

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Larissa Azevedo Curty

**Estudo Experimental dos Consoles Curtos de Concreto
Armado Reforçados com Compósitos de Fibras de
Carbono**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Marta de Souza Lima Velasco
Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro, Agosto de 2009

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Larissa Azevedo Curty

Estudo Experimental dos Consoles Curtos de Concreto Armado Reforçados com Compósitos de Fibras de Carbono

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Marta de Souza Lima Velasco

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Co-orientador

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFF

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Julio Jerônimo Holtz Silva Filho

Avantec

Prof. Luiz Antonio Vieira Carneiro

Instituto Militar de Engenharia – IME

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Agosto de 2009

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

Larissa Azevedo Curty

Graduou-se em Engenharia Civil na UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro).

Ficha Catalográfica

Curty, Larissa Azevedo.

Estudo experimental dos consoles curtos de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de carbono / Larissa Azevedo Curty ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Souza Sánchez Filho. – 2009.

193 f. : il (col) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Console curto. 3. Compósitos de fibra de carbono. 4. Reforço estrutural. 5. Análise experimental. 6. Concreto armado. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu pai e amigo de profissão Emar por suas palavras de incentivo, carinho e amor.

A minha amada mãe Regina pelo sua compreensão e dedicação fundamentais para o término desta dissertação.

Ao meu querido namorado Magnus Thiago da Rocha Meira por sempre estar ao meu lado.

A minha irmã Luciana, meu cunhado Fernando e minha sobrinha Natália por todo carinho e amor.

As minhas avós Nair e Terezinha por sempre rezarem por mim.

À todos da minha família e amigos que me proporcionaram momentos descontraídos.

Aos orientadores Marta de Souza Lima Velasco e Emil de Souza Sánchez Filho pelos ensinamentos e orientação deste trabalho.

Aos amigos de profissão, Paulo César Azevedo, Nilson Costa Roberty, Maikon Pessanha, Cristiano Miller e Jean Crispim.

Aos amigos da PUC que ajudaram a realização deste trabalho, Arthur Medeiros, Fernando Ramires, João Krause, Juliana Vianna, Paula Coutinho, Paul Antezana e Suelen Rodrigues.

Aos professores e amigos da UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense), em especial aos professores Jean Marie Desir e Sérgio Luis Gonçalves.

Aos amigos da Avantec Engenharia, em especial Júlio Holtz que me indicou o curso da pós-graduação da PUC-Rio.

À Rita e aos funcionários do laboratório de estruturas PUC–Rio José Nilson, Euclides, Evandro e Haroldo pelos serviços prestados na execução dos ensaios.

À CONCRELAGOS pela doação do concreto utilizado para a confecção dos consoles.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Curty, Larissa Azevedo; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Estudo Experimental dos Consoles Curtos de Concreto Armado Reforçados com Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2009. 193p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho é uma pesquisa experimental realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, utilizando-se a técnica de aplicação do compósito de fibras de carbono (CFC) colados externamente em consoles curtos de concreto armado. Foram ensaiados seis consoles curtos, sendo: um de referência, três com reforço de CFC na horizontal e dois com reforço de CFC na diagonal. A resistência média do concreto aos 28 dias foi de 30 MPa. A seção transversal do pilar foi de 25 cm × 50 cm e a seção do transversal console foi de 25 cm × 37,5 cm. O diâmetro da armadura tracionada em laço era de 10 mm e o diâmetro da armadura de costura era de 6,3 mm. Os consoles foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência na armadura tracionada, no estribo, no concreto e no CFC. Os ensaios comprovaram um razoável desempenho dessa técnica de reforço. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados obtidos no modelo de Bielas e Tirantes e no modelo cinemático da Teoria da Plasticidade, visando a comparação das forças verticais últimas teóricas e experimentais. Foi avaliado o ângulo de inclinação das bielas e o fator de efetividade da deformação específica no reforço de CFC.

Palavras-chave

Console Curto; Compósitos de Fibras de Carbono; Reforço Estrutural; Análise Experimental; Concreto Armado.

Abstract

Curty, Larissa Azevedo; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Study of Reinforced Concrete Short Corbels with Carbon Fiber Composites**. Rio