental.

Segundo Coutinho (2006), estas adições são produtos que apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes ou hidráulicas, contém constituintes que se combinam, em presença de água, com hidróxido de cálcio e diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade com propriedades aglomerantes.

3.3.1.3. Superplastificantes

O desenvolvimento e uso dos aditivos superplastificantes foi um dos principais motivos que impulsionaram o desenvolvimento dos concretos de alto e ultra alto desempenho (AZEVEDO, 2002; COLLEPARDI et al., 1999; FERNANDES, 2011). Segundo a ABNT NBR 11768 (ABNT, 2011), superplastificantes são aditivos que: sem modificar a consistência do concreto no estado fresco permite uma redução no conteúdo de água do concreto ou que, sem alterar a quantidade de água na mistura aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto ou ainda que produz esses dois efeitos simultaneamente. Tais características definem a importância destes

aditivos, que permitem uma redução acentuada da relação água/aglomerante e excelente trabalhabilidade, conferindo a propriedade de auto adensabilidade ao concreto.

De acordo com Collepari et al. (1999), os superplastificantes causam dispersão entre as partículas de cimento na mistura do concreto, aumentando a fluidez da massa fresca. Esta dispersão pode ser atribuída ao desenvolvimento de cargas eletrostáticas negativas nas partículas de cimento e também a um efeito de impedimento estérico.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), atualmente os aditivos superplastificantes mais efetivos disponíveis comercialmente para uso em concretos de ultra alto desempenho são aqueles a base de policarboxilatos com cerca de 40 a 45% de teor de sólidos. De acordo com a classificação da ABNT NBR 11768 (ABNT, 2011), os aditivos superplastificantes tipo SP-II são os que apresentam maior potencial para redução de água.

Outro fator importante que deve ser considerado é a compatibilidade entre o aditivo e o cimento. Segundo Collepari et al. (1999), quanto maior o conteúdo de C_3A e a finura do cimento menor é o efeito de aumento de fluidez do aditivo. Os mesmos autores também citam diferenças na fluidez quando cimentos apresentam diferentes formas de sulfato de cálcio: a forma dihidratada é significativamente mais fluida que a hemihidratada. Outros parâmetros químicos do cimento que podem influenciar na fluidez final da mistura são os sulfatos álcalis e o conteúdo de compostos de enxofre (COPPOLA et al., 1998; NAWA; UCHI; FUKAYA, 1989). De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011) para verificação da compatibilidade entre os componentes é recomendada a execução de testes iniciais. Ensaio sugeridos são o mini-slump e cone de Marsh realizados na pasta de cimento, descritos em detalhes por Aïtcin (2004).

Em termos de controle de qualidade do superplastificante, de acordo com Aïtcin (2004), a análise da estrutura de superplastificantes é difícil, demorada e cara, e mesmo após a verificação da estrutura polimérica não há garantias da definição da eficiência ou da compatibilidade com o cimento. Entretanto, é possível realizar diversas análises para estabelecer a qualidade e uniformidade do superplastificante, que incluem a análise de sólidos totais e conteúdo residual. A verificação do comportamento do aditivo de acordo com a ABNT NBR 11768 (ABNT, 2011) é

realizada por meio de ensaios mantendo a consistência ou mantendo-se a relação água-cimento da mistura do concreto, avaliando parâmetros de redução de água, teor de ar no concreto fresco, tempo de pega e resistência à compressão no primeiro caso e consistência, teor de ar no concreto fresco, resistência à compressão e perda de consistência no segundo.

3.3.1.4. Agregados

Os agregados para uso em concretos de ultra alto desempenho são areias finas, com diâmetro não superior a 0,6 mm. É desejável que a areia seja composta principalmente por quartzo devido a sua dureza e excelente interface pasta/agregado (BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017; CASAGRANDE, 2017; COLLEPARDI et al., 1997; RICHARD; CHEYREZY, 1995; VANDERLEI, 2004). De acordo com Vanderlei (2004), o limite inferior para diâmetro das partículas recomendado é de 0,15 mm, com diâmetro médio de 0,25 mm.

Segundo Vanderlei (2004), a areia utilizada pode ser oriunda do pó de pedra ou areias naturais, onde as primeiras apresentam formatos lamelares, resultantes do processo de fabricação da brita, enquanto as areias naturais apresentam formato esférico. Devido à diferença de formato, nas areias naturais a demanda de água é ligeiramente inferior, o que é desejável para os concretos de ultra alto desempenho (CASAGRANDE, 2017; VANDERLEI, 2004).

Outro agregado que pode ser utilizado é o pó de quartzo, que apresenta diâmetros de 0,005 a 0,025 mm. Suas dimensões favorecem o empacotamento da matriz do concreto, além de ser essencial quando é feito o tratamento térmico da mistura, já que ele passa a apresentar comportamento pozzolânico (CASAGRANDE, 2017; VANDERLEI, 2004).

3.3.1.5. Fibras

A utilização de fibras em concreto promove um aprimoramento das propriedades deste material, especialmente em termos de resistência à tração, ductilidade e fadiga. As fibras são elementos descontínuos que usualmente são misturadas no concreto fresco e podem ser compostas dos mais diversos materiais, como fibras de aço, fibras sintéticas ou fibras naturais. Se tratando de compostos cimentícios de ultra alto desempenho, são buscadas aquelas fibras que vão aprimorar as qualidades do

concreto de modo ótimo. Assim, é natural que sejam utilizadas fibras de elevado desempenho, destacando-se as fibras de aço e sintéticas de alta resistência e módulo.

As fibras de aço com aplicação em concreto apresentam grande variabilidade em termos de comprimento e forma. A ABNT NBR 15530:2007 (ABNT, 2007) estabelece critérios para classificação das fibras em função da configuração geométrica, ancoragem e material de origem. Assim, é possível observar comercialmente fibras curtas, com comprimentos inferiores a 20mm, até fibras longas com comprimentos de 60mm. Além disso, as fibras podem ser corrugadas, retas ou com ancoragens nas extremidades.

Para a aplicação no CUADRF, devido às propriedades da matriz e boa aderência com as fibras, são comumente utilizadas fibras retas sem ancoragens. Em função da pequena dimensão dos agregados, fibras com pequenos comprimentos apresentam boa compatibilidade com a matriz (CASAGRANDE, 2017). Na literatura é possível encontrar uma vasta gama de fibras de aço utilizadas no CUAD, geralmente com comprimentos entre 10 e 30 mm (RICHARD; CHEYREZY, 1995; WILLE; KIM; NAAMAN, 2011; YOO; KANG; YOON, 2014; YOO; YOON, 2015).

Outro tipo de fibra utilizada em compostos de alto desempenho são as fibras de alto módulo, como fibras de PVA e polietileno de ultra alto peso molecular. Tais fibras apresentam excelentes propriedades, como módulos de elasticidade da ordem de 100 GPa e resistência a tração de 3000 MPa, além de peso reduzido. Além disso, sua interação com a matriz do CUAD cria condições ideais para existência do pseudo encruamento. A aplicação de tais fibras gera compostos com altas resistências à tração e alta capacidade de deformação (DING et al., 2018; KHALIL et al., 2017; RANADE et al., 2011; YU et al., 2018, 2017).

3.4. Papel do reforço de fibras

O concreto de ultra alto desempenho, assim como os concretos convencionais, apresenta comportamento frágil. Produtos resultantes da hidratação da pasta de cimento estão sujeitos a defeitos intrínsecos como descontinuidades da matriz, microfissuras resultantes da retração da pasta de cimento, da zona de transição dos agregados e vazios decorrentes do volume de ar incorporado à massa fresca. A existência de tais descontinuidades faz com que, quando submetido a tensões de

tração, ocorram concentrações de tensões nas suas regiões periféricas. Tal fenômeno é estudado em detalhes pela mecânica da fratura.

Segundo Casagrande (2017), quando a matriz frágil (ou quasi-frágil) é sujeita à compressão, ela é capaz de transmitir as tensões através das microfissuras. Entretanto, na tração as tensões serão induzidas nas extremidades da fissura, amplificando sua intensidade e induzindo a propagação da descontinuidade na direção transversal das tensões.

Conforme citado, a mecânica da fratura fornece ferramentas para modelagem do fenômeno da fissuração. Diferentemente da abordagem tradicional da resistência dos materiais, onde os materiais são avaliados em função de sua resistência ao escoamento ou à tração, na mecânica da fratura os materiais quasi-frágeis são estudados em função de sua tenacidade à fratura e tamanho do defeito (ANDERSON, 2005). Um modelo utilizado e sugerido pelo RILEM-TC162-TDF (2003), que foi proposto inicialmente por Hillerborg, Modéer e Petersson (1976), consiste em considerar uma fissura fictícia com tensões de fechamento em sua ponta, de modo a simular o intertravamento dos agregados e a zona de processos inelásticos. Deste modo, a tensão de tração atinge o valor máximo de resistência à tração do material na ponta da fissura fictícia e decresce até zero no ponto que representa a dimensão crítica da fissura fictícia.

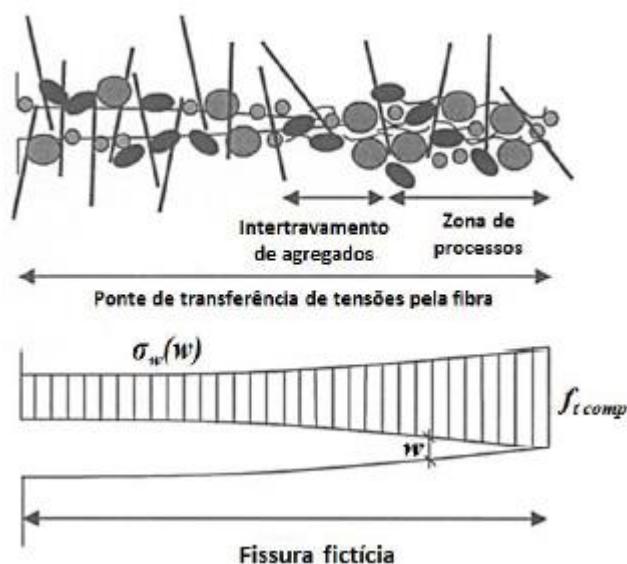
Segundo Casagrande (2017), a partir deste modelo é observada uma área de transferência de tensões cada vez menor à medida que a fissuração evolui. Assim, verifica-se que o concreto apresenta resistência à tração inferior à de compressão devido à concentração de tensões na periferia de fissuras e que apresentam alta capacidade de propagação.

A introdução de fibras na matriz cimentícia é uma alternativa para redução da fragilidade do concreto, adicionando elementos capazes de transmitir as tensões através da fissura. Quando adicionadas fibras com propriedades e quantidades adequadas, estas podem agir como ponte de transmissão de tensões reduzindo assim as concentrações de tensão na ponta da fissura, o que reduz a velocidade de propagação de fissuras e confere um comportamento pseudo-dúctil para o material (FIGUEIREDO, 2011). O principal parâmetro afetado pelo aumento da ductilidade dos compostos é a energia absorvida pelo material até sua ruptura.

De acordo com Casagrande (2017), a ductilidade conferida pelas fibras é resultante de diversos fatores, como: ponte de transferência de tensões, desvio ou interceptação das fissuras, descolamento das fibras da matriz, que consomem uma parcela da energia.

Em comparação ao modelo de fissura fictícia para matrizes não reforçadas, o reforço de fibras permite uma nova distribuição de tensões na fissura. Baseado em Hillerborg (1980), também é possível apresentar um modelo de tensões, observado na Figura 3. Neste modelo, a fissura fictícia abrange uma zona de transferência de tensões resultante da adição de fibras.

Figura 3 – fissura fictícia de matriz reforçada com fibras



Fonte: Casagrande (2017)

A capacidade de o material absorver maiores quantidades energia devido à sua ductilidade juntamente com as tensões de fechamento da fissura permitem uma diminuição do tamanho das fissuras, assim como controle de sua propagação. Deste modo, o material compósito é menos susceptível à agentes externos e à penetração de água, aumentando consideravelmente a durabilidade do material e seu campo de atuação (CASAGRANDE, 2017).

3.4.1. Interação fibra-matriz

Segundo Casagrande (2017), a interação entre as fibras e a matriz é similar àquela entre a pasta de cimento e os agregados, isto é, a vizinhança da fibra é

consideravelmente diferente da pasta do concreto. Isto ocorre pois forma-se uma película de água com menor concentração de partículas cimentícias em relação ao resto da matriz, formando uma zona de transição.

No concreto de ultra alto desempenho, a interface matriz-fibra é consideravelmente menor. Apesar disso, as propriedades ainda variam com relação à matriz, fazendo com que a zona de transição possa ser entre 30 e 50% mais fraca que a matriz (CASAGRANDE, 2017).

A transferência de tensões entre a fibra e a matriz ocorre por dois mecanismos fundamentais, elástico e por atrito. A compreensão destes mecanismos forma a base para determinação do comportamento dúctil ou frágil do compósito e de sua curva tensão-deformação. Em matrizes frágeis, os efeitos de transferência de tensão devem ser analisados nos estágios pré e pós-fissuração (BENTUR; MINDESS, 2007).

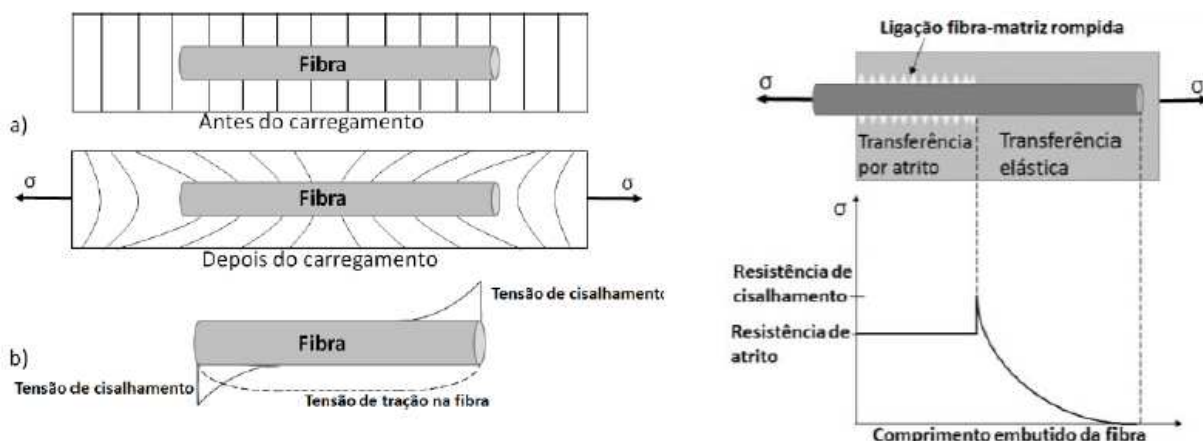
De acordo com Bentur e Mindess (2007), antes de qualquer fissuração, o mecanismo dominante é o elástico e os deslocamentos longitudinais entre fibra e matriz são compatíveis. Uma tensão de cisalhamento se desenvolve na interface, que é necessário para distribuir o carregamento externo entre a fibra e a matriz de modo que as deformações nos dois componentes sejam iguais. Assim, a transferência de tensões elástica é o principal mecanismo a ser considerado para determinação da tensão de formação da primeira fissura no compósito.

Considerando os estados mais avançados de carregamento, normalmente ocorre a perda da aderência na interface, e o mecanismo que controla a transferência de tensões se torna o atrito. A tensão de cisalhamento desenvolvida na interface é suposta como uniformemente distribuída por diversos modelos. Este processo é fundamental no estado pós fissuração, quando as fibras transferem as tensões através das fissuras. A transferência de tensões por atrito é responsável pela determinação da resistência e deformação última dos compósitos (BENTUR; MINDESS, 2007).

A transição do mecanismo elástico para o por atrito ocorre quando a tensão de cisalhamento na interface excede a resistência da interface matriz-fibra, chamado de resistência ao cisalhamento por adesão. Neste estágio, o escorregamento da fibra inicia-se e os dois mecanismos existem simultaneamente (BENTUR; MINDESS,

2007). A partir do descolamento da fibra, inicia-se o escorregamento e posteriormente o arrancamento (CASAGRANDE, 2017). Na Figura 4 é possível observar a combinação dos mecanismos de transferência de tensão descrita.

Figura 4 – Esquerda: comportamento da matriz e da fibra durante carregamento e Direita: distribuição de tensões elástica e por atrito



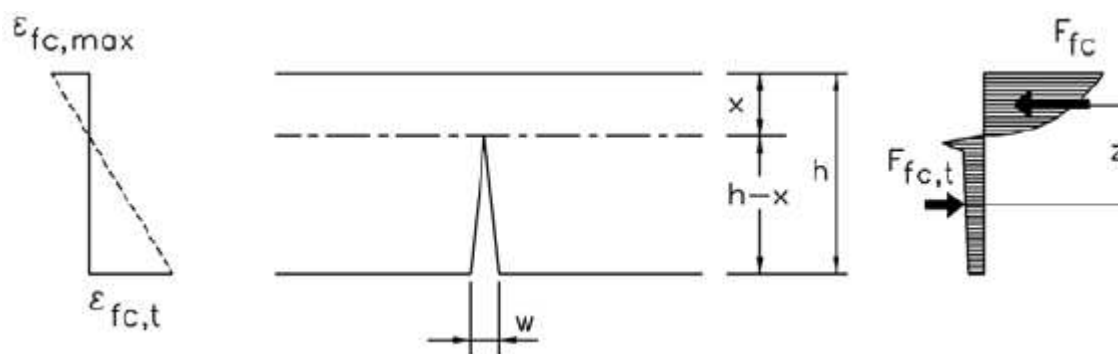
Fonte: Casagrande (2017)

3.4.2. Fatores que afetam o comportamento do compósito

3.4.2.1. Teor de fibras

Naturalmente, quanto maior a quantidade de fibras atuando como ponte de transferência de tensões em uma fissura, maior a capacidade de resistência pós fissuração do compósito. Levando em conta o modelo proposto pelo comitê RILEM ilustrado na Figura 5, nota-se que a resistência à tração de um compósito será a soma das tensões resistentes das fibras presentes na seção. Assim, o maior número de fibras permitirá uma maior capacidade de transferência de tensões.

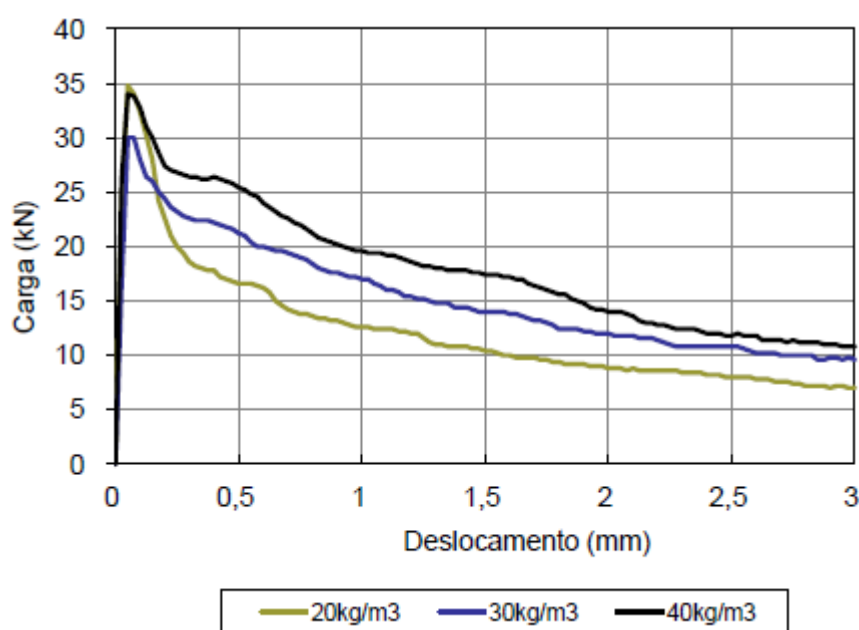
Figura 5 – modelo de distribuição de tensões em elemento reforçado por fibras



Fonte: RILEM-TC162-TDF (2003)

Segundo Figueiredo (2011), o teor de fibras pode ser apontado como o principal parâmetro definidor do comportamento dos compósitos. Este fato é observável na Figura 6, onde o comportamento pós pico de compósitos com diferentes teores de fibras é ilustrado, onde aqueles com maiores quantidades de fibra apresentam resistência residual superior (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 6 – curvas médias de carga por deslocamento obtidas em ensaio de tração na flexão para diferentes consumos de aço.



Fonte: Figueiredo (2011)

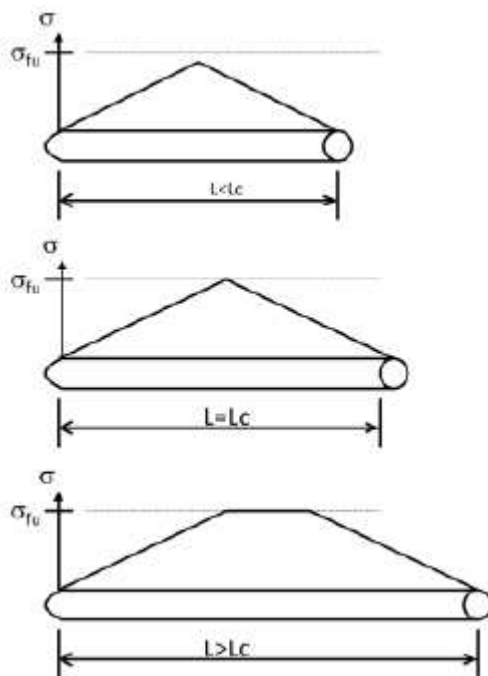
Outra definição importante é o volume crítico de fibras, que corresponde ao teor de fibras que mantém a capacidade resistente do compósito após atingir a resistência da matriz. Materiais com quantidades inferiores de fibras apresentam o comportamento de *strain-softening*, que é a perda de resistência pós fissuração, enquanto quantidades acima do volume crítico apresentam pseudo encruamento (*strain-hardening*), que é o ganho de resistência do compósito pós fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

3.4.2.2. Geometria das fibras

O desempenho pós fissuração do compósito também depende da geometria da fibra utilizada. Um parâmetro importante associado à eficiência das fibras é o comprimento crítico, que se baseia no modelo que a distribuição de tensões entre a matriz e a fibra desenvolve-se linearmente dos extremos até o centro da mesma. Assim, o

comprimento crítico será aquele em que a tensão no seu centro é igual à tensão de ruptura. Tal conceito é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – distribuição de tensões em função do comprimento crítico



Fonte: Figueiredo (2011)

Quanto a fibra tem comprimento menor que o crítico, o comprimento embutido não é suficiente para produzir uma tensão maior que a resistência da fibra. Assim, a fibra atuando como ponte de transferência de tensões será arrancada com o aumento da deformação da matriz. Assim, quanto maior o embutimento da fibra na matriz, maior sua capacidade resistente pós fissuração. Entretanto, a utilização de fibras com elevados comprimentos pode ser prejudicial para a mistura fresca, reduzindo sua fluidez. Além disso, fibras com comprimentos acima do crítico se rompem no momento do aparecimento da fissura, reduzindo a resistência residual e a ductilidade do compósito. Assim, o ideal é que as fibras tenham comprimentos abaixo do crítico, fazendo com que o mecanismo de arrancamento seja o que governe o reforço, assegurando a ductilidade e tenacidade do composto (FIGUEIREDO, 2011).

3.4.2.3. Resistência das fibras

Como as fissuras são responsáveis pela transferência de tensões dentro de uma fissura, sua resistência é o parâmetro principal para determinação da sua capacidade

de transferência de cargas. Assim, quanto maior a resistência da fibra, maior será a capacidade resistente residual do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Tal afirmação é verificada, por exemplo, por ensaios comparando-se o desempenho entre dois tipos de fibras. Figueiredo (1997) compara dois tipos distintos de fibras de aço e demonstra que a capacidade resistente pós fissuração, medida a partir do fator de tenacidade, foi superior para a fibra com maior resistência à tração.

3.4.2.4. Resistência da matriz

A resistência da matriz é uma propriedade diretamente relacionada às propriedades finais do compósito já que a transferência de tensões entre a matriz e as fibras, conforme citado, é relacionada diretamente às características da matriz e do material que envolve as fibras. Assim, uma interface fibra-matriz mais densa resulta numa resistência residual superior (CASAGRANDE, 2017). Além disso, quanto maior o módulo de elasticidade da matriz, tanto maior será o volume crítico de fibras que pode ser adicionado (FIGUEIREDO, 2011).

3.4.2.5. Fator de forma

O fator de forma é a relação entre o diâmetro e o comprimento da fibra. Assim, quanto maior o fator de forma, maior é o comprimento em relação ao diâmetro da fibra. De acordo com Bentur e Mindess (2007), é esperado que para maiores fatores de formas, melhor será o desempenho pós fissuração do material. Entretanto, existe um limite para o aumento do comprimento das fibras, uma vez que fibras muito longas tendem a reduzir demasiadamente a trabalhabilidade da mistura.

Yoo, Kang e Yoon (2014) avaliaram a utilização de fibras com diferentes comprimentos e mesmas propriedades mecânicas em matrizes de CUAD, encontrando que as fibras com maiores fatores de forma, maior é a resistência pós fissuração. As fibras estudadas pelos autores apresentavam comprimentos de 13, 16,6 e 19,5 mm, comumente utilizadas em matrizes de CUADRF, confirmando muitas das observações realizadas no concreto convencional em termos de como as diferentes fibras se comportam e influenciam as propriedades finais do CUADRF.

3.5. Propriedades do CUADRF

Conforme citado, o concreto de ultra desempenho, reforçado ou não com fibras, é um material com excepcionais propriedades mecânicas e de durabilidade. Além disso, na literatura é possível encontrar diversas composições diferentes utilizando materiais característicos de diversas regiões do planeta, todas alcançando as propriedades desejadas para este material. Assim, é necessário avaliar o CUAD em função de suas propriedades mecânicas para melhor compreensão, padronização e normatização do material.

Para a utilização de um determinado material em projetos de engenharia, é fundamental o conhecimento de suas propriedades e a existência de modelos que representem suas relações constitutivas, de modo que possam ser elaborados modelos analíticos ou numéricos que representem o material fielmente e de forma segura. Apesar de existirem muitas semelhanças com o concreto convencional, é necessário estudar especificamente o CUAD e CUADRF para entender seus modelos constitutivos. Além disso, existem diferenças importantes com relação aos métodos consagrados, que serão discutidas nas próximas seções.

3.5.1. Compressão

Conforme citado, o CUAD e CUADRF pode ser classificado a partir de sua resistência à compressão, normalmente acima de 150 MPa. Na engenharia estrutural moderna, este parâmetro é o principal método para verificação da aceitabilidade do concreto e estudo do comportamento estrutural (GRAYBEAL; DAVIS, 2008). Assim, é fundamental caracterizar propriamente e de modo confiável esta propriedade.

Atualmente, o principal método de ensaio de compressão é o rompimento de corpos de prova padronizados. Normas usualmente recomendam o uso de cilindros ou cubos de diferentes dimensões. Entretanto, existem dois principais problemas encontrados na aplicação de ensaios de compressão padronizados em concretos de resistências muito altas: a capacidade das máquinas de ensaio e a preparação das superfícies do cilindro (GRAYBEAL; DAVIS, 2008).

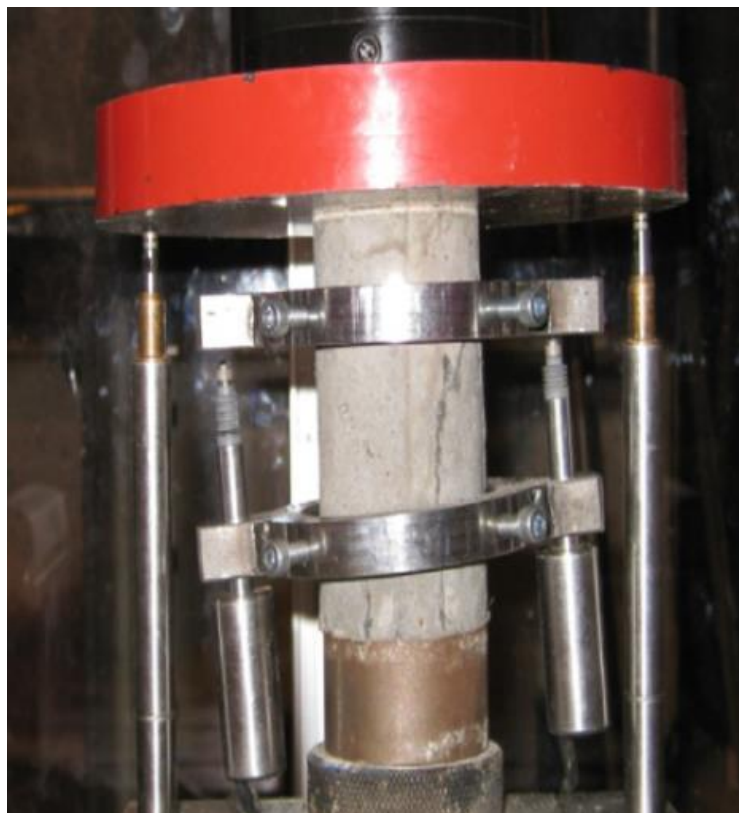
Na bibliografia existem diversos estudos ao longo de mais de 90 anos relacionando a resistência obtida em cubos e cilindros de diversos tamanhos (GONNERMAN, 1925; MANSUR; ISLAM, 2002; YI; YANG; CHOI, 2006). Para o concreto convencional, os

cubos costumam apresentar resistências de até 25% maiores que nos cilindros, sendo que esta diferença diminui à medida que a resistência aumenta (NEVILLE, 1987). Além disso, devido ao efeito do tamanho (*size effect*), espécimes menores tendem a apresentar resistências maiores. Deste modo, é esperado que corpos de prova cúbicos e de menores tamanhos apresentem resistências superiores aos corpos cilíndricos e maiores.

Em vista das dificuldades apresentadas, alguns autores avaliam a possibilidade de aplicação de corpos de prova de menores dimensões para evitar a necessidade de equipamentos de laboratórios avançados na determinação da resistência à compressão do CUAD e CUADRF (DEL VISO; CARMONA; RUIZ, 2008; GRAYBEAL; DAVIS, 2008; RIEDEL et al., 2018). Baseado nos resultados experimentais encontrados pelos autores, é possível concluir que a utilização de corpos de prova menores é aceitável para este material, sendo possível também correlacionar os resultados dos diversos espécimes (GRAYBEAL; DAVIS, 2008).

Outro parâmetro necessário no comportamento do CUAD e CUADRF em compressão é o módulo de elasticidade, comumente determinado em ensaios de compressão uniaxial. Do mesmo modo que a resistência, os elevados valores de módulo de elasticidade fazem com que os métodos tradicionais não apresentem resultados confiáveis, especialmente o comportamento pós pico. Apesar disso, com conhecimento destas dificuldades, é possível estudar esta propriedade com métodos simples (HASSAN; JONES; MAHMUD, 2012). Os autores sugerem a utilização de mais um conjunto de LVDTs para medição do comportamento pós fissuração do concreto, já que nos ensaios consagrados ocorre tendência de rotação dos instrumentos de medição devido às tensões de cisalhamento no corpo de prova. O método proposto é ilustrado na Figura 8, onde são observados a rotação dos LVDTs fixados no corpo de prova e o conjunto adicional de instrumentos de medição apoiado diretamente nas placas de aplicação de carga. Deste modo, é possível observar o comportamento pós fissuração do concreto.

Figura 8 – método modificado proposto por Hassan, Jones e Mahmud (2012)



Fonte: Hassan, Jones e Mahmud (2012)

3.5.2. Tração

O comportamento do CUADRF, assim como de outros materiais frágeis reforçados com fibras, pode ser analisado em dois estágios: uma relação tensão-deformação até atingir a resistência à tração máxima e o comportamento pós pico, dado pela relação entre a abertura da fissura e a tensão resistida pelo material. Conforme citado, em materiais reforçados com fibras, no primeiro estágio descrito o material ainda pode apresentar pseudo-encruamento (pseudo *strain hardening*) ou *strain softening*. Devido à esta complexidade do comportamento do CUADRF, é necessário desenvolver métodos confiáveis que representem as propriedades mecânicas deste material em análises estruturais.

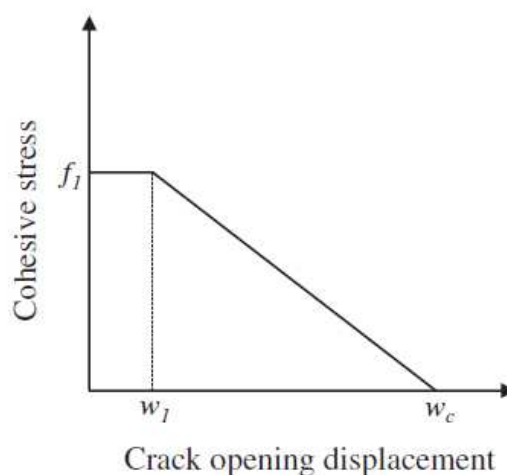
Existem três principais métodos de ensaio para obtenção das propriedades de materiais em tração: tração direta, compressão diametral ou ensaios de flexão. Os ensaios de tração direta apresentam bons resultados, entretanto sua preparação e execução requerem cuidados especiais, principalmente em termos de alinhamento do corpo de prova. Por outro lado, os ensaios de compressão diametral e flexão são de

mais fácil execução e amplamente realizados em materiais frágeis. Entretanto, para materiais pseudo-dúcteis como o CUADRF, o ensaio de compressão diametral tende a criar um complexo estado de tensões no corpo de prova, sendo difícil identificar precisamente o motivo da falha e calcular a tensão última (MALLAT; ALLICHE, 2011). Nos ensaios de flexão, os cálculos recomendados por normas são baseados na teoria de vigas e comportamento elástico-linear, o que tende a superestimar os valores de resistência à tração (HASSAN; JONES; MAHMUD, 2012). Deste modo, é recomendado que, para materiais reforçados com fibras, sejam realizados ensaios de tração direta, apesar das dificuldades citadas, já que este método permite a captura completa da curva de tensão-deformação do material.

O comportamento pós pico do CUADRF comumente é analisado por meio de ensaios de flexão em vigas ranhuradas. É possível obter o comportamento visco-coesivo do material por meio de análise inversa dos resultados carga e deslocamento de ensaios de flexão de três pontos em vigas ranhuradas (KANG et al., 2010; SANTOS; SOUSA, 2015; UCHIDA et al., 1995). A determinação do comportamento pós pico é fundamental para modelagem do CUADRF em análises estruturais com o aparecimento de fissuras.

A modelagem do comportamento pós fissuração do CUADRF é realizada com precisão utilizando modelos bi ou tri lineares (KANG et al., 2010; YOO; KANG; YOON, 2014; YOO; LEE; YOON, 2013). Tal abordagem permite a captura de um amolecimento inicial nas tensões, seguido por um patamar que representa a transferência de tensões das fibras e o amolecimento final devido ao arrancamento das fibras. Pode também ser considerado que a fase inicial de amolecimento pode ser desprezada em modelos de flexão, resultando em um diagrama bi linear, exemplificado na Figura 9.

Figura 9 – modelo bi linear de comportamento pós fissuração



Fonte: Yoo, Kang e Yoon (2014)

3.5.3. Modelos constitutivos

Considerando as relações constitutivas usadas em estudos numéricos ou analíticos, diversas recomendações técnicas apresentam modelos simplificados para cálculo (AFGC-SETRA, 2002; JSCE, 2004; KCI, 2012). Em termos gerais, as diversas normas apresentam modelos semelhantes, com relações bi ou tri lineares para representar o comportamento em tração e compressão.

Em compressão, estudos indicam que o aumento na tensão no CUADRF é quase linear-elástico até atingir a resistência máxima (HABEL, 2004). As recomendações AFGC-SETRA sugerem a aplicação de um comportamento bi linear conforme Figura 10, com os parâmetros dados pelas equações 1 e 2.

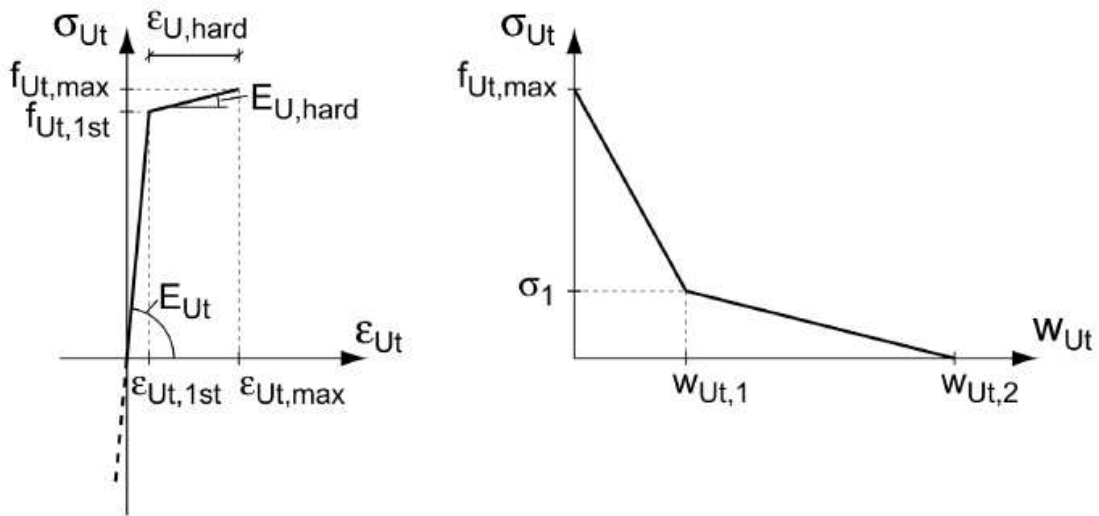
$$\sigma_{bcu} = \frac{0,85f_{ck}}{\theta\gamma_b} \quad (1)$$

$$\varepsilon_u = 0.003 \quad (2)$$

Em tração, é necessário modelar o material em duas etapas. Na primeira, o comportamento é bi linear representando a curva de tensão-deformação $\sigma \times \varepsilon$ até a deformação máxima $\varepsilon_{Ut,max}$. A partir daí, o material é modelado considerando uma fissura fictícia com abertura w conforme a Figura 10. A curva $\sigma - w$ é usualmente derivada por uma análise inversa. Podem ser utilizados diversos modelos para esta

curva, e usualmente é considerado um amolecimento bi linear para estudos analíticos. Posteriormente, a abertura da fissura w pode ser transformada em deformação considerando o comprimento de referência l_c , onde autores recomendam a utilização de $l_c = \frac{2}{3}h$, onde h é a altura da viga (HABEL, 2004), e considerado na própria curva $\sigma \times \varepsilon$, observado na Figura 10.

Figura 10 – comportamento em tração antes e depois da macro fissuração



Fonte: Habel, 2004

De acordo com AFGC-SETRA, podem ser utilizadas as equações (3) para determinação dos parâmetros.

$$\varepsilon_e = \frac{f_{tj}}{E_c} ; \quad \varepsilon_{0.3} = \frac{w_{0.3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} ; \quad \varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} ; \quad \varepsilon_{lim} = \frac{L_f}{4l_c} \quad (3)$$

Onde: ε_e é a deformação elástica;

$w_{0.3}$ é a abertura de fissura de 0.3mm;

$w_{1\%}$ é a abertura de fissura correspondente a 1% da altura da viga;

$\varepsilon_{0.3}$ é a deformação correspondente a $w_{0.3}$;

$\varepsilon_{1\%}$ é a deformação correspondente a $w_{1\%}$;

ε_{lim} é a deformação limite em tração;

L_f é o comprimento da fibra.

As tensões em dois pontos característicos da curva são dadas por:

$$f_{bt} = \frac{f(w_{0.3})}{K\gamma_{bf}} ; \quad f_{1\%} = \frac{f(w_{1\%})}{K\gamma_{bf}}$$

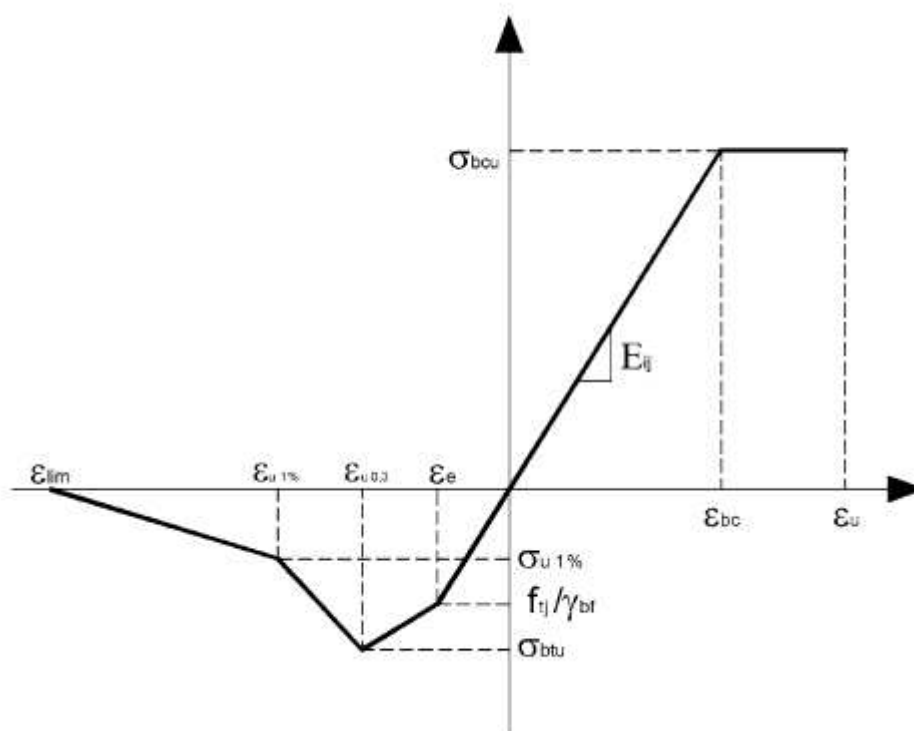
Onde: K é o coeficiente para considerar a orientação das fibras;

f_{bt} é a tensão para uma abertura de fissura de 0.3mm;

$f_{1\%}$ é a tensão para uma abertura de fissura correspondente a 1% da altura da viga;

O comportamento do material com o pseudo-encruamento pode ser observado na Figura 11.

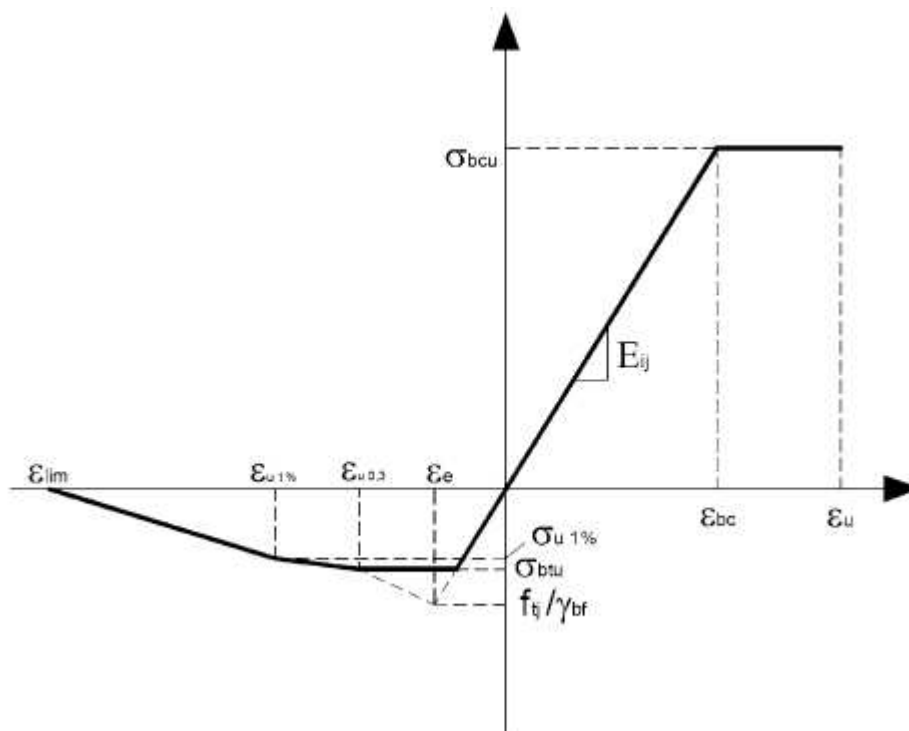
Figura 11 – modelo AFGC-SETRA com pseudo-encruamento em tração



Fonte: AFGC-SETRA (2002)

O comportamento do material sem o pseudo-encruamento pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – modelo AFGC-SETRA sem pseudo-encruamento em tração



Fonte: AFGC-SETRA (2002)

3.5.4. Durabilidade

Conforme citado, algumas das principais vantagens da aplicação do CUADRF é sua elevada durabilidade e alguns códigos e autores adotam tais características como forma de classificação deste material. A gama de aplicações deste material é extremamente ampla considerando-se o aprimoramento da vida útil e da proteção contra agentes externos ou ambientes agressivos.

Em função da alta densidade da matriz, o CUAD e o CUADRF apresentam baixíssima porosidade e permeabilidade, o que pode ser verificado por meio de uma série de ensaios. Os principais métodos para testar a durabilidade de elementos de concreto são ensaios de penetração de íons de cloreto, resistência à ciclos de gelo e degelo, resistência a abrasão, permeabilidade à gases, susceptibilidade a reações álcali-sílica, entre outros. A durabilidade de diversos tipos de CUAD e CUADRF já foi testada extensivamente, obtendo resultados semelhantes (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016; GRAYBEAL; TANESI, 2007; PIÉRARD; DOOMS; CAUBERG, 2012; ROUX; ANDRADE; SANJUAN, 1996; TOLEDO FILHO et al., 2012; WANG et al., 2014).

Graybeal e Tanesi (2007) demonstraram por meio de ensaios que para diversos métodos de cura e preparação dos corpos de prova que a penetrabilidade de íons cloreto é desprezível e que a penetração de cloretos após 90 dias de submersão da amostra em uma solução é extremamente baixa, resultados semelhantes aos encontrados por Piérard, Doms e Cauberg (2012). Além disso, os resultados em ensaios de abrasão e descamação do concreto indicam excelente desempenho do material.

Ensaio de permeabilidade à gases realizados por Wang et al (2014) indicam baixíssima permeabilidade do CUADRF, não sendo observada passagem de gases pelas amostras, também observado nos resultados obtidos por Toledo Filho et al (2012). A penetração de água no CUAD foi testada por Roux, Andrade e Sanjuan (1996) e Toledo Filho et al (2012), encontrando níveis baixíssimos de penetração de água após semanas de ensaios, com resultados indicando porosidade desprezível.

A resistência a ciclos de gelo e degelo, fundamental na aplicação em rodovias em países com clima temperado, também foi avaliada por Graybeal e Tanesi (2007) e Piérard, Doms e Cauberg (2012), sendo encontrados baixíssimas quantidades perdidas de material após centenas de ciclos.

Também é possível avaliar taxa de corrosão de armaduras em peças de concreto por meio de ensaios, e Roux, Andrade e Sanjuan (1996) determinaram que a corrosão de barras de aço em peças de CUADRF é centenas de vezes inferior a concretos convencionais e muito abaixo do limite recomendado. Foram encontrados valores de $0,1 \mu\text{m}/\text{ano}$, muito abaixo da recomendação de $1 \mu\text{m}/\text{ano}$, indicando risco de corrosão praticamente nulo.

Assim, é possível afirmar que as propriedades do CUAD e CUADRF garantem elevada durabilidade das estruturas, podendo aumentar sua vida útil significativamente. Além disso, é possível aplicar este material com espessuras inferiores às aquelas de concretos convencionais e ainda assim garantir a durabilidade e proteção das armaduras, reduzindo a espessura de elementos de concreto armado e também de intervenções de manutenção em estruturas.

3.6. Desenvolvimento do traço

Conforme mencionado, diversos fatores afetam a resistência final do concreto, dentre eles a composição e quantidade de cimento, qualidade dos agregados e adições minerais. Além disso, para obtenção de uma resistência ótima, é necessário reduzir os vazios no concreto endurecido. Levando-se em consideração este último fator, é necessário utilizar algum método que permita que a mistura de todos os componentes do concreto preencha os vazios entre si de modo ótimo, o que é alcançado a partir do empacotamento ótimo das partículas.

3.6.1. Empacotamento de partículas sólidas

O estudo do empacotamento de partículas é essencial para entender o comportamento de partículas granulares utilizadas em diversas indústrias, como cerâmicas, indústrias químicas ou materiais de construção. O entendimento das propriedades de empacotamento de materiais granulares permite a otimização e controle das propriedades mecânicas e comportamento de tais materiais.

Segundo Hüsken (2010), as diferenças entre as partículas, como forma, textura e tamanho podem fazer com que o estudo do empacotamento seja aplicado de modo diferenciado entre diferentes sistemas. Entretanto, de acordo com Funk e Dinger (1994), os estudos podem ser divididos em duas partes: o estudo de empacotamento de partículas monodispersas e polidispersas. No primeiro, são consideradas partículas com o mesmo tamanho, seja considerando um empacotamento regular (ideal) ou irregular (aleatório). Já os sistemas polidispersos consideram partículas de diferentes tamanhos, o que torna o empacotamento mais complexo. Além disso, em sistemas polidispersos, podem ser consideradas partículas distribuídas discretamente ou continuamente.

Particularmente, no estudo do concreto é de relevância o estudo de sistemas polidispersos com distribuição contínua. O objetivo de encontrar o empacotamento ótimo das partículas é produzir uma mistura com a máxima densidade possível a partir dos ingredientes do concreto, incluindo os agregados e aglomerantes.

Em um dos primeiros trabalhos que consideram a distribuição contínua dos tamanhos das partículas, suposição fundamental para o estudo do concreto, Fuller e Thompson (1907) demonstraram que o empacotamento dos agregados influencia as

propriedades do concreto, conclusão semelhante daquela de Féret (1892). Além disso, os autores concluíram que uma graduação geométrica adequada da mistura do concreto pode melhorar as propriedades finais do material. Semelhantemente, Féret (1892) demonstra que a máxima resistência de um concreto é atingida quando os vazios da estrutura são mínimos.

Além de Fuller e Thompson (1907), Furnas (1931) e Andreasen e Andersen (1930) também elaboraram modelos baseados em partículas distribuídas continuamente. Furnas (1931) avaliou as distribuições contínuas a partir da extensão de estudos de modelos multimodais discretos, considerando a variação dos tamanhos próximos da unidade e o número de frações tendendo ao infinito. Já Andreasen e Andersen (1930) basearam seu trabalho em condições de similaridade a partir de imagens dos grãos. A partir de considerações geométricas, foi determinado que o arranjo das partículas pode ser descrito a partir dos produtos do tamanho das frações destas. Assim, as frações aumentam de acordo com seu tamanho em uma progressão geométrica. Segundo Hüsken (2010), mesmo tendo abordagem completamente diferentes, os trabalhos de Furnas (1931) e Andreasen e Andersen (1930) apresentam boa concordância. As equações para a distribuição cumulativa das partículas são dadas dos autores são dadas por (4) e (5), respectivamente :

$$P(D) = \frac{s^{\log D} - s^{\log D_{sma}}}{s^{\log D_{tar}} - s^{\log D_{sma}}} \quad (4)$$

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (5)$$

No caso do modelo proposto por Andreasen e Andersen, o diâmetro das menores partículas não são consideradas. Assim, Funk e Dinger (1994) propuseram um modelo modificado baseado neste modelo, considerando um diâmetro mínimo das partículas. A equação do modelo é dada por (6).

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (6)$$

O método modificado de Andreasen e Andersen proposto por Funk e Dinger (1994) já foi amplamente utilizado para otimizar a distribuições granulométricas de diferentes tipos de concretos, como o concreto ecológico (HÜSKEN; BROUWERS, 2008; HÜSKEN, 2010), concreto auto adensável (BROUWERS; RADIX, 2005), concreto

compactado com rolo (KHAYAT; LIBRE, 2014) e concretos com agregados leves (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2013). Assim, observa-se a eficácia do método para os mais diferentes tipos de compósitos.

De acordo com Yu, Spiesz e Brouwers (2014), o chamado modelo de empacotamento modificado de Andreasen e Andersen já foi utilizado com sucesso para otimização de algoritmos para elaboração de diferentes concretos com agregados variados. Os autores citam que diferentes tipos de concreto podem ser projetados alterando-se um diferente valor para o módulo de distribuição q na equação (6). Para maiores valores do módulo ($q > 0,5$), a equação favorece partículas maiores, enquanto valores menores ($q < 0,25$) tendem a gerar traços com maiores quantidades de finos.

Brouwers (2006) demonstra teoricamente que valores do módulo de distribuição entre 0 e 0,28 resultariam em um empacotamento ótimo. Hunger (2010) recomenda o uso do módulo entre 0,22 e 0,25 para concretos auto adensáveis. Yu, Spiesz e Brouwers (2014) utilizam o valor de 0,23 para elaborar um traço de concreto de ultra alto desempenho.

3.6.2. Algoritmo para otimização de traço utilizando o método modificado de Andreasen e Andersen

A otimização de um sistema de variáveis para determinação de um traço que atenda a um empacotamento ótimo pode ser realizada a partir da minimização ou maximização de uma função alvo. É possível desenvolver uma série de algoritmos para resolução de tal problema, desde que estes atendam a três critérios: a função alvo, variáveis do problema e restrições.

A função alvo pode ser dada por uma solução matemática obtida para um empacotamento ótimo, como por exemplo a função encontrada pelo método modificado de Andreasen e Andersen, dada pela equação (6).

As variáveis são valores que serão ajustadas pelo algoritmo de modo a maximizar ou minimizar uma solução. Neste caso, os valores considerados são as proporções volumétricas entre os diferentes componentes do concreto.

Além disso, quando se trata de concreto, é necessário considerar algumas restrições. Como o método considera apenas a granulometria dos materiais, outros parâmetros

devem ser considerados para refletir limitações práticas, condições de contorno ou mesmo restrições físicas do problema. Exemplos destas restrições físicas são a condição de não negatividade, onde os componentes não podem ter volume negativo e a restrição de volume, onde a soma de todas as proporções volumétricas dos materiais devem obrigatoriamente resultar na unidade.

Outras restrições podem ser decorrentes de limitações práticas do concreto, como a relação água/cimento, que, como citado, é fundamental na resistência do material resultante, assim como a relação de água e materiais granulares, que afeta a trabalhabilidade do concreto fresco.

Um exemplo de algoritmo para otimização do traço é a minimização do desvio entre a distribuição granulométrica da mistura dos materiais, isto é, do cimento, adições minerais e agregados em uma dada proporção, e a distribuição alvo obtida pelo método modificado de Andreasen e Andersen. Assim, o problema resume-se a um problema de ajuste de curva, comumente resolvido pelo método dos mínimos quadrados. Tal método é descrito pela equação (7).

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (P_{mix}(D_i) - P_{tar}(D_i))^2 \quad (7)$$

Além disso, a qualidade do ajuste da curva pode ser analisado pelo coeficiente R^2 , que dá um valor para a correlação entre as curvas, dado pela equação (8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{mix}(D_i) - P_{tar}(D_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_{mix}(D_i) - \overline{P_{mix}})^2} \quad (8)$$

Para determinação da curva $P_{mix}(D_i)$, é necessário computar a contribuição de cada um dos componentes sólidos na curva final da mistura. De acordo com Hüsken (2010), cada componente sólido influencia a curva final de acordo com a equação (9).

$$Q_{mix}(D_i) = \frac{\sum_{k=1}^{m-2} \frac{v_{sol,k}}{\rho_{sol,k}} Q_{sol,k}(D_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m-2} \frac{v_{sol,k}}{\rho_{sol,k}} Q_{sol,k}(D_i)} \quad (9)$$

Sendo $Q_{sol,k}(D_i)$ a massa retida do material k na peneira i e ρ_{sol} a densidade específica do material k . Assim, é possível criar a curva $P_{mix}(D_i)$ através da equação (10).

$$P_{mix}(D_i) = P_{mix}(D_{i-1}) - Q_{mix}(D_i) \quad (10)$$

3.7. Reforços de estruturas

Estruturas de concreto armado apresentam ótimo desempenho e custo benefício quando se trata de desempenho e comportamento estrutural. Entretanto, quando submetido a condições ambientais severas ou carregamentos elevados, a durabilidade dos elementos estruturais pode ser comprometida. A recuperação de elementos estruturais danificados ou deteriorados ou ainda o reforço para adequação a cargas mais elevadas estão associados a um custo social elevado. Intervenções em estruturas comumente levam a interrupções em serviços essenciais e custos elevados ao usuário. Assim, do ponto de vista da sustentabilidade, as estruturas de concreto devem atender ao usuário com segurança e economia, além de manter as intervenções de manutenção em um nível mínimo durante sua vida útil.

A recuperação ou reforço podem ser necessários por diversos motivos, como estruturas danificadas devido a carregamentos superiores aos de projeto, corrosão da armadura, elementos com fissuração acima do aceitável, aumento da vida útil das estruturas em geral, adequação da resistência de elementos devido a aumento de cargas de projeto, reforço de elementos subdimensionados ou com erro de execução, reforço para melhora do desempenho especialmente no estado limite de serviço, entre outros.

Neste ponto é importante realizar a diferenciação entre recuperação e reforço de uma estrutura. Segundo Júlio, Branco e Silva (2003), a recuperação de um elemento está associada a recuperação da capacidade resistente e rigidez de um elemento danificado ou deteriorado a seu nível original. Já o reforço pode ser entendido como uma intervenção para aumentar a capacidade resistente do elemento original. No caso de um elemento danificado, para realização do reforço deve ser obrigatoriamente realizada a recuperação anteriormente.

Diversos métodos de reforço e reabilitação para estruturas de concreto armado já foram propostos na literatura, entre eles o uso de argamassa de cimento para preenchimento e cobertura, cobertura com laminados de ferrocimento (PARAMASIVAM; LIM; ONG, 1998), colagem de placas de aço externamente (BARNES; MAYS, 2006; ROBERTS; HAJI-KAZEMI, 1989), uso de polímeros reforçados com fibras (HADDAD; AL-MEKHLAFY; ASHTEYAT, 2011; SOUDKI; ALKHRDAJI, 2005), reforço com aumento da seção utilizando concreto convencional (TSIOULOU; LAMPROPOULOS; DRITSOS, 2013; YUAN; LI; CAI, 2003), e mais recentemente o uso de concretos de alto e ultra alto desempenho, especialmente reforçado com fibras (BRÜHWILER; DENARIÉ, 2008; HABEL; DENARIÉ; BRÜHWILER, 2007; KARIHALOO; BENSON; ALAEE, 2003; LAMPROPOULOS et al., 2016; TAYEH et al., 2013) com atenção especial para materiais com comportamento de pseudo-encruamento (KAMAL et al., 2008; KHALIL et al., 2015; LI et al., 2000), entre outros.

Todos os métodos desenvolvidos e atualmente aplicados apresentam diversas vantagens e desvantagens. Em alguns, há a necessidade de grande aumento da seção transversal ou problemas de escorregamento ou descolamento das camadas de reforço. Em outros casos, podem ocorrer problemas com resistência ao fogo. Além disso, alguns métodos não satisfazem requisitos mínimos do estado limite de serviço. Neste contexto, o uso de concretos reforçados com fibras apresentando o comportamento de pseudo-encruamento, especialmente os concretos de ultra alto desempenho (CUADRF e ECC), pode apresentar resultados excelentes, atendendo a critérios de durabilidade, estados limites último e de serviço.

Considerando o caso da utilização do concreto como material de recuperação de estruturas, algumas considerações devem ser feitas. No caso do concreto convencional, que é amplamente utilizado neste tipo de recuperação, o concreto danificado é substituído ou uma camada adicional é colocada sobre o substrato. Entretanto, este tipo de recuperação apresenta diversos problemas de desempenho. Falhas comumente ocorrem na camada de reforço, seja pelas tensões induzidas pela diferença de volumes entre o substrato e o reforço, seja pelo escorregamento por falta de aderência (MARTINOLA et al., 2010).

A interface entre o substrato e o material de reforço é de fundamental importância no projeto de reforço de estruturas. Uma boa aderência entre os materiais é essencial para que a estrutura tenha um comportamento monolítico e a preparação da interface tem papel fundamental para garantir esta condição. A delaminação é um dos principais modos de falha no estado limite último e grande parte das investigações do comportamento de fratura baseia-se no estudo da delaminação da camada de reforço (HABEL, 2004).

Outro motivo importante para a ocorrência de patologias nos reforços é a retração do material de reforço. Quando um material sofre retração enquanto tem contato com o substrato, que apresenta restrição de deformações pela interface, ocorrerá o aparecimento de tensões de tração no material e tensões normais e de cisalhamento na interface, provocando a fissuração e/ou delaminação. De acordo com Zhou et al. (2008), vários fatores afetam a severidade das tensões e deformações do reforço. Grandes valores de retração levam a maiores tensões e, portanto, maiores riscos de fissuração e delaminação. Já o módulo de elasticidade também influencia o desempenho do reforço, sendo que maiores módulos tendem a prover mais resistência à fissuração, mas induzem a maiores tensões na interface.

Diversos modelos já foram estudados para compreender o comportamento de materiais compósitos devido à retração. A princípio, era suposto que a hipótese de Bernoulli, onde é suposto que as seções planas permanecem planas, era válida. Foram desenvolvidos modelos com esta consideração para prever os efeitos da retração em compósitos (YUAN; MAROSSZEKY, 1994; YUAN; LI; CAI, 2003). Entretanto, Beushausen e Alexander (2007) discutem com base em resultados experimentais que tais hipóteses não representam bem o fenômeno.

Zhou et al. (2008) então propõe um método analítico baseado na teoria de placas para modelar o fenômeno da retração em compósitos. Os autores concluem baseados no método analítico com validação numérica que a rigidez ao cisalhamento da interface aumenta as tensões no reforço, mas reduzem o escorregamento. Além disso, quanto maior o comprimento longitudinal do reforço, maiores as tensões no material e na interface, até atingir um limite, chamado de comprimento crítico. Outra conclusão importante é que a espessura do reforço influencia o modo de falha, sendo que reforços com maior espessura tendem a falhar por delaminação, enquanto menores

espessuras tendem a apresentar maiores tensões de tração e fissuração (HABEL, 2004; ZHOU et al., 2008).

Outro problema decorrente da utilização do concreto convencional como método de reforço é a necessidade do aumento da seção transversal do elemento. Este trabalho está necessariamente associado à execução de formas e muitas vezes o uso de armaduras complementares, que demandam por sua vez um cobrimento. Uma alternativa ao uso das jaquetas de concreto convencional é a utilização de jaquetas ultrafinas, especialmente utilizando concretos auto adensáveis e concretos reforçados com fibras. Embora não obtenham resultados tão significativos quanto o uso de jaquetas com armaduras, o aumento da seção transversal é mínimo (CHALIORIS; THERMOU; PANTAZOPOULOU, 2014).

Em vista do tipo de intervenção a ser realizada (recuperação ou reforço), podem ser avaliados diversos parâmetros para determinação da eficiência do método. Em geral, são avaliados a relação entre a capacidade resistente dos elementos antes e depois da intervenção, assim como a mudança na rigidez do elemento e sua ductilidade. No caso de elementos danificados que necessitam de recuperação, a melhoria no desempenho é avaliada pela alteração do modo de ruptura e do coeficiente de eficiência monolítica, obtido a partir da relação entre a resistência do elemento recuperado e os valores correspondentes do elemento monolítico com geometria idêntica (CHALIORIS; THERMOU; PANTAZOPOULOU, 2014; LAMPROPOULOS; TSIOULOU; DRITSOS, 2012). Já para elementos reforçados com vista a aumento da resistência, devem ser observados os incrementos da resistência última, o desempenho em estado limite de serviço, a ductilidade e o modo de ruptura.

Para elementos reforçados, estudos indicam que as intervenções com adição de armadura e concreto convencional apresentam bom desempenho desde que tomadas as devidas precauções em termos de conectores de cisalhamento e preparação da interface. O ganho de resistência da viga reforçada é fortemente dependente da quantidade de aço do reforço e os parâmetros de durabilidade são influenciados pela qualidade da adesão na interface (SHEHATA et al., 2009).

O uso de reforços de concreto reforçado com fibras se mostra como uma alternativa ao uso de camadas de reforço utilizando concreto armado. Tal método pode dispensar o uso de armaduras complementares ou utilizar apenas malhas de aço, reduzindo a

espessura necessária para o reforço. Estudos indicam que a aplicação do concreto reforçado com fibras pode aumentar significativamente a capacidade resistente do elemento reforçado, além de prover um ganho de rigidez considerável (MARTINOLA et al., 2010; MEDA; MOSTOSI; RIVA, 2014). O uso de concreto reforçado com fibras apresentando o pseudo-encruamento pode aumentar a ductilidade dos elementos compósitos, contribuindo positivamente em condições dinâmicas (ISKHAKOV et al., 2013).

3.7.1. Uso do CUAD e CUADRF como reforço de estruturas

Segundo Brühwiler, Denarié e Habel (2005), uma das principais vantagens do uso do CUAD ou CUADRF para recuperação de estruturas é a facilidade de lançamento em campo. Além disso, Tayeh et al. (2013) as excepcionais propriedades mecânicas aliadas à baixíssima permeabilidade e boa durabilidade tornam o material atrativo para reforço de regiões sujeitas à condições ambientais severas ou repetidos e elevados carregamentos mecânicos.

Outros métodos de reforço, como por exemplo o uso de concretos convencionais reforçados com fibras, apresentam bons resultados em termos de resistência e desempenho estrutural, mas a matriz mais porosa característica de tais materiais não impede a infiltração de agentes corrosivos, fazendo com que o reforço não apresente durabilidade de longo prazo (HABEL; DENARIÉ; BRÜHWILER, 2007). A baixíssima porosidade e permeabilidade da matriz do CUADRF apresenta-se como solução para melhoria da durabilidade das estruturas.

Em vista das limitações e desvantagens citadas para métodos de reforço utilizando concreto convencional, é possível citar propriedades do concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras que permitem que este material supere as limitações dos métodos tradicionais (TAYEH et al., 2013). Quando se trata de reforço estrutural, a diferença entre as propriedades do reforço e do substrato pode gerar patologias. No caso, o CUADRF geralmente apresenta módulos de elasticidade da ordem de 60% maiores que aqueles do substrato, o que irá induzir grandes tensões no material. Entretanto, este fato é compensado pelo aumento da resistência à tração da matriz do CUADRF, que é da ordem de 5 vezes maior que do concreto convencional (SAMARIS, 2005). Além disso, o CUADRF apresenta significativo pseudo-encruamento, com deformações últimas muitas vezes maiores que a

deformação elástica máxima. Finalmente, de acordo com Habel (2004), o CUADRF apresenta visco-elasticidade significativa em idades baixas, o que reduz o aparecimento de patologias no reforço neste período. Além disso, a retração do CUADRF é menor que em concretos convencionais, e as tensões induzidas pela retração são reduzidas (KAMEN et al., 2009).

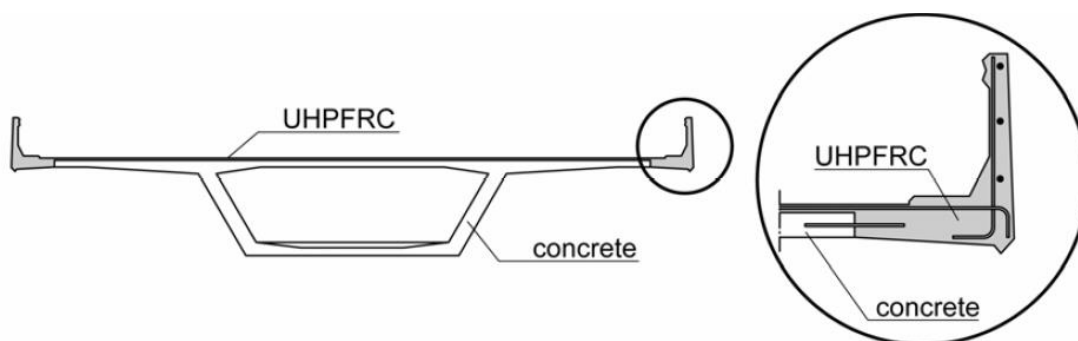
Conforme citado, a interface tem papel fundamental no estudo de reforço de vigas de concreto armado. Por este motivo, diversos autores avaliam a aderência entre concretos convencionais e o CUAD em ensaios de cisalhamento inclinado ou compressão diametral. Tais ensaios são usualmente realizados considerando-se diversos tipos de preparação do substrato, como jateamento de areia ou com água sob alta pressão, ranhuras ou descascamento mecânico. Os resultados indicam ótimo desempenho do material, atendendo desempenhos de aderência recomendados na literatura (CARBONELL MUÑOZ et al., 2014; GANESH; RAMACHANDRA MURTHY, 2020; HARRIS; SARKAR; AHLBORN, 2011; LEE; WANG; CHIU, 2007; TAYEH et al., 2012). Além disso, mesmo quando submetidos a ciclos de gelo-degelo, a interface entre o CUAD e concreto apresenta bom desempenho, indicando além da boa resistência mecânica uma ótima durabilidade (CARBONELL MUÑOZ et al., 2014; LEE; WANG; CHIU, 2007). Além da resistência mecânica da interface, a permeabilidade de compósitos foi avaliada por autores, indicando alta resistência contra penetração de cloretos, ar e água na interface, concluindo que a boa aderência impede a penetração de substâncias no substrato (TAYEH et al., 2012). Finalmente, é possível concluir que dentre os modos de preparo do substrato, o melhor desempenho foi encontrado para preparação com jateamento de areia, mas bons resultados também são obtidos em outros métodos que tornam o substrato áspero, como ranhuras (CARBONELL MUÑOZ et al., 2014; HARRIS; SARKAR; AHLBORN, 2011; TAYEH et al., 2012).

Além disso, Ganesh e Ramachandra Murthy (2020) avaliam por meio de diversos ensaios a interface entre o concreto convencional e o CUAD. Os autores também elaboraram um modelo numérico para prever a capacidade última de espécimes compósitos a partir de estudos da microestrutura da interface, encontrando boa concordância com os resultados experimentais. Neste modelo são considerados como determinantes para a modelagem o nível de dano do concreto do substrato, a relação entre tensão e abertura da fissura ($\sigma x w$) dos concretos, o modelo de falha da interface

e a energia de fratura dos concretos. Por fim, os autores concluem que uma configuração com ranhuras no substrato permite o melhor desempenho do reforço já que neste caso é observada uma superfície bem estruturada e uniforme na interface.

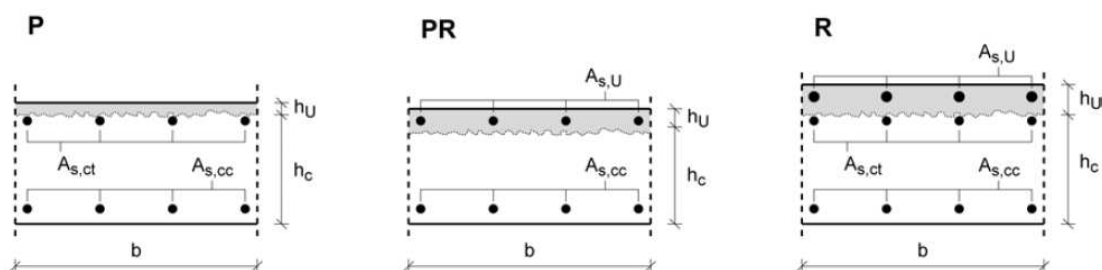
Como a elaboração e uso do concreto de ultra alto desempenho ainda não são amplamente difundidos, o material ainda apresenta custo considerável e sua execução ainda exige cuidados especiais. Assim, Brühwiler, Denarié e Habel (2005) propõe o uso deste material especial em regiões onde suas propriedades mais se adaptam, de modo a otimizar seu uso. Os autores elencam usos para reabilitação de pontes. Na Figura 13, observa-se o uso do CUAD em elementos sujeitos a condições ambientais extremas, além de problemas com sais de degelo, comumente usados em países com clima temperado. Na Figura 14, observa-se o reforço de seções típicas de lajes ou vigas, com fins de proteção (R) ou reforço com ou sem armadura adicional (PR e R, respectivamente).

Figura 13 – reforço de elementos mais críticos em pontes



Fonte: Brühwiler, Denarié e Habel (2005)

Figura 14 – reforço de lajes e vigas com CUAD

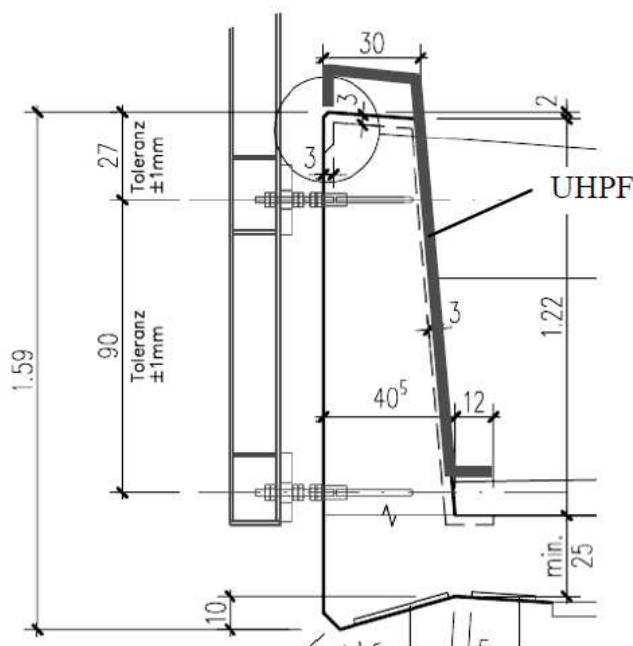


Fonte: Brühwiler, Denarié e Habel (2005)

Outro tipo de aplicação do CUADRF é a proteção de elementos sujeitos a condições climáticas severas, sem função estrutural. Neste caso, a principal preocupação com o

material é o aparecimento de fissuras transversais devido à retração e variações de temperatura. Oesterlee, Denarié e Brühwiler (2007) descrevem a aplicação de uma camada de CUADRF na barreira de proteção de uma ponte, observada na Figura 15, avaliando o desempenho do material com ensaios de permeabilidade e de controle do material. Além disso, um estudo numérico comprovou a eficiência do material de reforço, também verificada em campo.

Figura 15 – barreira de proteção protegida com camada de CUADRF



Fonte: Oesterlee, Denarié e Brühwiler (2007)

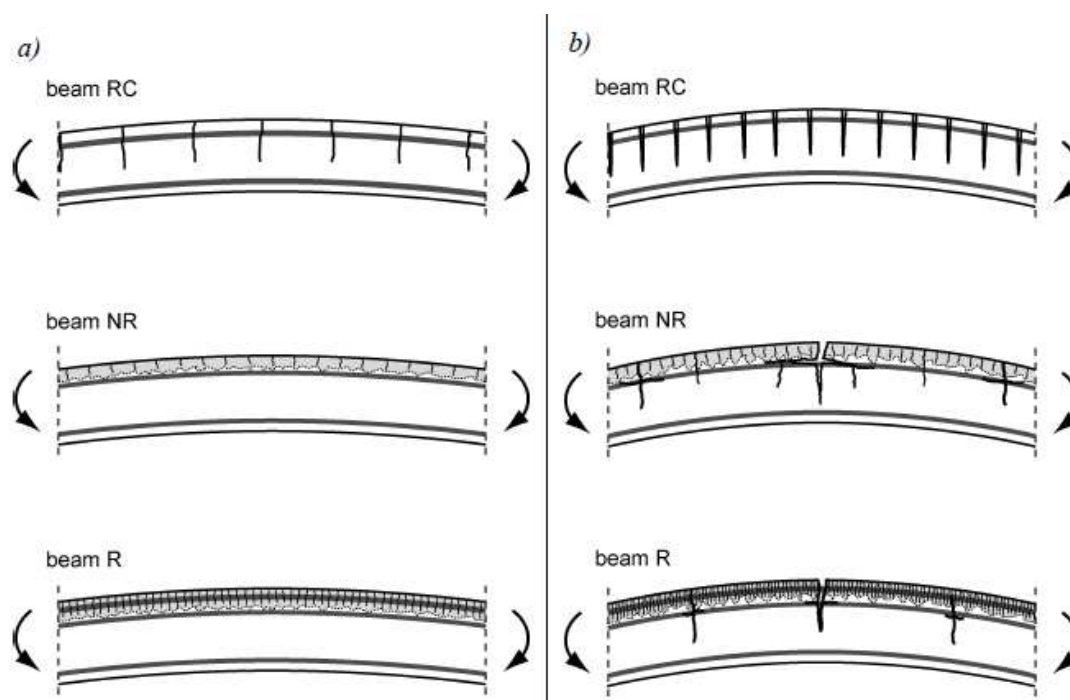
O reforço de vigas utilizando CUADRF apresenta resultados promissores. Um estudo realizado por Karihaloo, Benson e Alaei (2003) demonstrou que a colagem de placas de CUADRF em vigas danificadas é um método promissor para melhorar o comportamento em flexão e cisalhamento, assim como os estados limites de serviço, das vigas. Além disso, foi observado que o reforço não apresenta os efeitos negativos de outros métodos que resultam da diferença de propriedades entre o substrato e o reforço. Os autores também citam que os estudos analíticos preveem corretamente a resistência e deslocamentos da viga, desde que as propriedades do material sejam corretamente consideradas (KARIHALOO; BENSON; ALAEI, 2003).

A aplicação do reforço com CUADRF na região tracionada para formação de materiais compósitos pode melhorar o desempenho de vigas tanto no estado limite último

quanto de serviço. Estudos experimentais Habel, Denarié e Brühwiler (2007) e Habel (2004) indicam que a aplicação de uma camada do material aumenta a rigidez em condições de serviço, minimiza deformações e reduz a fissuração da peça, fazendo com que o aparecimento de macro fissuras ocorra mais tardiamente. Quando o reforço com CUADRF é realizado com adição de armadura, a rigidez e a capacidade de carga são aumentadas significativamente, a fissuração ocorre de modo ainda mais distribuído e controlado e a delaminação do material de reforço é impedida. Além disso, em ambos os casos é observado o comportamento monolítico da estrutura (HABEL, 2004; HABEL; DENARIÉ; BRÜHWILER, 2007).

Entre as principais vantagens do uso de materiais com pseudo-encruamento (como é o caso do CUADRF) como reforço é a capacidade de distribuição da fissuração e fissuração múltipla, que impede a penetração de agentes nocivos, como água ou cloretos. É observado que quando são utilizados compostos cimentícios com pseudo-encruamento na camada de reforço sem armadura adicional ocorre localização de deformações e fissuras em, fazendo com que as deformações e resistências últimas encontradas em ensaios de tração não sejam observadas no elemento estrutural (CHEN; YU; LEUNG, 2018; HABEL, 2004; KUNIEDA et al., 2010). Ainda assim, a localização de fissuração é sensivelmente reduzida quando comparado ao concreto convencional, como pode ser observado na Figura 16. A distribuição da fissuração na camada de reforço devido à introdução de uma armadura é mais acentuada. Assim, como Habel (2004), Hussein, Kunieda e Nakamura (2012) observam que a introdução de uma armadura no CUADRF do reforço reduz o aparecimento de fraturas localizadas, pois a barra de aço ajuda a distribuir as tensões de modo homogêneo.

Figura 16 – comparação entre vigas de concreto convencional (RC), reforço sem armadura adicional (NR) e reforço com armadura adicional (R): a) no estágio II e b) depois do escoamento da armadura



Fonte: Habel (2004)

Outra aplicação de materiais cimentícios de alto desempenho é o reforço em vigas com armaduras sujeitas à corrosão. Chen, Yu e Leung (2018) observaram uma recuperação de até 95% da capacidade de carga última em vigas onde a seção transversal das armaduras foi reduzida devido à corrosão. Além disso, os autores discutem que o custo da intervenção foi inferior em comparação às alternativas tradicionais.

O reforço utilizando compostos cimentícios de ultra alto desempenho apresentando pseudo-encruamento também foi avaliado por Hussein, Kunieda e Nakamura (2012). Os autores observam que para o reforço utilizado foi possível dobrar a capacidade resistente da viga na situação em que foi adicionado uma pequena armadura adicional. Além disso, os autores alertam para a concentração de deformações devido a fissuração do substrato, que pode ocorrer no caso de vigas existentes (HUSSEIN; KUNIEDA; NAKAMURA, 2012; KAMAL et al., 2008). Tal fissuração induzida pelo substrato pode ser evitado pela introdução de armaduras adicionais (KHALIL et al., 2015).

Outro ponto importante quando se trata de reforço de estruturas é o comportamento estrutural e modo de falha das vigas. Em alguns casos, é possível que a introdução

do reforço possa alterar o modo de ruptura das vigas, levando a rupturas frágeis, não recomendadas por normas e contra a segurança. A introdução do CUADRF na região tracionada pode alterar a ruptura de vigas para modos frágeis, como observado por Bergmann et al. (2017) e Khalil et al. (2015), especialmente quando não é utilizada armadura adicional. Já outros autores indicam que existem configurações de reforço que permitem que as condições de ductilidade sejam atendidas, principalmente com a utilização de armaduras adicionais (HABEL; DENARIÉ; BRÜHWILER, 2007; HUSSEIN; KUNIEDA; NAKAMURA, 2012).

A alteração do modo de ruptura de vigas também foi observada por Bergmann et al. (2017), onde os autores recomendam o estudo para uma espessura ideal da camada de reforço para obtenção de uma viga com modo de ruptura adequado. Neste estudo, foi observado um ganho de resistência e rigidez das vigas devido a introdução de uma camada de reforço na região tracionada, com aumentos na capacidade última entre 9 e 12%. O modo de ruptura das vigas é avaliado extensivamente a partir de uma base de dados da literatura por Zhu *et al* (2020), observando que frequentemente o modo de falha das vigas é por esmagamento de concreto quando é aplicado um reforço na região tracionada, especialmente quando ocorre uso de armadura adicional.

Lampropoulos et al. (2016) avaliam o uso do CUADRF no reforço de vigas de forma numérica, utilizando modelos numéricos que consideram modelos constitutivos presentes na literatura. Os autores validam as relações constitutivas por meio de ensaios de flexão, tração direta e compressão do material. Os resultados indicam que o reforço utilizando CUADRF na região comprimida apresentam resultados semelhantes ao concreto convencional e que variações no comportamento à tração do material não influenciam significativamente a capacidade resistente. No caso do reforço na região tracionada ou de jaquetas em três lados da viga, os resultados foram mais expressivos, com aumentos do momento último de 31 e 53%, respectivamente.

Zhang *et al.* (2019) discutem a aplicação do reforço utilizando uma combinação de uma camada de CUADRF e placas de fibra de carbono reforçadas em seções danificadas de pontes, ambos na parte superior da seção, de modo analítico e numérico. Os autores encontram que, sujeito a um momento negativo, a camada de reforço com CUADRF contribui com uma maior distribuição da fissuração e aumento de até 30% da capacidade de carga. Com o momento positivo, o aumento da

capacidade é da ordem de 100%, com significativo aumento da rigidez. Além disso, os autores notam um aumento considerável da extensão do comportamento linear da seção.

Como mencionado, o cisalhamento pode ser um ponto crítico em vigas reforçadas levando em conta a flexão, e também pode ser necessário realizar o reforço em vigas deficientes em termos de cisalhamento. Neste sentido, o CUADRF pode ser utilizado nas laterais da viga para aprimorar o desempenho da viga tanto em flexão como em cisalhamento. Sakr *et al.* (2019) avaliam a aplicação de placas de CUADRF com e sem armadura adicional nas laterais da viga como forma de aprimorar o desempenho da viga tanto em flexão quanto em cisalhamento, encontrando ótimos ganhos de resistência, capacidade de deformação e ductilidade da viga. A aplicação de reforço de cisalhamento também foi estudada por Bahraq *et al.* (2019) através da aplicação do CUADRF nas laterais e na forma de jaqueta de concreto, observando a alteração do modo de ruptura e significativo aumento na capacidade de carga, especialmente com o uso da jaqueta.

Para o reforço na região comprimida, um estudo analítico de Buttignol *et al.* (2018) confirma o baixo ganho de resistência observado por Lampropoulos *et al.* (2016). Isto ocorre pois, em vigas normalmente armadas, o uso do reforço na região comprimida com o CUAD reduz o trabalho da viga original (substrato), levando à conclusão que a resistência do concreto convencional do substrato não influencia na resistência final da viga reforçada, sendo a resistência principalmente função da taxa de armadura trabalhando em tração. Este fato é observado em outros trabalhos, onde o ganho de resistência é igual mesmo variando-se a resistência do concreto do substrato de 30 a 60 MPa (SAFDAR; MATSUMOTO; KAKUMA, 2016; YIN; SHIRAI; TEO, 2019).

Entretanto, é demonstrado que a utilização simultânea do reforço em CUAD na região comprimida e armadura adicional ou outros métodos de reforço na região tracionada pode levar a ganhos na resistência última considerável, com aumento significativo da rigidez e ductilidade da viga. Isto é constatado por Buttignol *et al.* (2018), Lampropoulos *et al.* (2016) e Martinola *et al.* (2010).

Ainda tratando-se do reforço na região comprimida, é interessante observar o caso específico de vigas superarmadas. Em tais vigas, a falha ocorre por esmagamento do concreto e com pequeno deslocamento das vigas, resultando em rupturas frágeis

indesejadas. Neste caso, a aplicação do reforço com CUADRF pode contribuir com uma alteração do modo de ruptura, além de um ganho considerável da capacidade resistente. Tais resultados foram demonstrados por Atta e Khalil (2016), encontrando ganhos de resistência da ordem de 40% e considerável melhora na capacidade de deformação e fissuração dos elementos superarmados.

3.7.2. Modelo analítico para reforço com CUADRF

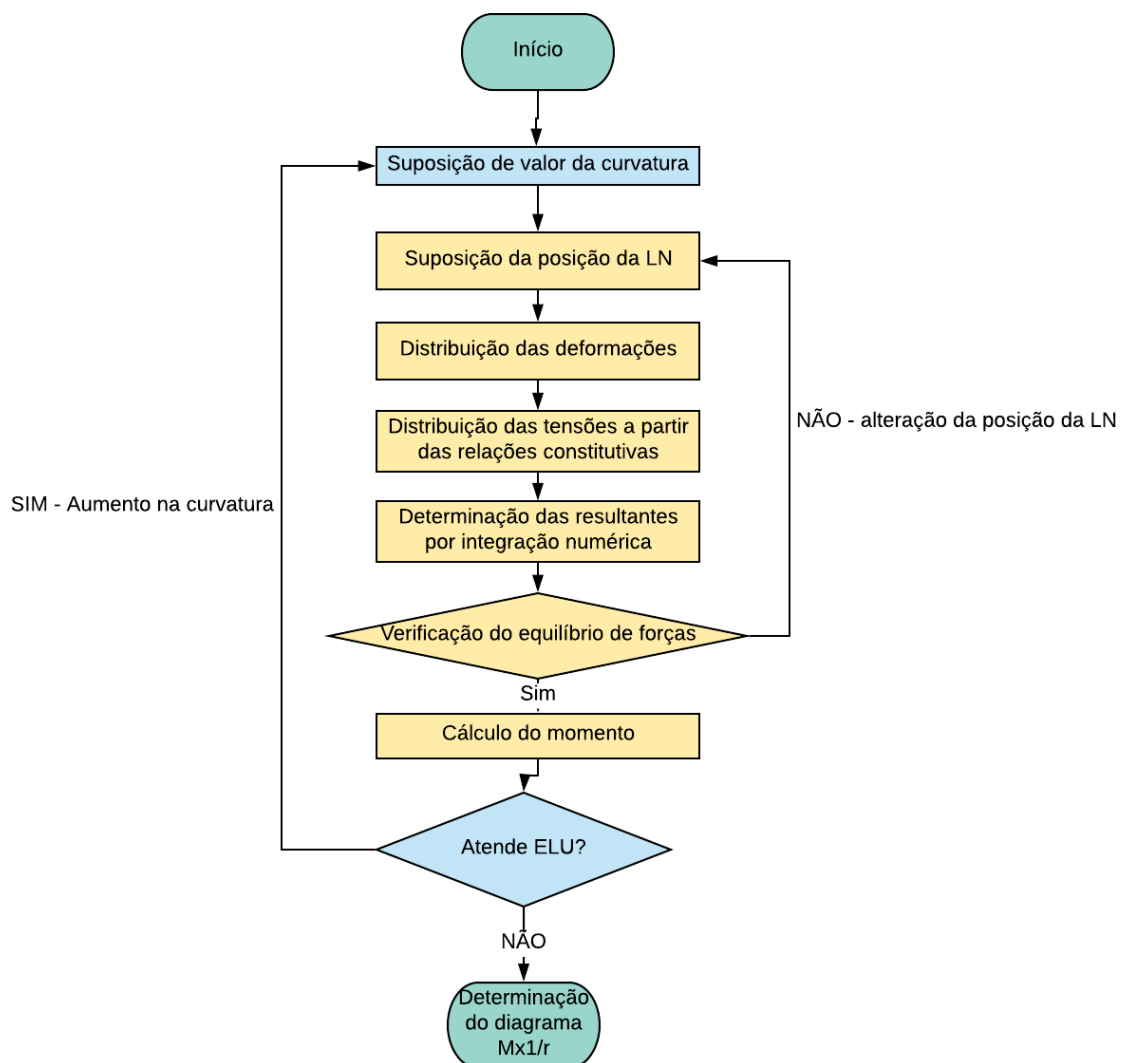
O estudo analítico de elementos compósitos de concreto convencional e concretos de ultra alto desempenho não é contemplado nas normas e códigos usuais. Entretanto, é possível realizar a análise para previsão da capacidade de carga e deslocamentos tanto no estado limite último quanto no estado limite de serviço considerando cuidadosamente as propriedades dos materiais e modelos constitutivos simplificados apresentados anteriormente. A relação momento-curvatura e o comportamento sob flexão pode ser determinado a partir de um método de análise de seção transversal e algumas hipóteses de cálculo.

As hipóteses comumente adotadas são dadas por:

- Hipótese de Bernoulli, que estabelece que seções planas permanecem planas. A partir disto, é necessário considerar também que a aderência entre as barras de aço e o concreto, assim como o CUADRF e o concreto convencional, seja perfeita.
- Os materiais se comportam conforme seus modelos constitutivos de tensão-deformação (item 3.5.3).
- A seção transversal está em equilíbrio.

Diversos autores utilizaram estas hipóteses para verificação de resultados experimentais, observando boa concordância entre os resultados (FERRIER et al., 2015; HABEL, 2004; YANG; JOH; KIM, 2011, 2010; YOO; BANTHIA; YOON, 2016; YOO; YOON, 2015). O método baseia-se em um processo iterativo, onde é suposta uma curvatura e a posição da linha neutra é determinada a partir do equilíbrio da seção. O fluxograma do processo pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma para determinação do diagrama momento-curvatura

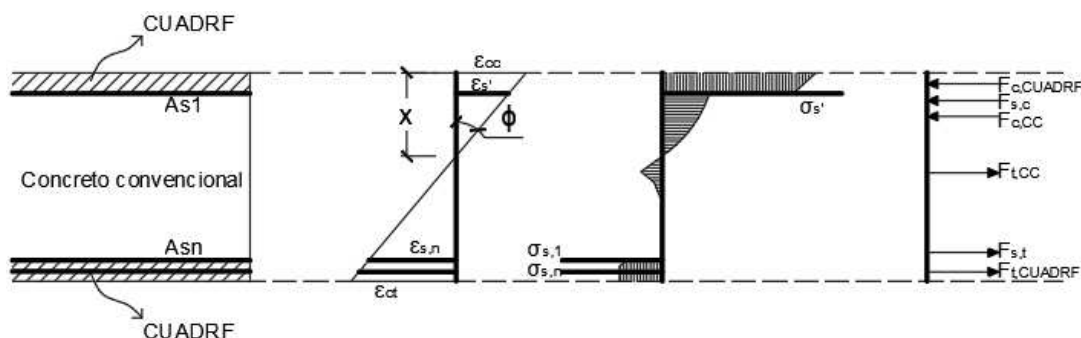


Fonte: baseado em Yoo e Yoon (2016)

Neste procedimento, o processo é repetido com incrementos da curvatura até que seja atingido o estado limite último, que pode ser considerado como

Um esquema genérico da seção transversal pode ser observado na Figura 18, demonstrando o comportamento do CUADRF e o concreto convencional em tração e compressão, assim como as barras de aço. As forças exercidas por cada material podem ser encontradas a partir da integração das relações de tensão e deformação de cada um dos materiais, podendo ser considerada a região de contribuição em tração do concreto convencional e do CUADRF.

Figura 18 – seção transversal genérica



Os modelos constitutivos adotados para os materiais foram baseados nos resultados experimentais encontrados nos ensaios de caracterização. Em função das dificuldades para determinação da curva completa de tensão por deformação do concreto em compressão, podem ser adotados modelos difundidos na literatura com base em propriedades elementares ensaiadas do concreto convencional e do concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras. Foram considerados os modelos propostos na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) para o comportamento não linear do concreto e do aço, enquanto para o CUADRF foi adotado o modelo linear proposto pela AFGC-SETRA (AFGC-SETRA, 2002).

A aplicação deste tipo de modelo analítico, com as simplificações apresentadas, tem limitações conhecidas. Tais limitações são observadas especialmente no que se trata do estudo de reforço na região tracionada, uma vez que a modelagem de microfissuras no CUADRF não é aplicável. Além disso, a suposição da aderência perfeita entre os materiais tem validade limitada. Levando estes parâmetros em conta, é possível elaborar modelos mais realistas, como demonstrado por Zanuy e Ulzurrun (2020), que propõe um modelo que leva em conta as tensões nas interfaces dos materiais para avaliar a interação entre os materiais, além de considerar modelos realistas da relação de tensão e aberturas de fissuras nos concretos, evitando os problemas envolvidos na utilização do comprimento de referência para esta modelagem. Outra solução para modelagem de elementos compósitos levando em conta o papel da interface seria a utilização de modelos numéricos, como realizado por Yin, Shirai e Teo (2019), onde os autores representam a interface por elementos equivalentes de viga no modelo numérico, conseguindo representar mais fielmente os resultados observados experimentalmente. Modelos numéricos também permitem o estudo de vigas ou lajes considerando danos no substrato de concreto, como

demonstrado por Zhu *et al* (2020b). Neste trabalho, os autores discutem como o dano no concreto convencional afeta a resistência do elemento reforçado, exaltando a necessidade de levar em conta este parâmetro. Além disso, os autores discutem a necessidade de uma modelagem correta da interface, comparando os resultados com modelos analíticos convencionais e encontrando divergências consideráveis.

3.8. Falha por cisalhamento na interface

Até o momento foram discutidos os principais pontos relativos ao reforço de estruturas à flexão, considerando a ductilidade em termos do comportamento na flexão. Entretanto, no caso de elementos em que é necessário aumentar a capacidade de carga através de reforço estrutural, é comum que estes apresentem deficiência em termos de capacidade de carga à força cortante. Assim, mesmo que o reforço à flexão se mostre adequado às cargas previstas, o elemento estrutural ainda pode apresentar desempenho inferior no caso do cisalhamento, com falha repentina indesejável. Outro modo de falha possível é relacionado à interface entre o material de reforço e o substrato, que também ocorre de maneira repentina e, portanto, indesejável.

Como mencionado, existem diversos métodos de reforço utilizados na engenharia civil, sendo que os métodos mais comuns se concentram na aplicação de materiais dúcteis de alta resistência na região tracionada das vigas. Naturalmente, o estudo sobre a falha na interface usualmente se concentra nos métodos mais consagrados. Embora os estudos usualmente tratem do reforço da região tracionada, os mecanismos de falha muitas vezes também se estendem para o reforço na região comprimida.

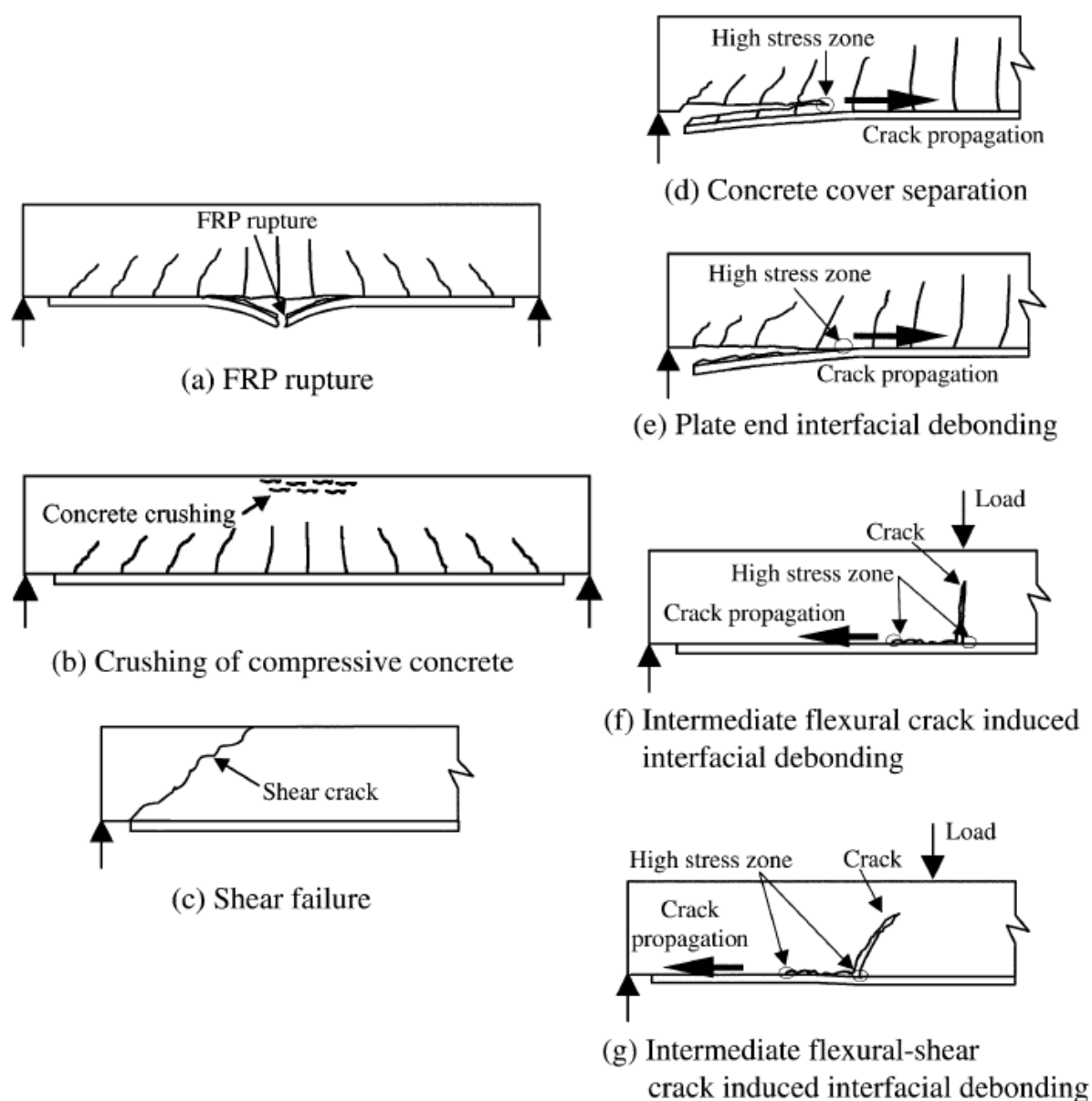
Um fator importante que influencia na ocorrência de problemas é a grande diferença entre os módulos de elasticidade do material de reforço e substrato usualmente encontrados na literatura, como placas de polímeros reforçados com fibras ou aço. Esta grande diferença gera uma incompatibilidade entre os materiais e tendência de concentração de tensões, especialmente quando ocorre fissuração próximo da interface.

Considerando a interface, a falha por descolamento da camada de reforço já foi amplamente estudada, sendo diversos tipos de falha documentados. De acordo com Teng *et al.* (2003), os principais modos de falha de elementos estruturais de concreto

armado reforçados na região tracionada são descritos na Figura 19. Os autores classificam as falhas por descolamento do reforço em duas categorias: a primeira, relacionada à tensões elevadas nas extremidades da placa de reforço (d e e , na figura), e a segunda, relacionada à fissuração na região central da placa (f e g , na figura).

Como é possível notar, existem diversos modos possíveis de falha e o modo crítico será específico para cada problema de reforço, visto que uma série de fatores influencia qual tipo de falha ocorrerá, como: propriedades mecânicas do substrato e do material de reforço, características geométricas da viga e da camada de reforço e comportamento da interface. É possível encontrar na literatura uma série de tentativas de modelagem do comportamento, usualmente considerando cada tipo de falha independentemente (AHMED; GEMERT; VANDEWALLE, 2001; SMITH; TENG, 2001; WANG; ZHANG, 2008). Como método de dimensionamento, é importante avaliar a geometria e os materiais envolvidos no problema e buscar qual modo de falha será predominante.

Figura 19 – modos de falha de vigas de concreto armado reforçadas



Fonte: Teng et al. (2003)

No caso de reforço na região tracionada, é necessário avaliar cuidadosamente a concentração de tensões nas extremidades da placa, já que a camada de reforço não se estende até o final da viga devido à existência dos apoios. Tratando-se de reforço na região comprimida, os modos de falha mais relevantes são aqueles relacionados à fissuração no centro da placa, uma vez que o reforço pode se estender até a extremidade da viga, eliminando as concentrações de tensões. A nomenclatura encontrada na literatura para este fenômeno é descolamento devido a fissura

intermediária, seja a fissura devido à flexão ou fissura devido a interação de flexão e cisalhamento.

O mecanismo que governa o fenômeno de descolamento devido a fissura intermediária é descrito por Teng et al. (2003). Segundo os autores, no momento em que a fissura de flexão se forma e atinge a interface, as tensões que eram transferidas pelo concreto passam a ser transferidas pela camada de reforço, induzindo concentrações de tensões na interface na região próxima à fissura. Quando é atingida a tensão crítica da interface, inicia-se um processo de descolamento instável do reforço que se propaga em direção à extremidade da camada de reforço, levando ao colapso da viga. Neste modo de falha, as propriedades da interface são fundamentais para caracterizar o problema, uma vez que a ruína ocorre devido à concentração de tensões na interface. Assim, a modelagem da interface não pode ser assumida como uma ligação rígida, já que é necessário acomodar pequenas deformações e microfissuração no adesivo e no concreto da região respectivamente. De qualquer maneira, a falha da viga ocorrerá no momento em que uma fissura de flexão principal se desenvolver na viga, induzindo concentrações de tensões significativas na interface.

Também é possível a ocorrência do descolamento devido à existência de uma fissura intermediária resultado a interação entre flexão e cisalhamento, que leva a um mecanismo de falha diferente na interface. Neste tipo de fissura, que ocorre com uma inclinação em relação à direção vertical, o deslocamento vertical relativo dos dois lados da fissura faz com que um lado da camada de reforço seja empurrado para cima, enquanto o outro lado é empurrado para baixo, induzindo tensões de tração na direção vertical na camada de reforço, na interface e na região do substrato próxima à interface. Tais tensões de tração tendem a atingir um valor crítico com o aumento da abertura da fissura, iniciando um processo de descolamento do reforço por meio da propagação de uma fissura paralela à interface. No caso de vigas de concreto armado, é comum que a fissura se propague pelo substrato na região próxima à interface devido à baixa resistência à tração do concreto (YAO; TENG; LAM, 2005).

4. Materiais e métodos

A determinação do traço do CUADRF foi realizada utilizando os conceitos apresentados e o modelo de empacotamento ótimo baseado no método modificado de Andreasen e Andersen.

A caracterização do concreto convencional e do CUADRF foi realizada por meio de ensaios de compressão para determinação de módulo de elasticidade e até a ruptura.

O comportamento estrutural das vigas compósitas reforçadas com diferentes configurações de reforço foi analisado por meio de estudos analíticos, numéricos e experimentais. Foram consideradas as propriedades obtidas a partir da caracterização dos materiais para os cálculos e comparações.

4.1. Determinação do traço

Foram estudadas as granulometrias de todos os componentes do CUADRF: cimento, sílica ativa, areia e pó de quartzo. Para o cimento e sílica ativa, foram considerados curvas obtidas na literatura e consultados fornecedores para obtenção das distribuições granulométricas em virtude das dificuldades de realização dos ensaios. Foram realizados ensaios para determinação da curva granulométrica da areia e pó de quartzo, sendo que para a areia foi realizado um ensaio de peneiramento e para o pó de quartzo, um ensaio de sedimentação.

O algoritmo para determinação do traço foi baseado na equação (6) e foi executado no software Microsoft Excel utilizando a função *Solver*. A otimização é realizada a partir da minimização da diferença entre as curvas da mistura e a curva alvo (determinada no método de empacotamento ótimo) pelo método dos mínimos quadrados.

A curva ótima teórica é determinada pela equação mencionada do método modificado de Andreasen e Andersen considerando os diâmetros mínimos e máximos obtidos experimentalmente de todos os componentes esperados na mistura. Nesta determinação, deve ser levado em conta o chamado módulo de distribuição, que matematicamente favorece uma determinada parcela dos diâmetros das partículas. Neste trabalho, foi adotado o valor de 0,23, que favorece uma utilização maior de finos

no traço, recomendado por autores para o caso do CUAD (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

A segunda etapa do processo consiste em criar a curva correspondente à mistura dos componentes em uma determinada proporção. Assim, dado um traço e a distribuição granulométrica dos componentes, por meio das equações (9) e (10) é possível computar quanto cada um dos materiais contribui para a mistura de todos os materiais e assim criar uma curva granulométrica representativa desta mistura.

A otimização do traço, portanto, pode ser realizada minimizando-se a diferença entre as duas curvas por meio do algoritmo desenvolvido utilizando a função *Solver* do software Microsoft Excel. Neste algoritmo, foi computada a diferença entre as duas curvas a partir das equações (7) e (8) e, partindo de um traço inicial aleatório, a proporção entre os componentes é alterada iterativamente até obter o mínimo erro entre a curva com empacotamento ótimo e a curva real da mistura. Neste processo, é importante levar em conta as principais restrições para os problemas de concreto, especialmente dosagem mínima de cimento e adições minerais.

Foram adotados como restrições para os materiais um consumo mínimo de cimento de 1000 kg/m^3 e uma proporção de 0,25 da relação sílica ativa e cimento. Além disso, como os parâmetros alterados pelo *Solver* são as proporções entre partículas sólidas, foi adotado um volume inicial de água e aditivo superplastificante para refletir as condições desejadas, já que o método utiliza nos cálculos o volume total de todos os componentes. Foi adotado um volume de ar incorporado à mistura de 3% e um módulo de distribuição de 0,23.

4.2. Ensaios de aderência (*slant shear test*)

Para os ensaios de aderência, foram realizados ensaios de compressão/cisalhamento (*slant shear test*). Foram escolhidos prismas de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ para a realização dos ensaios, com uma interface inclinada a 45° . Os prismas compósitos foram moldados em duas etapas. Primeiramente foi realizada a concretagem da metade de concreto convencional utilizando as fôrmas inclinadas segundo o ângulo adotado de 45° para a interface. Posteriormente, após a preparação escolhida para a interface, foi realizada a segunda etapa da concretagem, utilizando o CUADRF.

Figura 20 – moldagem dos corpos de prova do *slant shear test*



A preparação da interface foi realizada um dia após a concretagem do substrato, realizando a remoção da camada superficial com escova de aço. Posteriormente, antes da concretagem da segunda parte do prisma, foi realizado o jateamento de areia da superfície. Nos corpos de prova com utilização de adesivo estrutural a base de epóxi, a aplicação do produto foi realizada no momento da concretagem.

Foram moldados um total de 8 prismas realizados em duas etapas. Destes, 2 foram realizados somente com jateamento de areia na interface e 6 com a aplicação de adesivo estrutural. O concreto do substrato dos quatro primeiros prismas (CC1) seguiu o traço 1:2:2 com relação água/cimento 0,6. Já o dos últimos prismas (CC2) possui traço 1:2:2, relação água/cimento 0,5 e adição de 1% do peso de cimento de aditivo superplastificante, para garantir a fluidez da mistura. O CUADRF segue o traço descrito na Tabela 7. Devido às dificuldades da moldagem de grandes quantidades de CUADRF, as moldagens foram realizadas em dois prismas por vez, totalizando 4 concretagens.

Tabela 7 – traço adotado para o CUADRF nos ensaios de aderência

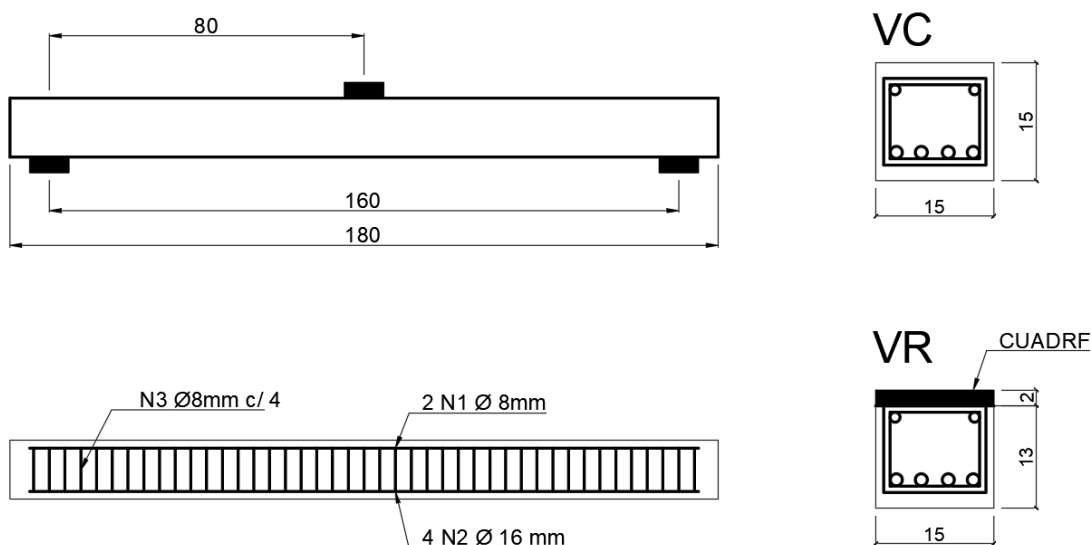
Cimento	Sílica	Areia	Pó de quartzo	Água	Superplastificante
1	0,24	1,17	0,16	0,22	0,06

4.3. Reforço na região comprimida

O comportamento estrutural da viga compósita reforçada na região comprimida foi estudado a partir de ensaios de flexão em três pontos em vigas de concreto superarmadas. Foram estudadas vigas com seção transversal de medidas $15 \times 15 \times 180 \text{ cm}$, com vão livre de 160 cm .

As vigas não reforçadas têm dimensões de $15 \times 15 \text{ cm}$ com duas barras de aço de 8 mm na região comprimida e quatro barras de 16 mm na região tracionada (vigas VC). O reforço consiste na substituição do cobrimento da viga na região comprimida pelo CUADRF, resultando em uma camada de 2 cm de espessura (vigas VR). Foram moldados um total de 6 vigas (2 do tipo VC, 4 do tipo VR). A carga prevista pelo modelo analítico para a viga do tipo VC é da ordem de 80 kN , enquanto da viga VR é da ordem de 120 kN .

Figura 21 – esquema e dimensão das vigas VC e VR



O dimensionamento das vigas foi realizado de modo que estas apresentem ruptura frágil (superarmadas), com a posição da linha neutra localizando-se dentro do domínio 4, de acordo com o preconizado na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014). Os estribos foram dimensionados de modo a evitar falha por cisalhamento no ensaio, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 6118 para uma carga prevista analiticamente para as vigas reforçadas e adotando coeficientes de segurança de 2,0.

As vigas foram dimensionadas para garantir uma ruptura por esmagamento do concreto a fim de aproveitar ao máximo o reforço na região comprimida utilizando o CUADRF. Com a introdução de um material com maior rigidez e resistência na região comprimida, o objetivo é promover a redistribuição das tensões internas e alterar a posição da linha neutra para uma ruptura dúctil com escoamento do aço, dentro dos domínios 2 ou 3.

Devido a limitações da quantidade de concreto convencional misturada, foram moldadas duas vigas por vez, resultando assim em um total de 4 concretagens (CC 1, 2, 3 e 4). Já o reforço foi moldado em uma viga por vez, resultando também em 4 concretagens (CUADRF 1, 2, 3 e 4). Em cada uma das concretagens, foram moldados corpos de prova para avaliação das propriedades dos materiais. Para o concreto convencional, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos com dimensões de $10 \times 20 \text{ cm}$ e 2 vigas ranhuradas de $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$. Para o CUADRF, foram moldados 6 cubos de 5 cm , 2 cilindros de $5 \times 10 \text{ cm}$ e uma viga ranhurada de $4 \times 8 \times 32 \text{ cm}$.

As vigas reforçadas foram moldadas em duas etapas. Primeiramente, foi concretada a parte correspondente ao concreto convencional. Um dia após a concretagem, a camada superficial da viga foi escovada para remoção da nata de cimento concentrada acima das armaduras. Posteriormente, foi realizada a preparação da superfície utilizando jateamento de areia. A concretagem da camada de reforço foi realizada 11 dias após a concretagem da viga. Como método adicional para garantir a aderência entre os materiais, foi utilizado um adesivo estrutural de base epóxi (Compound adesivo, tipo gel) durante a concretagem, com uma camada de espessura mínima de 2 mm . A utilização do adesivo se fez necessária para garantir a transferência de tensões entre os materiais e a integridade da viga até o fim do ensaio.

O concreto convencional foi elaborado seguindo um traço de 1:2:2 e relação água/cimento de 0,5. Para garantir a fluidez da mistura, foi adicionado um aditivo superplastificante na proporção de 1% do peso de cimento. O cimento utilizado foi o cimento CP II. Foi utilizada uma areia média como agregado miúdo e o agregado graúdo adotado foi o pedrisco. A areia utilizada possui DMC igual a $1,20 \text{ mm}$, módulo de finura de aproximadamente 2,0, enquanto a brita possui DMC de $9,8 \text{ mm}$ e módulo de finura de 4,7.

Já o CUADRF tem o traço dado na tabela a seguir. A areia utilizada foi uma areia de quartzo com diâmetros máximos de $0,5\text{ mm}$, enquanto o pó de quartzo consiste no material passante na peneira #200. O cimento utilizado foi o CP V ARI, que conforme mencionado, é cimento encontrado comercialmente no país com a composição química que mais favorece a aplicação ao CUAD. O aditivo superplastificante foi o Adva Flow, da marca GCP, escolhido por apresentar melhor desempenho em ensaios de fluidez de pasta de cimento.

Tabela 8 – traço do CUADRF das vigas reforçadas

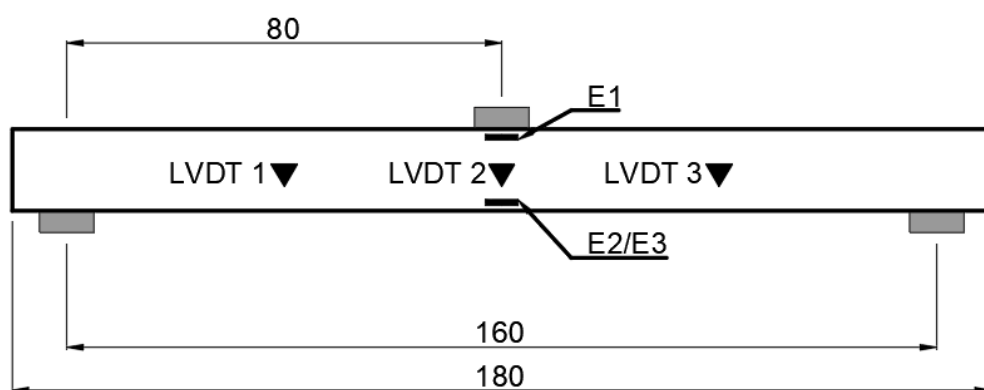
Cimento	Sílica	Areia	Pó de quartzo	Água	Superplastificante
1	0,24	1,17	0,16	0,22	0,06

Figura 22 – arranjo do ensaio



As vigas foram instrumentadas com extensômetros posicionados no centro do vão, colados nas barras de aço mais inferiores e no topo da viga, no CUADRF. Também foram utilizados LVDTs para medição dos deslocamentos da viga no centro e a uma distância de um quarto do vão a partir dos apoios. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Dinâmicos (LabEDin), na Unicamp, utilizando deslocamento controlado a uma velocidade de $0,5\text{ mm/min}$ para garantir um carregamento lento.

Figura 23 – instrumentação das vigas



5. Resultados e discussão

5.1. Determinação do traço do CUADRF

Os resultados de todos os ensaios de granulometria, a curva alvo de empacotamento ótimo do método modificado de Andreasen e Andersen e a distribuição granulométrica do traço encontrado são dados na Figura 24. Para o cimento e a sílica ativa, foram considerados valores obtidos na literatura e dados fornecidos pelos fabricantes, devido a dificuldades para realização dos ensaios. Os parâmetros da areia e pó de quartzo foram determinados em laboratório por meio de ensaios de peneiramento e sedimentação. As massas específica das partículas sólidas dos componentes adotadas ou medidas são dadas na Tabela 9, já que é necessário trabalhar com medidas de volume e massa dos componentes.

Figura 24 – resultados da determinação do traço

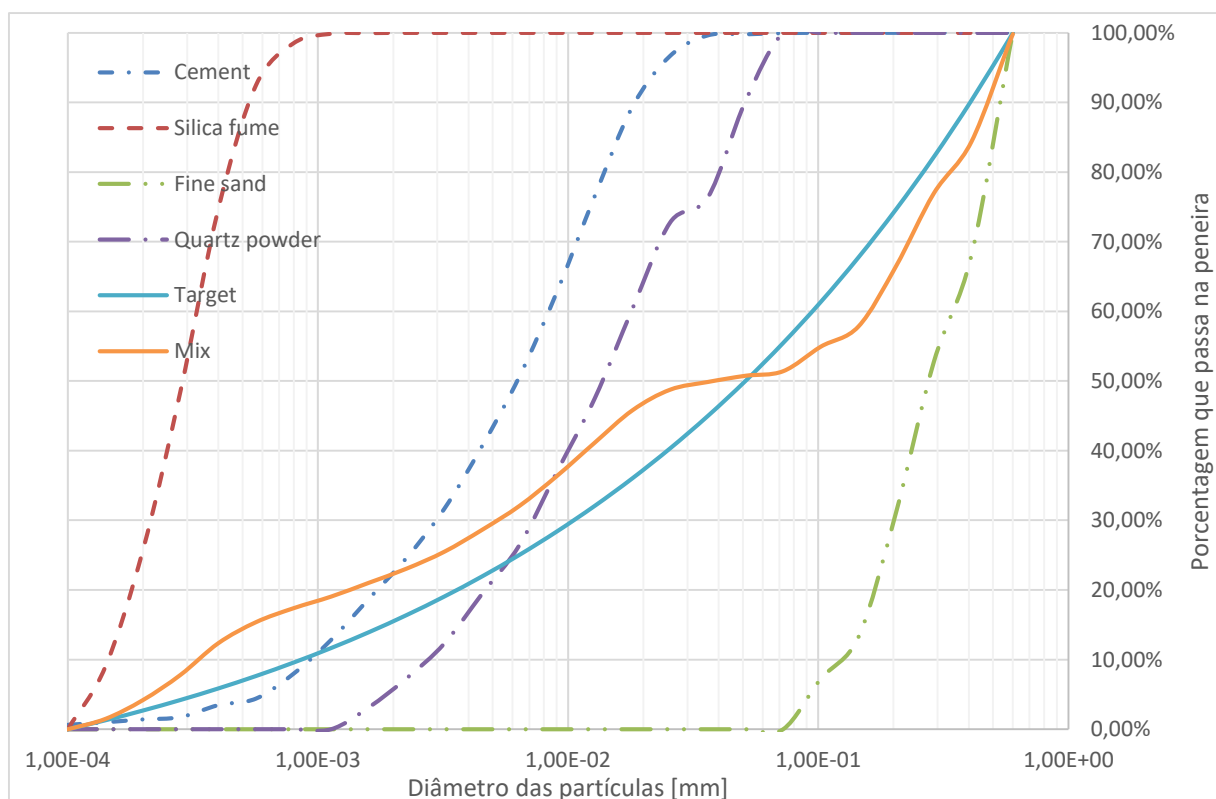


Tabela 9 – massa específica dos componentes

Material	Cimento	Sílica	Areia	Pó de quartzo	Água	Superplastificante
$\rho_{esp} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	3150	2200	2717	2766	1000	1050

O traço resultante da aplicação do método é dado na Tabela 10 e sua distribuição granulométrica é dada na Figura 24. O coeficiente R^2 entre as duas curvas encontrado foi de 0,948. Nesta figura, é possível observar como o traço adotado se assemelha à distribuição com empacotamento ótimo obtida pelo modelo teórico. Como foram adotadas restrições em termos da dosagem mínima de cimento e de sílica ativa, é natural que a curva da mistura apresente maior concentração de finos, uma vez que o empacotamento das partículas não é o único fator que influencia a resistência final do concreto.

Tabela 10 – traço encontrado pelo método de empacotamento ótimo

Cimento	Sílica	Areia	Pó de quartzo
1	0,25	1,2	0,16

A partir deste traço inicial, foram realizadas séries de ensaios em laboratório para avaliação das propriedades do CUAD endurecido, e ajustes foram realizados nas proporções dos componentes por tentativa e erro buscando aumentos na resistência. Tal procedimento foi realizado por meio de processo de tentativa e erro com base em observações empíricas. O principal fator a ser considerado é a trabalhabilidade da mistura, uma vez que no caso do CUAD são utilizadas relações água/cimento muito baixas. Assim, foram testados sistematicamente variações nas dosagens dos agregados e aglomerantes com diferentes relações água/cimento e aditivos, até que se atingisse um traço julgado adequado. O traço final do CUADRF utilizado na execução das vigas reforçadas e suas propriedades são discutidos nas seções correspondentes.

A aplicação de métodos de empacotamento se mostrou importante no sentido de determinação da combinação ótima entre os componentes do CUAD para redução da quantidade de vazios entre as partículas sólidas. Entretanto, como mencionado, a resistência final do concreto será influenciada por diversos outros fatores, como fator água/cimento, reologia do concreto fresco, propriedades mecânicas dos agregados, entre outros. Assim, a combinação entre os métodos de empacotamento e o estudo empírico foi necessária para otimizar principalmente a reologia do concreto fresco e assim obter os melhores resultados em termos de propriedades mecânicas.

O estudo da reologia foi realizado principalmente por tentativa e erro, realizando ensaios de espalhamento de cone (*mini slump*) para medição da fluidez da pasta de

cimento. Foram consideradas diversas variações de relação água/cimento e dosagens de aditivo superplastificante, testando diversos fornecedores de aditivo a fim de encontrar o que fornece o melhor desempenho.

Após encontrar o melhor desempenho possível em termos de dosagem de água e aditivo para a máxima fluidez da pasta de cimento, foram realizadas moldagens do CUAD com o traço encontrado a partir do modelo de empacotamento, variando-se também pequenas proporções entre os constituintes para buscar um melhor desempenho. Nesta etapa, a otimização da fluidez do concreto fresco mostrou-se fundamental, uma vez que caso o material não seja perfeitamente auto adensável, a introdução de ar é considerável e conseqüentemente os vazios no concreto reduzem drasticamente sua resistência.

Neste ponto, é essencial mencionar que a mistura dos ingredientes não é realizada da mesma maneira que o concreto convencional. Para o CUAD, é necessário que os equipamentos de mistura do concreto possuam energia suficiente para realizar a mistura dos componentes e desagregar completamente todos os torrões dentro da mistura, o que não é conseguido com betoneiras comuns. Foram utilizadas argamassadeiras com energia o suficiente para realizar completamente a mistura dos componentes.

5.2. Ensaios de aderência

Os ensaios de compressão/cisalhamento dos prismas foram realizados 28 dias após a última concretagem do CUADRF para todos os prismas. O ensaio consiste na aplicação de uma carga centrada de compressão no prisma compósito até a falha, sendo os resultados a carga última do prisma e anotação do tipo de falha observado, sendo este resultado qualitativo. O arranjo do ensaio pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – esquema do ensaio *slant shear test*

Primeiramente, foram avaliados a resistência à compressão dos concretos componentes dos prismas, todos aos 28 dias ou mais, dados na tabela a seguir.

Tabela 11 – resistência à compressão dos materiais

Material	f_c média(MPa)
CC1	22,60
CC2	34,32
CUADRF1	112,26
CUADRF2	125,92
CUADRF3	123,55
CUADRF4	119,14

Os ensaios compressão/cisalhamento foram avaliados a partir da carga de ruptura encontrada no ensaio e do modo de ruptura. Foram classificados três modos de ruptura: ruptura do concreto do substrato (S), ruptura da interface sem danos ao concreto adjacente (I) e ruptura mista (M). Cada ensaio foi classificado quanto à resistência e qualitativamente de acordo com o modo de ruptura, sendo os resultados dados na tabela abaixo. Os corpos de prova J1 e J2 foram preparados somente com jateamento de areia na interface, enquanto os corpos de prova A1 a A6 tiveram além do jateamento o uso de adesivo estrutural.

Tabela 12 – resultado dos testes de aderência

Corpo de prova	f_c média(MPa)	Classificação
J1	23,13	M
J2	19,58	S
A1	15,90	M
A2	21,75	S
A3	22,26	M
A4	35,31	S
A5	34,60	S
A6	31,15	S

Observa-se que na maioria dos ensaios foi encontrada falha no substrato, sendo a resistência média obtida próxima àquelas encontradas nos ensaios de compressão do concreto simples, forte indicativo que a falha se deveu ao esmagamento do concreto. Em nenhum ensaio, mesmo sem o uso de adesivo, foi encontrada falha por deslizamento na junta, resultado compatível com o que é observado na literatura, que indica boa aderência entre o CUADRF e substrato em concreto convencional.

Figura 26 – falha típica por compressão do substrato



Em todos os ensaios onde foi observada uma falha mista, foi possível atribuir a falha do prisma a uma fissura inclinada localizada próxima à interface na seção de menor espessura do substrato. Esta fissura, ao se propagar em direção à interface, inicia um processo de propagação da falha paralelamente à interface no concreto do substrato, levando à ruína do prisma. Esta falha também é evidenciada observando que uma camada de concreto permanece aderida na parte íntegra do prisma (CUADRF). Como mencionado, este tipo de falha é comum em elementos compósitos com diferença significativa de rigidez.

Figura 27 – falha típica do substrato



Finalmente, nos prismas A1 e A3, a falha precoce sem esmagamento do concreto foi atribuída à excentricidades e falta de paralelismo das faces do prisma, induzindo a falhas localizadas que levaram à ruína do corpo de prova em cargas significativamente abaixo da resistência à compressão do concreto convencional.

Figura 28 – falha mista típica



Com base nos resultados encontrados, é possível confirmar os resultados encontrados na literatura, que descrevem uma boa aderência entre os materiais mesmo sem uso de adesivos, e no caso do uso de adesivo observa-se um comportamento monolítico do prisma. Além disso, a utilização do adesivo estrutural garante a transferência de tensões da interface até o momento da ruptura por esmagamento do concreto convencional, desencadeando o processo instável de falha descrito anteriormente. É importante destacar que os ensaios de aderência foram realizados de forma suplementar, com um número reduzido de espécimes, de forma a avaliar o comportamento dos materiais em vista da aplicação prática de reforço.

A realização dos ensaios de aderência se mostrou importante pois indicou a necessidade da aplicação do adesivo estrutural ou algum outro método semelhante para garantir a transferência de esforços entre o substrato e o material de reforço, no caso das vigas. Os ensaios dos corpos de prova sem o uso de adesivo indicam claramente uma falha precoce desencadeada pelo início de fissuração próxima a interface, em concordância com o que é descrito na literatura. Neste processo, a transferência de tensões entre os materiais ficaria prejudicada precocemente, levando a um comportamento não desejado na viga e incompatibilidade entre as deformações dos materiais. Assim, a aplicação do adesivo estrutural na interface de vigas é fundamental para garantir a transferência de tensões entre os materiais.

5.3. Ensaios de caracterização

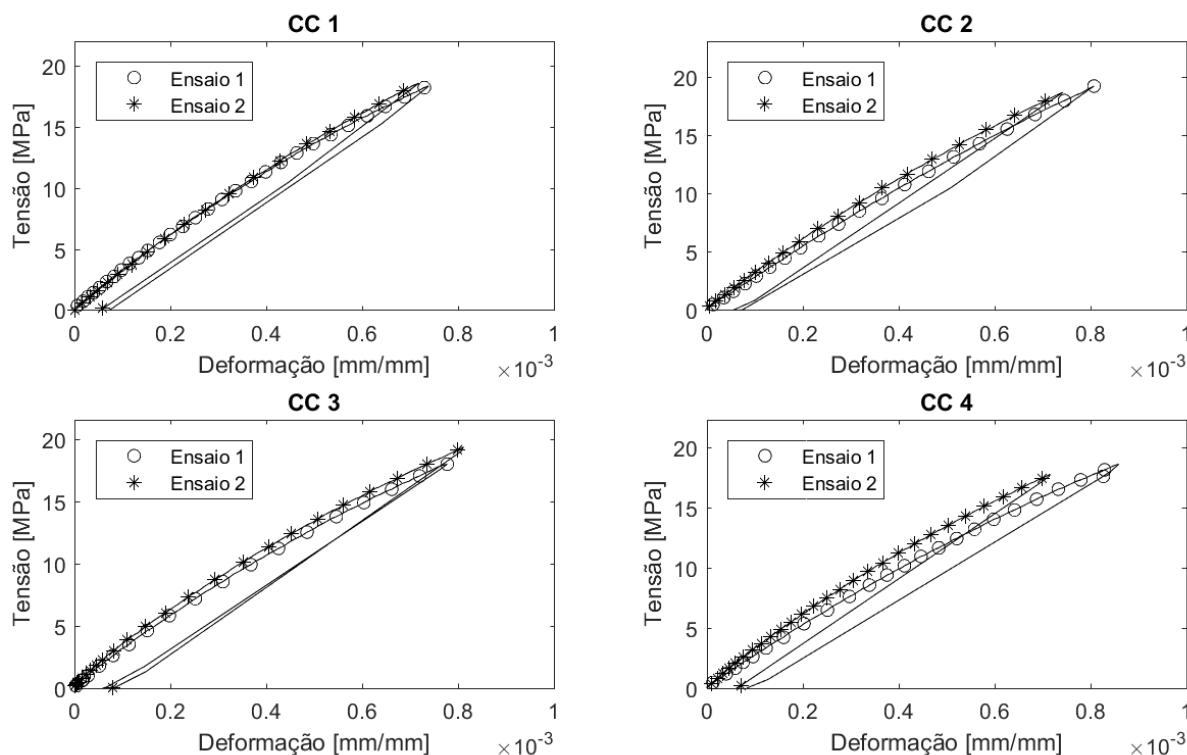
O concreto convencional foi caracterizado a partir de ensaios de compressão (ruptura e módulo de elasticidade), compressão diametral. Para a elaboração das vigas, foram realizadas quatro concretagens, sendo as propriedades avaliadas individualmente. As médias dos resultados para cada uma das concretagens são dadas na Tabela 13.

Tabela 13 – resultados médios para cada concretagem

Concreto	f_c[MPa]	f_t[MPa]	E_{ci}[GPa]
CC1	41,3	3,7	28,1
CC2	40,0	4,1	26,8
CC3	37,9	3,5	27,1
CC4	38,4	2,7	26,1

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados em dois corpos de prova por concretagem, sendo dada a média do módulo de elasticidade tangente. O gráfico combinado dos ensaios é dado na Figura 29.

Figura 29 – ensaios para determinação do módulo de elasticidade



Observa-se uma pequena dispersão dos resultados, mesmo considerando quatro concretagens diferentes, sendo possível analisar uma média geral das propriedades para análise posterior. Os resultados médios gerais são dados na Tabela 14.

Tabela 14 – média geral dos resultados

$f_{cm}[MPa]$	$f_{tm}[MPa]$	$E_{ci}[GPa]$
39,40	3,5	27,1

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras foi caracterizado a partir de ensaios de compressão (ruptura e módulo de elasticidade). Para os ensaios de compressão, foram utilizados cilindros de $5 \times 10 \text{ cm}$. Para a elaboração das vigas, foram realizadas quatro concretagens, sendo as propriedades avaliadas individualmente.

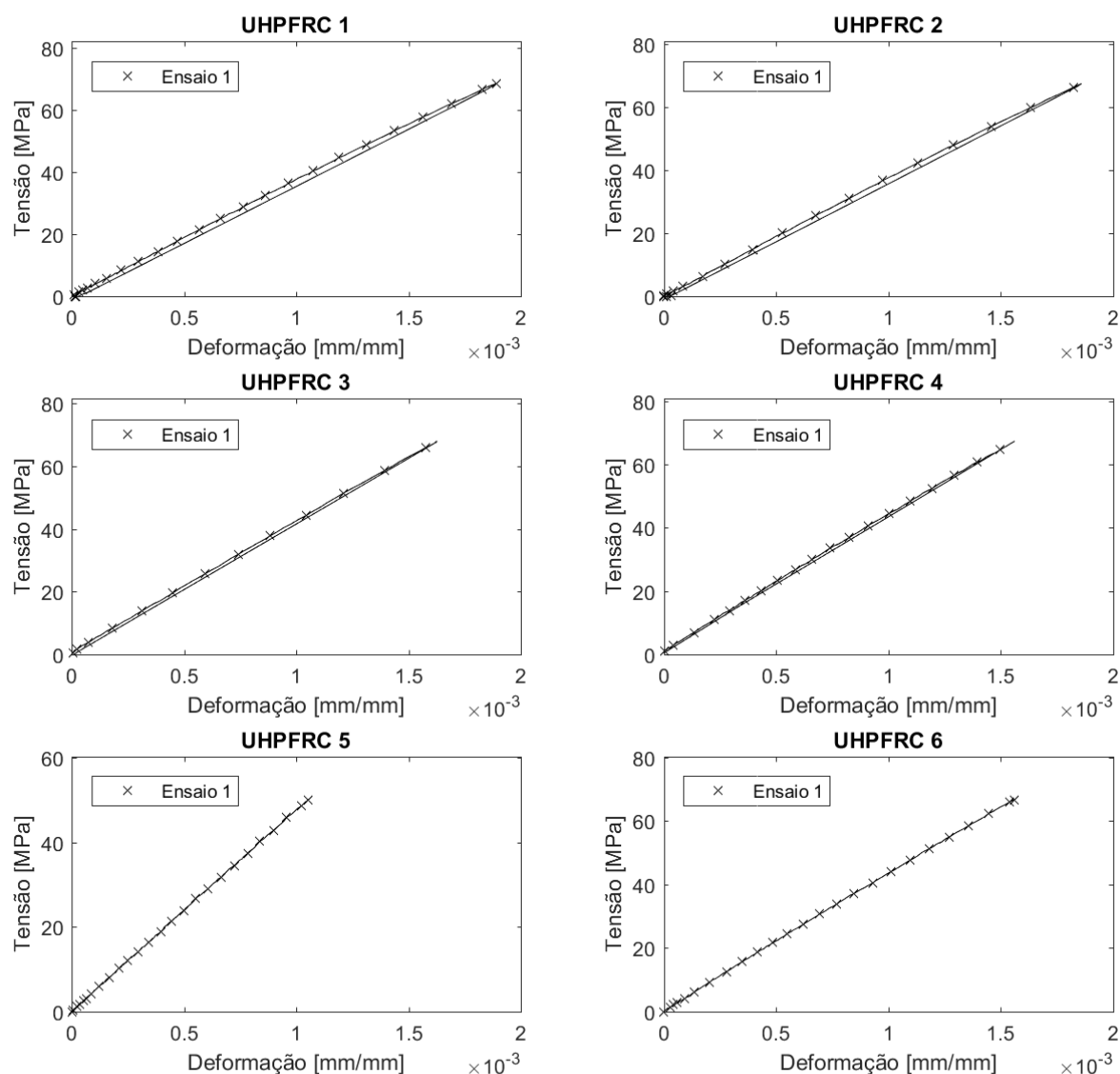
Embora não seja recomendado na literatura, a escolha de corpos de prova de pequenas dimensões ($5 \times 10 \text{ cm}$) para os ensaios de compressão se deu por dificuldades encontradas na elaboração do CUADRF. Em função dos equipamentos disponíveis no laboratório, o volume total de concreto produzido por concretagem não seria suficiente para a aplicação no reforço das vigas e para a moldagem de uma quantidade significativa de cilindros maiores. A decisão foi tomada com a comparação de resultados de cilindros e cubos de maiores dimensões realizados anteriormente, observando pequena diferença geral entre as resistências encontradas. A principal desvantagem do uso de corpos de prova de dimensões reduzidas é a maior dispersão dos resultados, o que pode ser observado na Tabela 15 e também é citado na literatura (GRAYBEAL; DAVIS, 2008).

Tabela 15 – resultados dos ensaios de compressão do CUADRF

Concreto	$f_{cm}[MPa]$	$E_{ci}[GPa]$
CUADRF1	131,0	41,17
CUADRF2	128,7	42,09
CUADRF3	138,6	47,95
CUADRF4	151,7	42,91

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados em um total de seis corpos de prova, sendo a análise realizada sobre a média do módulo de elasticidade tangente obtido. O ensaio foi realizado utilizando dois *clip gauges* posicionados diametralmente opostos no corpo de prova em uma base de medida de 5 cm . As leituras foram transformadas em deformações e foi adotado o valor médio entre os dois lados opostos do cilindro. Os resultados são dados na Figura 30. Observa-se o comportamento elástico-linear e ausência de deformações permanentes do material até cargas próximas de 50% da resistência última, conforme o mencionado na literatura e confirmado também nos ensaios de ruptura.

Figura 30 – resultado dos ensaios de módulo



A média geral dos resultados é dada na Tabela 16 a título de avaliação do comportamento global do material. Os estudos analíticos e numéricos foram considerando as propriedades do material das vigas individualmente com intuito de reproduzir fielmente o comportamento dos materiais.

Tabela 16 – média geral dos resultados do CUADRF

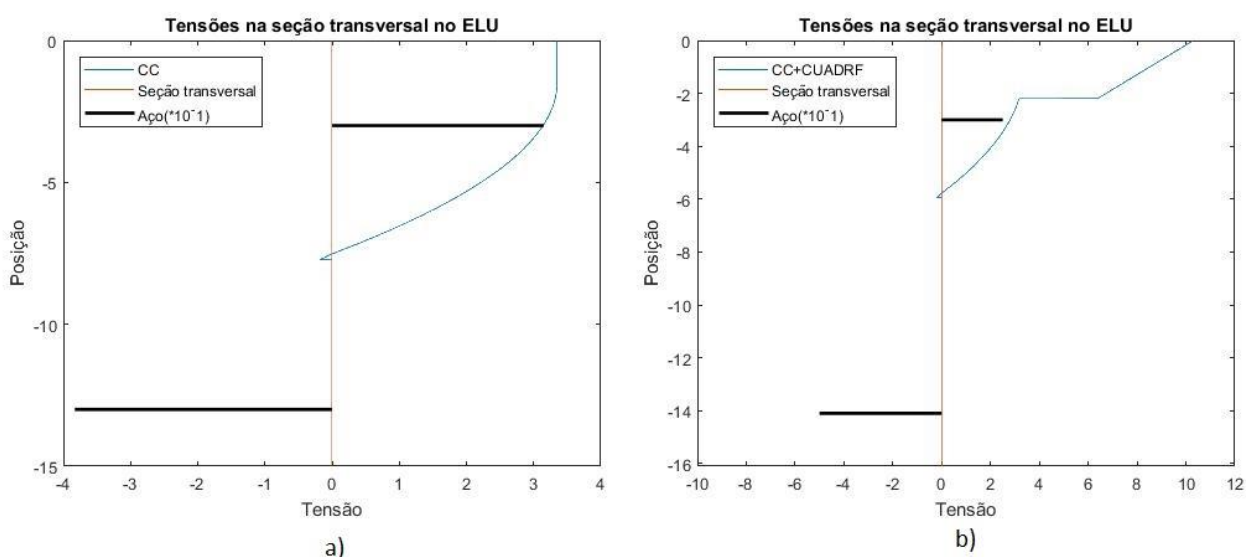
$f_{cm}[MPa]$	$E_{ci}[GPa]$
140,0	43,53

5.1. Resultados analíticos e numéricos

Foram elaborados modelos analíticos e numéricos (simplificados) para análise da viga proposta e comparação com os resultados experimentais. Os resultados obtidos são apresentados em conjunto com os resultados experimentais nas próximas seções.

O modelo analítico foi desenvolvido em conformidade com as hipóteses e métodos descritos no item 3.7.2 deste texto. A Figura 31 apresenta as tensões na seção transversal no estado limite último para os dois tipos de vigas estudados, evidenciando o modelo constitutivo adotado para os materiais citados.

Figura 31 – tensões em MPa na seção transversal no ELU para as duas vigas



A previsão do momento resistente das seções transversais estudadas obtida pelo modelo analítico é dada na Tabela 17. Foi encontrada boa concordância entre as capacidades de carga, rigidez e modo de falha, indicando a validade das hipóteses para a análise destas vigas. Os resultados analíticos são comparados com os resultados experimentais nas próximas seções.

Tabela 17 – previsão do momento resistente das vigas

Tipo	VC	VR
M _R [kN m] Analítico	34,1	49,6 (+46%)

O modelo numérico simplificado foi desenvolvido no software ATENA 2D como um método preliminar para verificação das hipóteses. Foram adotadas as hipóteses

simplificadoras de aderência perfeita entre o material de reforço e a viga. Foi realizada uma análise não-linear aplicando-se a carga por meio de um deslocamento prescrito no centro da viga.

Em virtude do caráter simplificado da análise, o modelo constitutivo do CUADRF não foi tratado como sendo bilinear (como foi descrito nos itens anteriores), mas como um concreto convencional com módulo de elasticidade, resistências à compressão e tração correspondentes aos resultados dos ensaios. Esta hipótese, embora não corresponda à realidade, é válida nos primeiros estágios de carregamento, justamente nos estágios onde as hipóteses sobre tensões de cisalhamento são discutidas (estádio 1).

Assim, o modelo numérico mostrou-se uma ferramenta para validar hipóteses quanto ao comportamento inicial da viga e são discutidos os resultados neste sentido. Entretanto, as hipóteses adotadas não representam fielmente o comportamento da viga nos estágios avançados de carregamento e os resultados não são apresentados.

5.2. Ensaios de vigas reforçadas

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Ensaios Dinâmicos (LabEDin), na Unicamp. O concreto das vigas VC foi ensaiado com idade de 62 dias, enquanto os das vigas VR possuíam idade de 53 dias (substrato) e 43 dias (reforço). Após a desforma, as dimensões das vigas foram medidas para posterior análise. Foi encontrado que em duas vigas reforçadas (VR3 e VR4) a camada de reforço não possuíam espessura constante ao longo da viga, com diferenças superiores a 100% entre a menor e maior espessuras, o que se mostrou determinante na falha destas vigas. As medidas obtidas são descritas na tabela abaixo, sendo as medidas de largura e altura tomadas em três pontos, e todas as dimensões dadas pela média entre os dois lados da viga.

Figura 32 – esquema das dimensões da viga

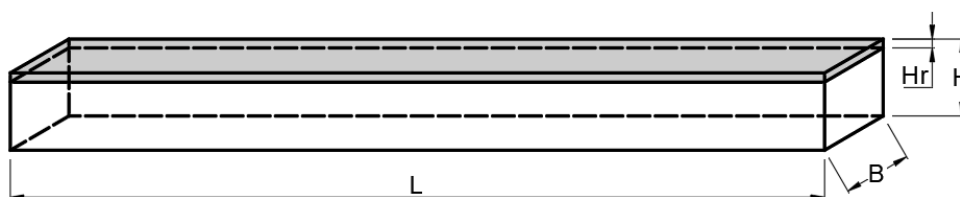
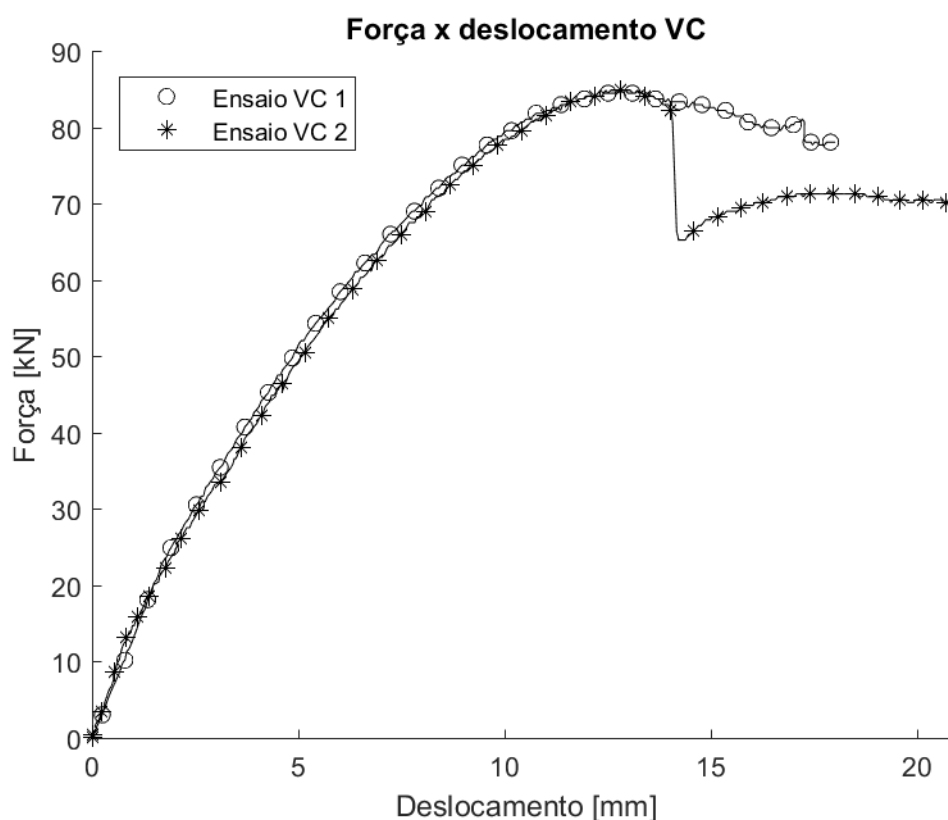


Tabela 18 – dimensões medidas nas vigas

	L	B ₁	B ₂	B ₃	H ₁	H ₂	H ₃	Hr ₁	Hr ₂	Hr ₃
VC1	180,3	14,7	14,8	15,9	15,5	15,3	15	-	-	-
VC2	180,2	15	16	15,4	15,7	15,1	15,1	-	-	-
VR1	180,3	15,7	15,7	15,8	15,7	15,9	15,4	2,3	2,2	1,7
VR2	180,4	15,4	15,3	15,2	15,5	15,5	15	2	2,1	1,5
VR3	180,2	15,5	15,6	15,6	15	15	15	1,5	1,8	1
VR4	180,2	15,2	15,1	15,1	16,4	16,4	16	2	1,8	1

Primeiramente, é possível analisar o comportamento das vigas convencionais de concreto armado (VC1 e VC2). Conforme citado, as vigas foram projetadas de modo a apresentar comportamento superarmado, ou seja, ruptura por esmagamento do concreto. O dimensionamento foi realizado para uma posição da linha neutra de $\beta = 0,6$, dentro do domínio 4. O gráfico de curva por deslocamento no centro do vão do ensaio é dado na Figura 33.

Figura 33 – gráfico de força por deslocamento das vigas VC



Nota-se a ocorrência do comportamento previsto, com ruptura frágil por esmagamento do concreto e pequenos deslocamentos (baixa capacidade de deformação). Além disso, a leitura dos extensômetros indica que o aço não chegou a atingir o patamar de escoamento. Na Figura 34, é possível observar a ruptura característica do concreto na região comprimida da viga, que também é observada no gráfico de força por deslocamento do ensaio, onde ocorre uma brusca queda na carga máxima da viga.

Figura 34 – ruptura típica da viga VC



Também é possível comparar os resultados analíticos com os experimentais. A partir das leituras dos extensômetros e da geometria da viga, é possível determinar a curvatura durante o ensaio juntamente com a carga aplicada, traçando-se um diagrama experimental. Nas Figura 35 e Figura 36 são descritos os resultados obtidos experimentalmente em cada um dos ensaios, destacando-se os descolamentos nos três LVDTs, as leituras nos extensômetros e a comparação entre o diagrama momento curvatura experimental e analítico.

Figura 35 – resultados do ensaio VC1

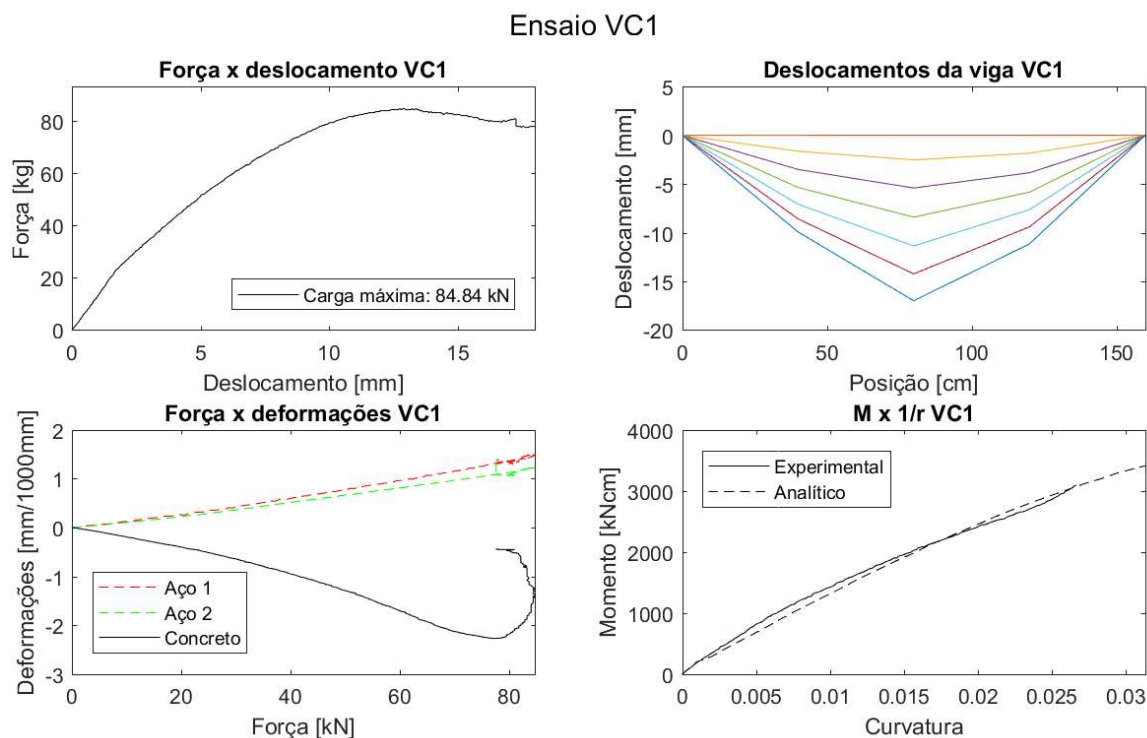
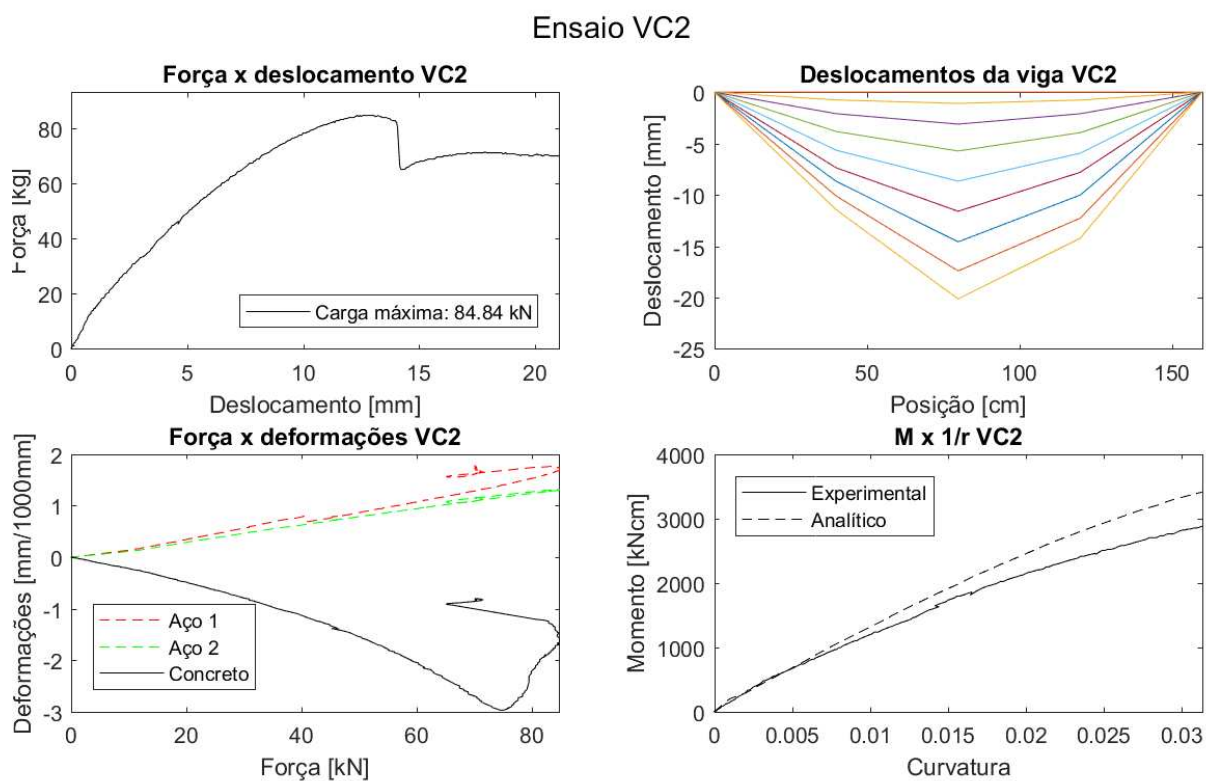


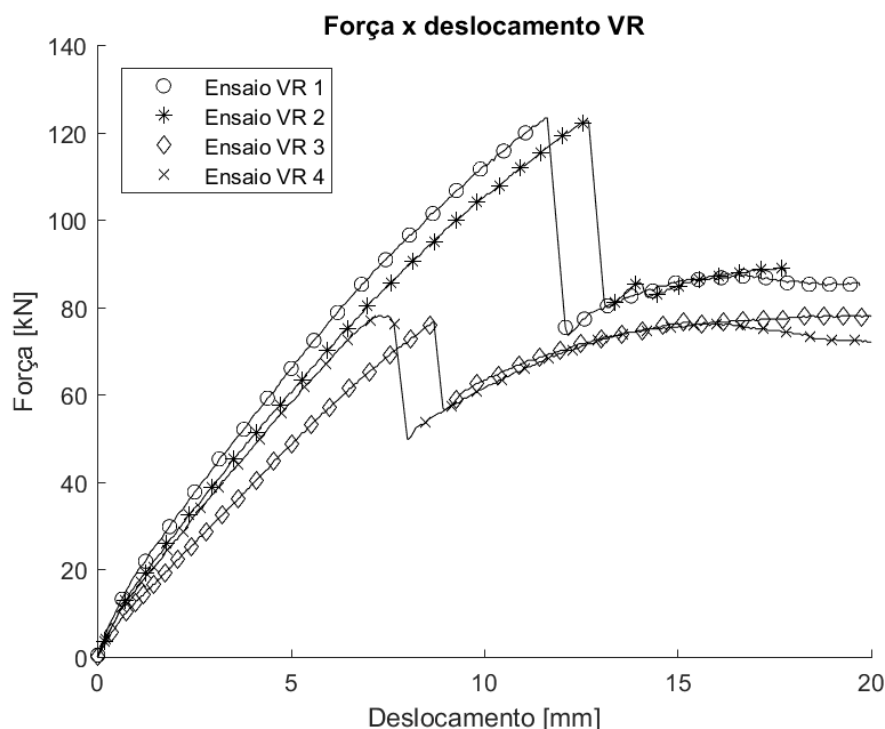
Figura 36 – resultados do ensaio VC2



Na segunda etapa dos testes, foram ensaiadas as vigas reforçadas. Conforme mencionado, devido à problemas na moldagem, duas das vigas apresentaram regiões onde o reforço apresentava espessura bastante reduzida. Assim, é possível dividir os resultados em duas partes: as vigas VR1 e VR2, com comportamento normal, e as vigas VR3 e VR4, com falha devido à espessura reduzida do reforço.

Primeiramente, para as vigas VR3 e VR4, os gráficos de força por deslocamento no centro do vão do ensaio e o gráfico de força pela leitura dos extensômetros são dados na Figura 37, juntamente com os resultados das vigas VR1 e VR2 a título de comparação. Destaca-se a falha precoce da viga, com desempenho bastante inferior às vigas VR1 e VR2. Após a ruptura, em ambas as vigas foi realizada a investigação da seção transversal onde ocorreu a falha, indicando que a altura da viga era inferior a 15 cm, e o reforço apresentava espessura de apenas 0,5 cm, dimensões que determinaram o tipo de falha.

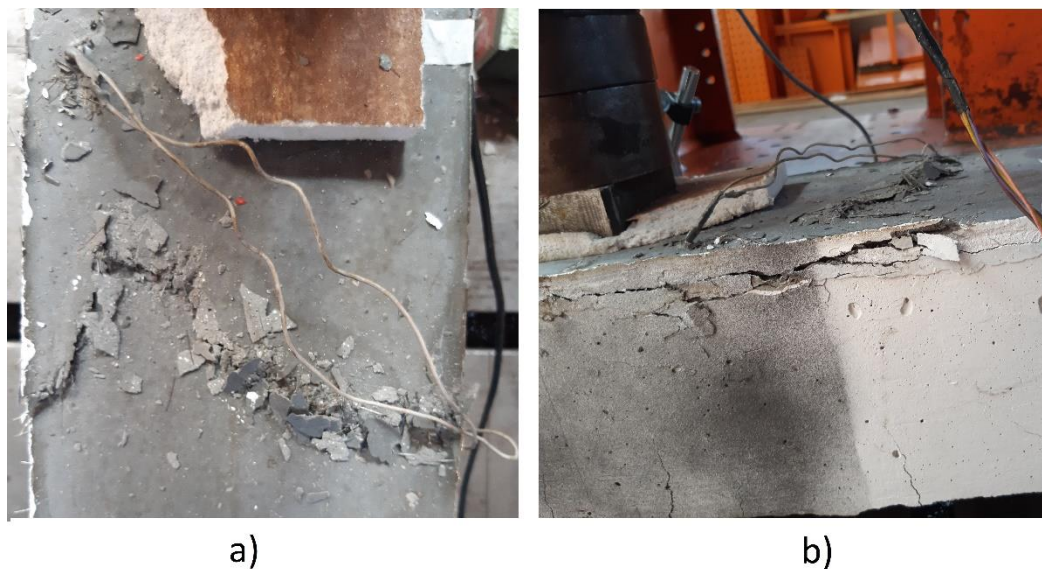
Figura 37 – gráficos de força por deslocamento de todas as VR



A partir destas características da seção foi realizado um estudo analítico, encontrando boa concordância entre o modo de ruptura e capacidade de carga. O cálculo analítico indica que, para a espessura encontrada na camada de reforço, a carga necessária para gerar o momento último desta seção (considerando a distância até o momento

máximo) é semelhante àquele encontrado experimentalmente. Além disso, o modelo indica que a falha ocorrerá por esmagamento do CUADRF, que pode ser observado na Figura 38.

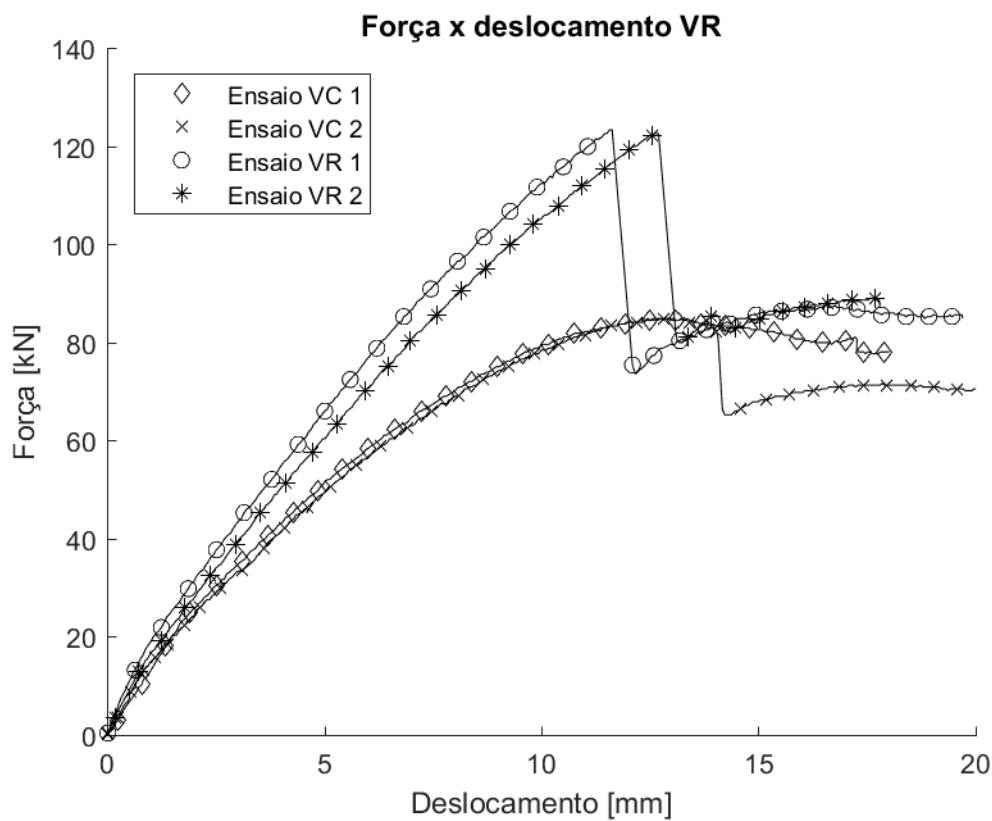
Figura 38 – falha de compressão na camada de reforço a) vista superior b) vista lateral



Além disso, após a ruptura, a viga voltou a recuperar a capacidade de carga, atingindo o patamar de resistência das vigas não-reforçadas com a dimensão reduzida, indicando que após a falha do reforço o comportamento estrutural assemelha-se à uma viga não reforçada, sem a contribuição do CUADRF para a resistência estrutural.

Para as vigas VR1 e VR2, o gráfico de força por deslocamento no centro do vão do ensaio, juntamente com os dados das vigas VC, é apresentado na Figura 39. Nota-se a diferença entre a viga reforçada e as vigas de controle, com ganho considerável na rigidez e na capacidade de carga, além de um comportamento estrutural bastante diferenciado, com uma resposta mais linear ao carregamento condizente com o comportamento descrito do CUADRF.

Figura 39 – comparação entre as vigas reforçadas e as de controle



Entretanto, diferentemente do esperado, a viga também apresenta comportamento frágil, embora este não ocorra devido ao esmagamento do concreto. Apesar de apresentar maior rigidez, capacidade de carga e de deformação, durante o ensaio foi observado que o fator que levou à ruína da viga foi o descolamento da camada de reforço, conforme pode ser observado na Figura 40. Assim, embora a suposição de que os materiais tenham aderência perfeita para o estudo analítico seja válida durante a maior parte do ensaio, o estado limite último fica caracterizado pelo descolamento do reforço. Este comportamento será discutido em detalhes posteriormente.

Figura 40 – falha por descolamento da camada de reforço



Os resultados dos ensaios das vigas são descritos individualmente nas Figura 41 a Figura 44. Observa-se que as vigas apresentam maior capacidade de deformação, mesmo com a falha repentina devido ao descolamento do reforço. Além disso, pela leitura dos extensômetros, o aço chega a atingir o patamar de escoamento, compatível com as previsões analíticas. Por fim, observando as comparações com os diagramas momento curvatura, observa-se que o cálculo analítico subestima levemente o que foi observado experimentalmente. Além disso, analiticamente a falha ocorre por ruptura do aço em tração, apresentando um grande patamar de escoamento, o que não foi observado experimentalmente. Mesmo assim, a boa concordância entre os cálculos analíticos e o observado experimentalmente até o ponto da falha é notável.

Figura 41 – resultados do ensaio VR1

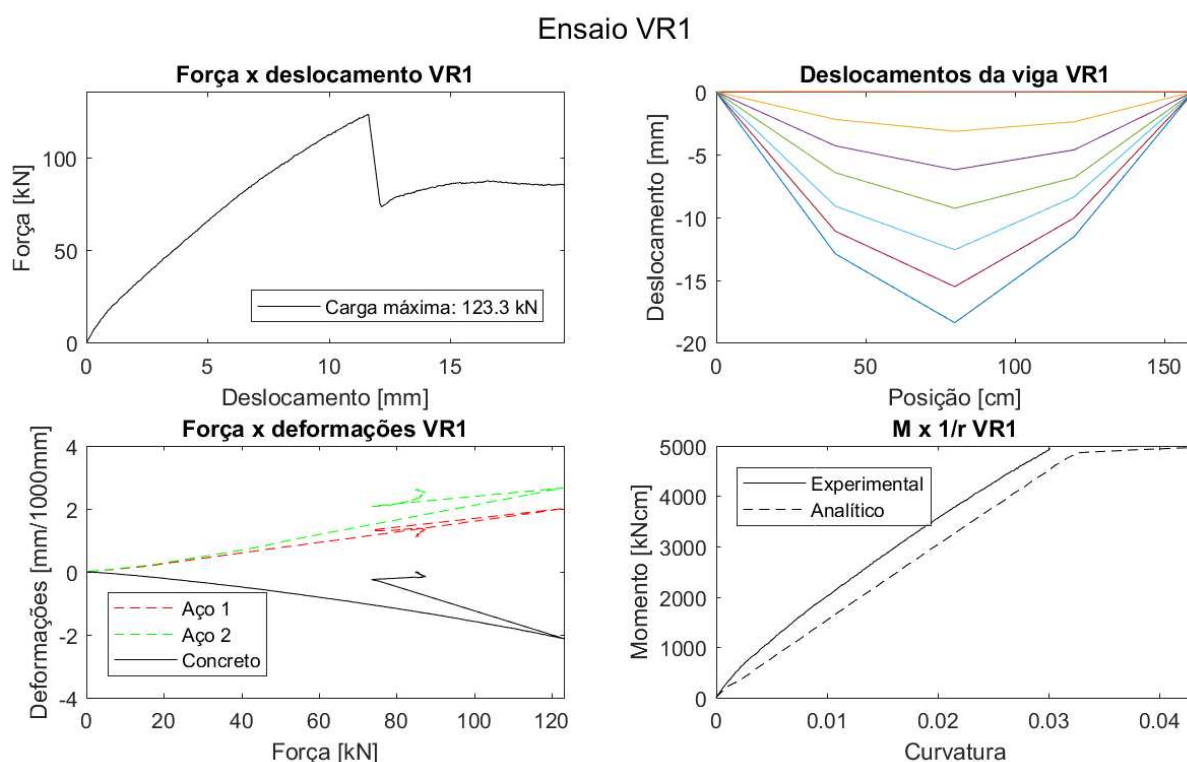


Figura 42 – resultados do ensaio VR2

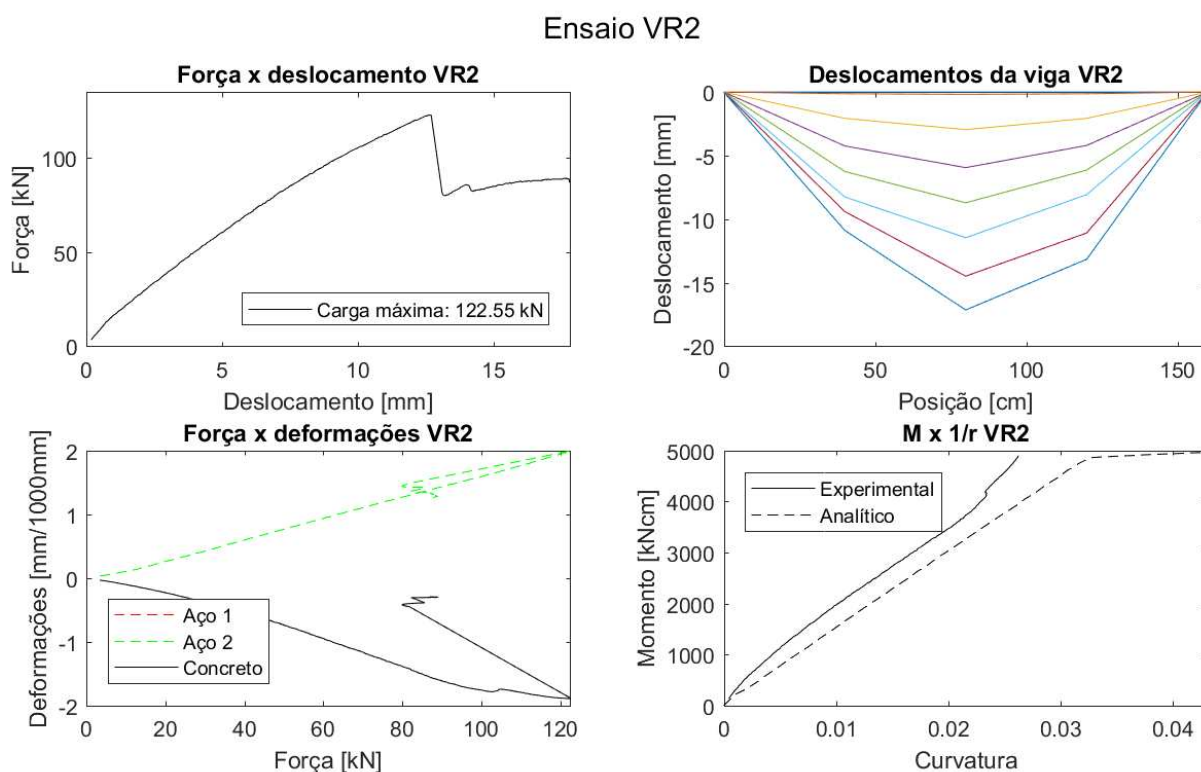


Figura 43 – resultados do ensaio VR3

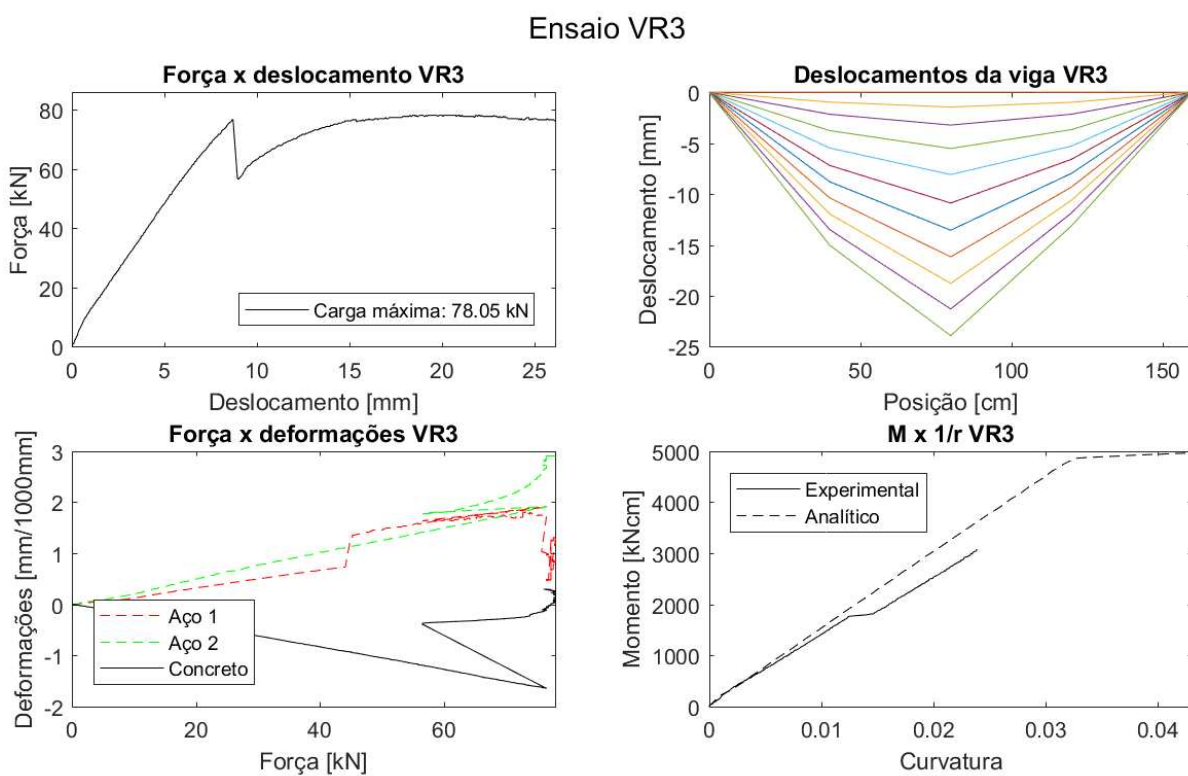
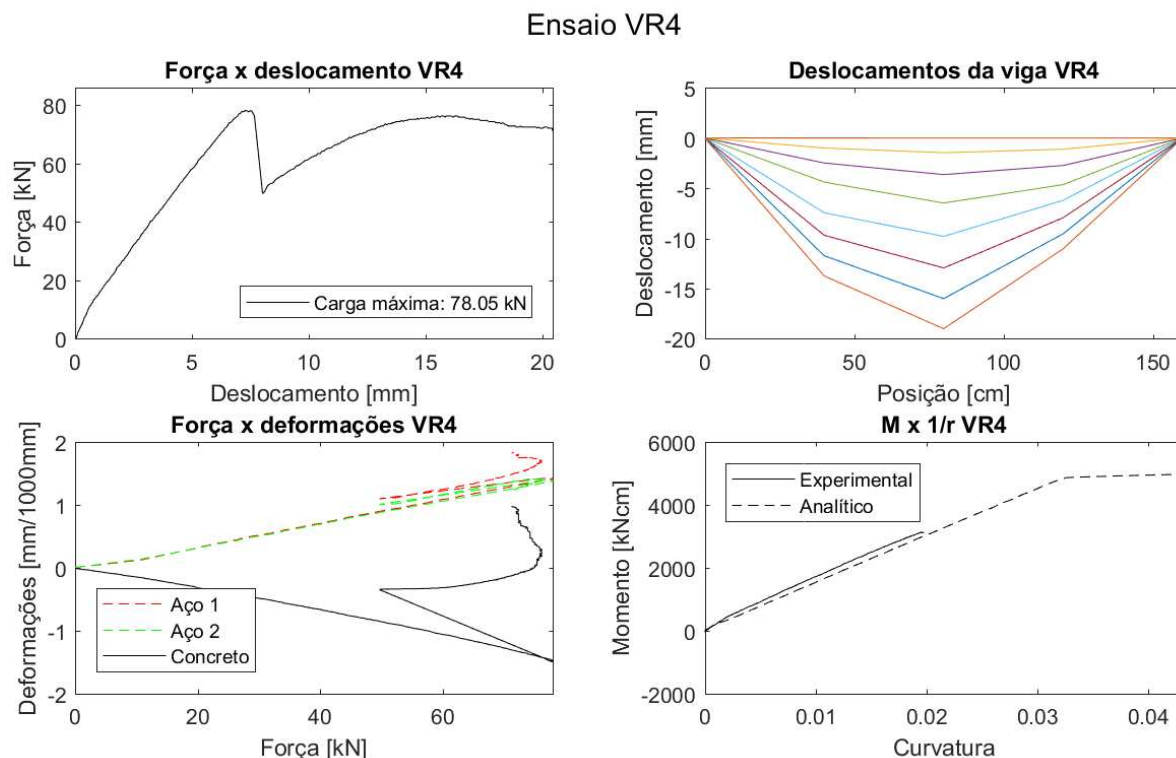


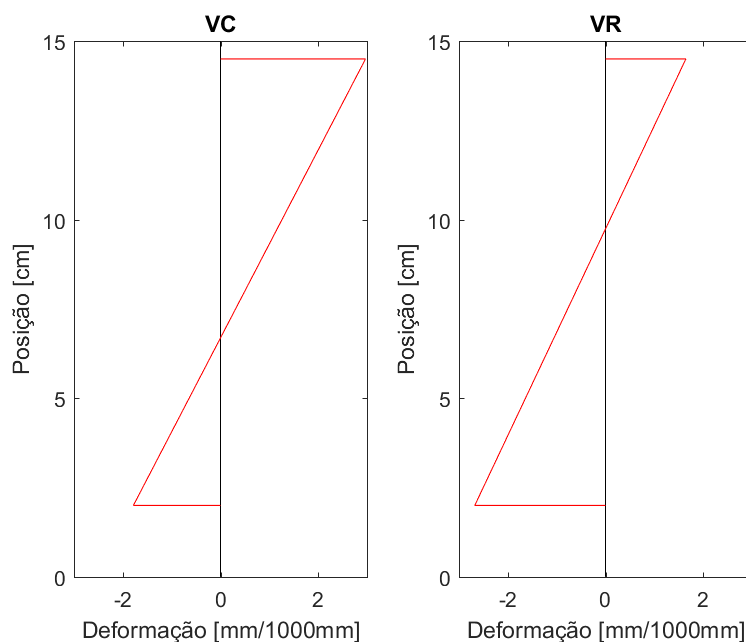
Figura 44 – resultados do ensaio VR4



Observando de modo geral os resultados obtidos, é possível destacar o potencial deste modo de reforço em vigas superarmadas. Um resumo comparativo é apresentado na Tabela 19. Primeiramente, destaca-se o ganho de resistência da viga. Observa-se dos resultados experimentais que a carga de ruptura da viga reforçada foi 44,9% superior à da viga de controle, ganho considerável e compatível com a previsão analítica. Os deslocamentos até o momento da ruptura da viga reforçada são bastante próximos com a viga de controle, sendo a diferença entre os valores desprezível, especialmente devido à diferença no modo de ruptura.

Além disso, a partir das leituras dos extensômetros, foi possível atingir o ponto de escoamento do aço com deformações significativamente inferiores do CUADRF no reforço, indicando um melhor aproveitamento dos materiais. Utilizando as leituras nos extensômetros no ensaio, é possível comparar a posição da linha neutra experimental dos dois tipos de vigas. No momento da ruptura, a distribuição de deformações experimental é apresentada na Figura 45. A posição da linha neutra da viga VC é de $\beta = 0,63$, e da viga VR é de $\beta = 0,38$, demonstrando a capacidade que o reforço tem de promover a redistribuição de esforços.

Figura 45 – distribuição de deformações experimental na ruptura



Outro ponto importante é o significativo ganho de rigidez da viga, sendo rigidez à flexão a relação entre o momento aplicado e a curvatura da viga. Considera-se a curvatura como sendo a relação entre a soma das deformações do aço e do concreto e a distância entre estes pontos (suposições compatíveis com àquelas descritas anteriormente e confirmadas pelos resultados experimentais). Assim, é possível comparar o valor da rigidez da viga tomando-se um ponto de referência como o valor $0,9xM_u$ para o cálculo. A partir deste procedimento, é encontrado um aumento de 32%, valor significativo levando em conta que a viga apresenta seção transversal com dimensões iguais à viga original e uma camada de reforço com altura de 2 cm.

Tabela 19 – comparação dos resultados

Tipo	Carga	Deslocamento	Rigidez
VC	84,8 kN	12mm	$1,14 \times 10^3 \text{ kNm}^2$
VR	123,3 kN	11mm	$1,50 \times 10^3 \text{ kNm}^2$
Aumento	+44,9%	-8%	+32%

5.3. Discussão da falha por descolamento do reforço

Como o intuito da introdução do reforço na região comprimida em vigas superarmadas é alterar seu modo de ruptura, é importante analisar a ductilidade da viga reforçada. Entretanto, conforme mencionado, foi encontrada uma ruptura frágil devido ao descolamento da camada de reforço. Assim, é necessário compreender os mecanismos para a ocorrência desta falha para que este tipo de reforço seja corretamente aplicado.

Durante o ensaio, foi observado que a ruína da viga ocorre simultaneamente à propagação de fissuras de cisalhamento atingindo a camada de reforço. Em virtude da geometria da viga, especialmente da camada de reforço, cuja interface coincide com a armadura de compressão da viga, este arranjo se torna especialmente susceptível a este tipo de falha, já que as fissuras de cisalhamento atingem facilmente a interface.

De acordo com a literatura (TENG et al., 2003), a fissura, que dissipa energia ao se propagar, ao atingir a interface entre os materiais transfere as tensões de tração diretamente para a camada de reforço abruptamente. Como consequência disso, altas tensões são induzidas na interface devido à rápida liberação de energia, o que gera uma tensão crítica na interface e nos materiais próximos a ela. É observada então a propagação da fissura ao longo da interface, através do material menos resistente, no caso, o concreto convencional. Neste tipo de falha, é comum a observação de uma fina camada concreto ainda aderida à camada de reforço após a falha, evidenciando que a fissuração ocorre no substrato em regiões próximas à interface (TENG et al., 2003; YAO; TENG; LAM, 2005). Conforme pode ser observado na Figura 46, a parte inferior da placa de CUADRF apresenta uma camada do substrato aderida após a falha.

Figura 46 – vista inferior da placa de CUADRF após a falha



Outro fator agravante para a indução da falha da interface é o incremento das tensões de cisalhamento próximos à interface. A introdução de um elemento de maior rigidez na parte superior da viga tem a tendência de fazer com que a linha neutra se encontre em uma profundidade menor. Assim, especialmente dentro do regime elástico, é possível observar que as tensões de cisalhamento tenham valores maiores em posições mais próximas da interface. Assim, à medida que o carregamento aumenta, a tendência é que as fissuras de cisalhamento ocorram na parte superior da viga, mais próximas da interface.

Este comportamento é observado em modelos simplificados em duas dimensões a partir de métodos de seção transformada para análise em regime elástico e análise não linear em modelo 2D simplificado no software ATENA. Todos os modelos indicam aumentos na tensão de cisalhamento da ordem de 20% na região mais crítica da viga (próximo da interface), além da alteração da posição da máxima tensão de cisalhamento da altura $\beta = 0,5$ para $\beta = 0,15$.

De fato, conforme discutido por Fusco (2008), o comportamento de viga só será substituído pelo comportamento de treliça no caso do cisalhamento com a existência de fissuras delimitando as bielas de compressão. Assim, a propagação destas fissuras é fundamental para a ativação dos estribos, o que permite continuar incremento do carregamento nas vigas. No caso das vigas reforçadas discutidas, entretanto, a propagação destas fissuras também é o mecanismo de falha da viga, que ocasiona o descolamento da camada de reforço.

No caso das vigas VR1 e VR2, este comportamento foi observado durante o ensaio. À medida que o carregamento aumenta e o aço da viga se aproxima do escoamento, são observadas as primeiras fissuras de flexão. O aumento destas fissuras e a redução gradual da rigidez da viga faz com que também se iniciem as fissuras resultantes da interação momento-cortante, levando a viga ao colapso pelo fenômeno discutido.

Assim, é necessário observar atentamente o reforço na região comprimida de vigas de concreto armado. A introdução de materiais com maior rigidez nesta região pode alterar o comportamento das tensões de cisalhamento da viga, o que interfere diretamente na interface entre os materiais e pode levar ao colapso frágil da viga. No caso estudado especificamente, a geometria adotada foi fundamental para ocorrência

deste tipo de falha, já que a propagação das fissuras de cisalhamento ocorre quase simultaneamente com o escoamento do aço, com a seção próxima da ruína por flexão. Caso fosse adotado um vão maior, a falha por descolamento poderia não ter ocorrido.

Outro fator agravante para que esta falha ocorresse no problema específico estudado foi a opção por simular uma substituição do cobrimento. Como a interface entre o reforço e o substrato se posicionou muito próximo da armadura de compressão, a fissura de cisalhamento rapidamente atinge a parte superior da viga e permite a propagação instável da fissura ao longo da interface.

5.4. Discussão

Em vista dos resultados apresentados, é possível concluir que a utilização do CUADRF como material para reforço de vigas superarmadas é viável. As excepcionais propriedades mecânicas e sua grande durabilidade, juntamente com a possibilidade de moldagem no local tornam este material um excelente candidato para obras de reforço.

Os resultados analíticos e experimentais indicam um substancial ganho de resistência e rigidez da viga (45% e 32%, respectivamente), alterando o modo de ruptura das vigas originais, que ocorria por esmagamento do concreto. Durante o ensaio, também foi observado o início do escoamento do aço nas vigas reforçadas, comportamento desejável e esperado. Além disso, os modelos analíticos propostos foram capazes de representar fielmente a capacidade de carga, a rigidez e os deslocamentos observados experimentalmente.

O significativo ganho de capacidade resistente da viga foi potencializado pela escolha do reforço em vigas superarmadas, típica situação de subutilização do aço. Em vigas normalmente armadas, tal reforço não resultaria em ganhos significativos de resistência, porém a utilização do CUADRF na região comprimida de tais vigas ainda pode contribuir com maior resistência, maior ductilidade e menores deformações no concreto convencional.

A observação mais notável dos ensaios foi o modo de ruptura das vigas. Embora a adição de uma camada de reforço na região comprimida de vigas superarmadas tenha o intuito de aumentar a ductilidade, hipótese que é sustentada pelo modelo analítico, na prática foi observada uma ruptura frágil por descolamento da camada de reforço.

No início do escoamento do aço tracionado, o aumento da deformação dos materiais e a correspondente fissuração na viga iniciaram um processo de fissuração instável na interface entre os materiais, levando à ruína da viga, comportamento inesperado e indesejável.

Este processo foi desencadeado por uma combinação de fatores presentes na viga ensaiada. A introdução de um elemento com maior rigidez na parte superior da viga altera a posição da linha neutra, como esperado. Entretanto, esta mudança também altera a posição das máximas tensões de cisalhamento no concreto, ficando mais próximas da interface. No início do aparecimento das fissuras resultantes da interação de cortante e momento, tipicamente inclinadas em relação ao eixo vertical, iniciou-se o processo de fissuração descrito que levou ao descolamento completo da camada de reforço, que permaneceu intacta. A solução deste problema consiste na introdução de conectores de cisalhamento, garantindo a transferência de tensões entre os dois materiais e impedindo a propagação da fissura, uma vez que não ocorrerá uma diferença brusca nas tensões entre os materiais no momento em que as fissuras atingirem a interface. Neste caso, a ruptura da interface pode ser evitada, permitindo a fissuração dos materiais e a iniciação do comportamento de treliça da viga, com ativação efetiva das armaduras transversais, aumento da deformação dos materiais e aumento da ductilidade da viga.

Além disso, como o reforço proposto consiste na substituição do cobrimento na região comprimida, a interface entre o substrato e o reforço estavam muito próximos da armadura longitudinal, influenciando negativamente a aderência entre os materiais. Idealmente, o CUADRF deveria envolver a armadura comprimida, ou situar-se acima da armadura longitudinal, não interferindo na aderência entre o substrato e o aço e reduzindo o efeito da fissuração na interface entre os materiais. Neste caso, é interessante a utilização de algum mecanismo mais eficiente para a transferência de tensões, como o uso de conectores de cisalhamento. Outra opção a ser explorada é a realização do reforço em vigas realizando uma exposição da parte superior dos estribos, com remoção do concreto do substrato até maiores profundidades. A concretagem do reforço envolvendo as armaduras longitudinais comprimidas e armaduras transversais pode se mostrar como uma alternativa para garantir a aderência entre os materiais.

Portanto, o método proposto de reforço para vigas superarmadas é viável e pode ser melhorado levando em conta as limitações observadas. Com um método eficiente de transferência de tensões entre o substrato e o reforço e evitando-se uma falha por descolamento da camada de CUADRF, é possível atingir o escoamento do aço tracionado e aproveitar eficientemente as propriedades mecânicas do CUADRF, otimizando a utilização dos materiais e aumentando significativamente a capacidade de deformação da viga.

6. Conclusões

Este trabalho avaliou a aplicação do concreto de ultra alto desempenho como material de reforço em vigas de concreto armado superarmadas. Foram discutidas as propriedades mecânicas e de durabilidade do material, destacando sua aplicabilidade no reforço de vigas de concreto armado.

Foi utilizado o método modificado de Andreasen e Andersen (FUNK; DINGER, 1994) de empacotamento de partículas para determinação do traço do CUAD a partir da granulometria dos componentes adotados e encontrado um traço com bom ajuste à curva com empacotamento ótimo ($R^2 = 0,95$). As dosagens ideais de superplastificante e a relação ótima de água/cimento foram encontradas empiricamente. No estudo experimental, foram encontradas resistências à compressão máximas da ordem de 140 MPa e resistências à tração da ordem de 11 MPa.

Foi desenvolvido um modelo analítico para avaliação da relação momento curvatura de vigas reforçadas, encontrando boa concordância entre os resultados experimentais.

Considerando a aplicação do CUADRF como reforço de vigas, foi estudado analítica e experimentalmente o reforço de vigas de concreto armado superarmadas, sendo analisado o caso de substituição do cobrimento na região comprimida por uma camada de 2 cm de CUADRF. O método de reforço se mostrou muito eficiente, com aumento de 45% na carga última da viga e 32% na rigidez utilizando somente uma camada de espessura reduzida do material, levando a uma melhor utilização dos materiais, já que o escoamento do aço foi atingido. Entretanto, foi observada uma ruptura frágil da viga, por descolamento da camada de reforço, comprometendo a ductilidade da viga. Tal ruptura foi ocasionada por um aumento das tensões de cisalhamento na região superior da viga e consequentemente o aparecimento de fissuras resultantes da interação momento cortante próximo à interface, desencadeando um processo de fissuração instável ao longo da interface.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho, o autor sugere os possíveis caminhos para ampliação do conhecimento neste tópico:

- Aprimoramento do modelo numérico, utilizando condições de contorno e propriedades dos materiais mais realistas, podendo também considerar o comportamento da interface. Tais estudos podem representar o caso de modo mais realista e possibilitar uma avaliação detalhada de todos os fatores que levam a uma falha da interface.
- Ampliação do estudo experimental de vigas superarmadas, considerando diferentes dimensões da viga original, diferentes configurações de reforço e diferentes métodos para garantir a aderência da camada de reforço (conectores de cisalhamento, adesivo estrutural) para avaliar as condições exatas e os parâmetros relevantes para existência da falha por descolamento do reforço.
- Estudo do reforço com CUADRF na região tracionada e/ou nas laterais da viga (jaqueta de reforço), com ou sem uso de armadura adicional.

Referências

- ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 271–295, 2016.
- ABNT. **NBR 15530 - Fibras de aço para concreto - Especificações**Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- ABNT. **NBR 11768 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- AFGC-SETRA. **Ultra high performance fibre reinforced concretes**Bagneux, France, 2002.
- AHMED, Omar; GEMERT, Dionys Van; VANDEWALLE, Lucie. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams. v. 23, p. 3–19, 2001.
- AÏTCIN, Pierre-Claude. **High-Performance Concrete**. Second ed. London and New York: E & FN SPON, 2004.
- AÏTCIN, Pierre-Claude; NEVILLE, Adam. High-performance concrete demystified. **Concrete International**, v. 15, n. 1, p. 21–26, 1993.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Concrete Terminology - An ACI Standard. p. 32, 2013. Disponível em: <www.concrete.org>
- ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**. Third ed. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-1740-4>>
- ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.
- ATTA, Ahmed Mohamed; KHALIL, Abd El-hakim. Improving the Failure Mode of Over-Reinforced Concrete Beams Using Strain-Hardening Cementitious Composites. v. 30, n. 5, p. 1–11, 2016.
- AZEVEDO, Aires Fernando Fernandes Leite Camões De. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. 2002. Universidade do Minho, 2002.
- BACHE, H. H. Densified cement ultra-fine particle-based materials. In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPER-PLASTICIZERS IN CONCRETE 1981, Ottawa. **Anais...** Ottawa
- BACHE, H. H. Introduction to compact reinforced composite. **Cement and Concrete Laboratory**, n. 17, 1987.

BAHRAQ, Ashraf Awadh et al. Experimental and Numerical Investigation of Shear Behavior of RC Beams Strengthened by Ultra-High Performance Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 13, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40069-018-0330-z>>

BARNES, Richard Andrew; MAYS, Geoffrey Charles. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 2 - Design guidelines. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 6, p. 403–411, 2006.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007.

BERGMANN, N. B. B. et al. Reforço estrutural de vigas com concreto de ultra-alto desempenho contendo adição híbrida de fibras. In: ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2017, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** Bento Gonçalves, RS: IBRACON, 2017.

BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 40, n. 2, p. 189–199, 2007.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K. Flexural strength and porosity of cement. **Nature**, v. 289, n. 5796, p. 388–390, 1981.

BRANDÃO, Jefferson Heleno. **Análise Experimental E Numérica De Cascas De Concreto De Ultra-Alto Desempenho Reforçado Com Fibras**. 2005. 2005.

BROUWERS, H. J. H. Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. **Physical Review E**, v. 74, n. September, p. 1–15, 2006.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116–2136, 2005.

BRÜHWILER, Eugen; DENARIÉ, Emmanuel. Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. In: THE SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2008, Kassel, Germany. **Anais...** Kassel, Germany Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/121449/files/Paper_Brühwiler_Denarié_UHPC_Kassel.pdf>

BRÜHWILER, Eugen; DENARIÉ, Emmanuel; HABEL, Katrin. Ultra-High performance reinforced concrete for advanced rehabilitation of Bridges. In: KEEP CONCRETE ATTRACTIVE 2005, Budapest. **Anais...** Budapest

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, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 957–971, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983->

41952017000400957&lng=en&tlng=en>

CALDARONE, Michael A. **High-Strength Concrete - a practical guide**. First ed. : CRC Press, 2009.

CARBONELL MUÑOZ, Miguel A. et al. Bond Performance between Ultrahigh-Performance Concrete and Normal-Strength Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 8, p. 04014031, 2014. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000890>>

CASAGRANDE, César Augusto. **Desempenho de microfibras de aço funcionalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras**. 2017. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

CHALIORIS, Constantin E.; THERMOU, Georgia E.; PANTAZOPOULOU, Stavroula J. Behaviour of rehabilitated RC beams with self-compacting concrete jacketing - Analytical model and test results. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 257–273, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.031>>

CHEN, Yixin; YU, Jing; LEUNG, Christopher K. Y. Use of high strength Strain-Hardening Cementitious Composites for flexural repair of concrete structures with significant steel corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 325–337, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.009>>

COLLEPARDI, S. et al. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. **ACI Special Publication**, v. 173, n. 1, p. 1–22, 1997.

COLLEPARDI, S. et al. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete. **ACI Journal**, v. 186, p. 503–524, 1999. Disponível em: <http://www.encosrl.it/enco_srl_ITA/servizi/pdf/high/19.pdf>

COPPOLA, L. et al. Influence of the Sulfate Level in the Clinker Phase on the Performance of Superplasticized Concretes. In: (V. M. Malhotra, Ed.) **FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY 1998**, **Anais...** : American Concrete Institute, 1998.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão - volume I**. Lisboa: Laboratório nacional de Engenharia Civil, 2006.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Science**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

DEL VISO, J. R.; CARMONA, J. R.; RUIZ, G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 3, p. 386–395, 2008.

DING, Yao et al. Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 102–115, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.122>>

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concretes. **Materials and Structures**, v. 29, n. 4, p. 233–240, 1996. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1007/BF02485945>>

FÉRET, R. Sur la compacité des mortiers hydrauliques. **Annales du ponts Chaussée**, v. 4, n. 2, p. 5–161, 1892.

FERNANDES, Diogo Amaro Freitas. **A aplicação estrutural de betões de elevado desempenho (HPC e UHPC)**. 2011. Universidade Nova de Lisboa, 2011.

FERRIER, E. et al. Mechanical behaviour of ultra-high-performance short-fibre-reinforced concrete beams with internal fibre reinforced polymer bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 68, p. 246–258, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.001>>

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projeto com fibras de aço**. 1997. Universidade de São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, Antonio domingues De. **Concreto Reforçado Com Fibras**. 2011. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

FULLER, William B.; THOMPSON, Sanford E. The laws of proportioning concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. LIX, n. 2, p. 67–143, 1907.

FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. : Springer Science & Business Media, 1994.

FURNAS, C. C. Grading Aggregates: I—Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 23, n. 9, p. 1052–1058, 1931.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Estruturas de concreto: solitações tangenciais**. São Paulo, Brasil: Editora PINI, 2008.

GANESH, P.; RAMACHANDRA MURTHY, A. Simulation of surface preparations to predict the bond behaviour between normal strength concrete and ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118871, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118871>>

GONNERMAN, H. Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete. In: ASTM INTERNATIONAL V.25 1925, **Anais...** [s.l: s.n.]

GOODSPEED, Charles H.; VANIKAR, Suneel; COOK, Raymond. High-Performance Concrete Defined For Highway Structures. **Concrete International**, v. 18, n. 2, p. 62–67, 1996.

GRAYBEAL, B. A.; DAVIS, M. Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa UHPFRC. **Aci Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 603–609, 2008. Disponível em: <http://www.ductal-lafarge.fr/SLib/1-ACI Materials Journal_Cylinder or Cube-Strength Testing_Ben Graybeal and Marshall Davis_Dec 2008.pdf>

GRAYBEAL, Benjamin; TANESI, Jussara. Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 10, p. 848–854, 2007.

HABEL, Katrin. **Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete**. 2004. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.

HABEL, Katrin et al. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1362–1370, 2006.

HABEL, Katrin; DENARIÉ, Emmanuel; BRÜHWILER, Eugen. Experimental Investigation of Composite Concrete and Conventional Concrete Members. **ACI Structural Journal**, n. 104, p. 93–101, 2007.

HADDAD, R. H.; AL-MEKHLAFY, N.; ASHTEYAT, A. M. Repair of heat-damaged reinforced concrete slabs using fibrous composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1213–1221, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.033>>

HARRIS, Devin; SARKAR, Jayeeta; AHLBORN, Theresa. Characterization of Interface Bond of Ultra-High-Performance Concrete Bridge Deck Overlays. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2240, n. 2240, p. 40–49, 2011. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2240-07>>

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 874–882, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>>

HILLERBORG, A. Analysis of fracture by means of the fictitious crack model, particularly for fibre reinforced concrete. **The international journal of cement composites**, v. 4, n. 2, p. 177–184, 1980.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 6, p. 773–781, 1976.

HUNGER, Martin. **An integral design concept for ecological self-compacting concrete**. 2010. Eindhoven University of Technology, 2010.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1246–1259, 2008.

HÜSKEN, Götz. **A multifunctional design approach for sustainable concrete with application to concrete mass products**. 2010. 2010.

HUSSEIN, Mohamed; KUNIEDA, Minoru; NAKAMURA, Hikaru. Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1061–1066, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.004>>

ISKHAKOV, I. et al. High performance repairing of reinforced concrete structures. **Materials and Design**, v. 44, p. 216–222, 2013. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.041>>

JSCE. **Recommendations for design and construction of ultra-high strength fiber reinforced concrete structures (draft)** Tokyo, Japan, 2004.

JÚLIO, E. S.; BRANCO, F.; SILVA, V. D. Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 5, n. 1, p. 29–37, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pse.140>>

KAMAL, Ahmed et al. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 863–871, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.003>>

KAMEN, A. et al. UHPFRC tensile creep at early age. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 1, p. 113–122, 2009.

KANG, Su Tae et al. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. **Composite Structures**, v. 92, n. 1, p. 61–71, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.012>>

KARIHALOO, Bhushan Lal; BENSON, S. D. P.; ALAEE, F. J. Retrofitting of RC beams with CARDIFRC. **Journal of Composites for Construction**, v. 7, n. 3, p. 174–186, 2003. Disponível em: <<http://orca.cf.ac.uk/20936/>>

KCI. **Design recommendations for ultra-high performance concrete K-UHPC. KCI-M-12-003** Seoul, Korea, 2012.

KHALIL, A. B. D. El-hakim et al. Ductility Enhancement of RC Beams Strengthened with Strain Hardening Cementitious Composites. In: (S. O. Cheung et al., Eds.) MODERN METHODS AND ADVANCES IN STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION 2015, Zurich. **Anais...** Zurich

KHALIL, Abd El Hakim et al. Behavior of RC beams strengthened with strain hardening cementitious composites (SHCC) subjected to monotonic and repeated loads. **Engineering Structures**, v. 140, n. 2, p. 151–163, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.032>>

KHAYAT, K. H.; LIBRE, N. A. Roller Compacted Concrete - Field Evaluation and Mixture Optimization. **A National University Transportation Center at Missouri University of Science and Technology**, v. August, n. NUTC R363, p. 118, 2014.

KUNIEDA, Minoru et al. Enhancement of Crack Distribution of UHP-SHCC under Axial Tension Using Steel Reinforcement. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 1, p. 49–57, 2010.

LAMPROPOULOS, A. P. et al. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Engineering Structures**, v. 106, p. 370–384, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.042>>

LAMPROPOULOS, Andreas P.; TSIIOULOU, Ourania T.; DRITSOS, Stephanos E. Monolithic coefficient values for design when seismically strengthening RC columns with jackets. **Journal of Earthquake Engineering**, v. 16, n. 7, p. 1023–1042, 2012.

LEE, Ming Gin; WANG, Yung Chih; CHIU, Chui Te. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 182–189, 2007.

LI, V. C.; WANG, S.; WU, C. Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). **ACI Materials Journal**, v. 98, n. March, p. 483–492, 2001.

LI, Victor C. et al. Repair and retrofit with engineered cementitious composites. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 65, n. 2–3, p. 317–334, 2000.

MALLAT, A.; ALLICHE, A. A modified tensile test to study the behaviour of cementitious materials. **Strain**, v. 47, n. 6, p. 499–504, 2011.

MANSUR, M. A.; ISLAM, M. M. Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 2, p. 151–155, 2002.

MARTINOLA, Giovanni et al. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 731–739, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001>>

MEDA, Alberto; MOSTOSI, Serena; RIVA, Paolo. Shear strengthening of reinforced concrete beam with high-performance fiber-reinforced cementitious composite jacketing. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 5, p. 1059–1068, 2014.

MEHTA, P. kumar. Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments. In: (M. W. Grutzeck, S. L. Sarkar, Eds.) **ADVANCES IN CEMENT AND CONCRETE, PROCEEDINGS OF AN ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE 1994**, New York. **Anais...** New York: American Society of Civil Engineers, 1994.

NAAMAN, Antoine E.; WILLE, Kay. The path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five decades of progress. In: **HIPERMAT 2012 - 3RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UHPC AND NANOTECHNOLOGY FOR HIGH PERFORMANCE CONSTRUCTION MATERIALS 2012**, Kassel. **Anais...** Kassel

NAWA, T.; UCHI, H.; FUKAYA, Y. Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing a Superplasticizer. In: (V. M. Malhotra, Ed.) **3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE 1989**, **Anais...** : American Concrete Institute, 1989.

NEVILLE, Adam. **Properties of concrete**. 3rd. ed. New York: Burnt Mill: Longman Scientific & Technical, 1987.

OESTERLEE, Cornelius; DENARIÉ, Emmanuel; BRÜHWILER, Eugen. UHPFRC protection layer on the crash barrier walls of a bridge. In: **ADVANCES IN CONSTRUCTION MATERIALS 2007**, Berlin. **Anais...** Berlin Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-72448-3_20>

PARAMASIVAM, P.; LIM, C. T. E.; ONG, K. C. G. Strengthening of RC beams with ferrocement laminates. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 1, p. 53–65, 1998.

PIÉRARD, J.; DOOMS, B.; CAUBERG, N. Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests. In **Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany**, n. January 2012, p. 371–376, 2012. Disponível em: <<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=LufCDwJ-sacC&oi=fnd&pg=PA371&dq=Piérard,+J.,+Dooms,+B.,+and+Cauberg,+N.,+“Evaluation+of+Durability+Parameters+of+UHPC+Using+Accelerated+Lab+Tests,”+Proceedings+of+Hipermat+2012+3rd+Internati>>

PLISKIN, L. High performance concrete – engineering properties and code aspects. In: **High performance concrete – from material to structure**. London: E&FN SPON, 1992. p. 186–195.

RANADE, Ravi et al. Development of high strength high ductility concrete. In: 2ND INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON STRAIN HARDENING CEMENTITIOUS COMPOSITES 2011, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, Brasil

RANADE, Ravi et al. Composite Properties of High-Strength , High-Ductility Concrete. **ACI Materials Journal**, n. 110, p. 413–422, 2013.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

RIEDEL, Philipp et al. Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen an ultrahochfestem Beton. **Beton- und Stahlbetonbau**, v. 113, n. 8, p. 598–607, 2018.

RILEM-TC162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method. **Materials and Structures**, v. 36, n. 262, p. 560–567, 2003. Disponível em: <<https://www.rilem.net/boutique/fiche.php?cat=journal&reference=1507>>

ROBERTS, T. M.; HAJI-KAZEMI, H. Theoretical study of the behaviour of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 87, n. 1, p. 39–55, 1989.

ROSSI, P. High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): the LCPC experience. **Materials Journal**, v. 94, n. 6, p. 478–783, 1997.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Experimental study of durability of reactive powder concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 8, n. February, p. 1–6, 1996.

RUSSEL, H. G. ACI defines high performance concrete. **Concrete International**, v. 21, n. 2, p. 56–57, 1999.

SAFDAR, Muhammad; MATSUMOTO, Takashi; KAKUMA, Ko. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). **Composite Structures**, v. 157, p. 448–460, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.010>>

SAKR, Mohammed A. et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using prefabricated ultra-high performance fiber reinforced concrete plates: Experimental

and numerical investigation. **Structural Concrete**, v. 20, n. 3, p. 1137–1153, 2019.

SAMARIS. **Full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges – from the lab to the field**, 2005.

SANTOS, F. L. Gea Dos; SOUSA, J. L. A. O. Determination of parameters of a viscous-cohesive fracture model by inverse analysis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, p. 669–706, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952015000500007&lng=en&nrm=iso&tlng=en>

SHAH, Surendra P. High performance concrete – workability, strength and durability. In: (Christopher K. Y. Leung, Zongjin Li, Jian-Tong Ding, Eds.) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ORGANIZED BY THE HONG KONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY AND SHENZHEN UNIVERSITY 2002, Hong Kong and Shenzhen. **Anais...** Hong Kong and Shenzhen

SHEHATA, Ibrahim Abd El Malik et al. Strengthening of reinforced concrete beams in flexure by partial jacketing. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 4, p. 495–504, 2009.

SMITH, S. T.; TENG, J. G. Interfacial stresses in plated beams. v. 23, p. 857–871, 2001.

SOUDKI, K.; ALKHRDAJI, T. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-02). In: STRUCTURES CONGRESS 2005, **Anais...** [s.l.: s.n.]

TAYEH, Bassam A. et al. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 538–548, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013>>

TAYEH, Bassam A. et al. Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation a review. **Procedia Engineering**, v. 54, p. 525–538, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.048>>

TENG, J. G. et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. v. 17, n. 03, p. 447–462, 2003.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. **Materials and Design**, v. 36, p. 880–888, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.022>>

TSIOULOU, Ourania T.; LAMPROPOULOS, Andreas P.; DRITSOS, Stephanos E. Experimental investigation of interface behaviour of RC beams strengthened with concrete layers. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 50–59, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.093>>

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. Concreto de Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. : IBRACON, 2011.

UCHIDA, Y. et al. Determination of Tension Softening Diagrams Various Kinds of Concrete By Means of Numerical Analysis. In: FRACTURE MECHANIS OF CONCRETE STRUCTURE, FRAMCOS-2 1995, Freiburg, Germany. **Anais...** Freiburg, Germany: AEDIFICA TIO Publishers, 1995. Disponível em: <<https://framcos.org/FraMCoS-2/1-1-2.pdf>>

VANDERLEI, Romel Dias. **Análise experimental do concreto de pós-reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. Universidade de São Paulo, 2004.

WANG, Jialai; ZHANG, Chao. Nonlinear fracture mechanics of flexural – shear crack induced debonding of FRP strengthened concrete beams. v. 45, p. 2916–2936, 2008.

WANG, Wei et al. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. **Cement and Concrete Research**, v. 55, p. 1–13, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008>>

WILLE, Kay; KIM, Dong Joo; NAAMAN, Antoine E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 3, p. 583–598, 2011.

WILLE, Kay; NAAMAN, Antoine E.; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 1, p. 46–54, 2011.

YANG, In-Hwan; JOH, Changbin; KIM, Byung-Suk. Flexural strength of large-scale ultra high performance concrete prestressed T-beams. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 11, p. 1185–1195, 2011.

YANG, In Hwan; JOH, Changbin; KIM, Byung Suk. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. **Engineering Structures**, v. 32, n. 11, p. 3478–3487, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.017>>

YAO, J.; TENG, J. G.; LAM, L. Experimental Study on Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Flexural Members. v. 8, n. 4, p. 365–396, 2005.

YI, Seong T.; YANG, Eun I.; CHOI, Joong Cheol. Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. **Nuclear Engineering and Design**, v. 236, n. 2, p. 115–127, 2006.

YIN, Hor; SHIRAI, Kazutaka; TEO, Wee. Numerical model for predicting the structural response of composite UHPC–concrete members considering the bond strength at the interface. **Composite Structures**, v. 215, n. February, p. 185–197, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.040>>

YOO, Doo Yeol; BANTHIA, Nemkumar; YOON, Young Soo. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. **Engineering Structures**, v. 111, p. 246–262, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.003>>

YOO, Doo Yeol; KANG, Su Tea; YOON, Young Soo. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 67–81, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.007>>

YOO, Doo Yeol; LEE, Joo Ha; YOON, Young Soo. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. **Composite Structures**, v. 106, p. 742–753, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.033>>

YOO, Doo Yeol; YOON, Young Soo. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. **Engineering Structures**, v. 102, p. 409–423, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.029>>

YU, Ke Quan et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. **Construction and Building Materials**, v. 158, n. January, p. 217–227, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>>

YU, Kequan et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 410–419, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.060>>

YU, Q. L.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of cement-based lightweight composites - Part 1: Mix design methodology and hardened properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 17–29, 2013.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613002275>>

YUAN, Ying-Su; MAROSSZEKY, Marton. Restrained shrinkage in repaired reinforced concrete elements. **Materials and Structures**, v. 27, p. 375–382, 1994.

YUAN, Yingshu; LI, Guo; CAI, Yue. Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 347–352, 2003.

ZANUY, Carlos; ULZURRUN, Gonzalo S. D. Bending model for composite UHPFRC-RC elements including tension stiffening and crack width. **Engineering Structures**, v. 209, n. October 2019, p. 109958, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109958>>

ZHANG, Yang et al. Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 347–359, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.229>>

ZHOU, Jian et al. Modelling of stresses and strains in bonded concrete overlays subjected to differential volume changes. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 49, n. 2, p. 199–205, 2008.

ZHU, Yanping 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, n. November 2019, p. 110035, 2020. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>>

ZHU, Yanping et al. Numerical modeling for damaged reinforced concrete slab

strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer. **Engineering Structures**, v. 209, n. May 2019, p. 110031, 2020. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110031>>

ZIA, P. et al. **Mechanical Behavior of High-Performance Concretes, Volume 1: Summary Report**. Washington, DC: SHRP-C-361, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.

ZIA, P.; AHMAD, S. H.; LEMING, M. L. **High-performance concretes: a state-of-art report (1989-1994)**. Washington, DC: FHWA, 1997. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/97030/index.cfm>>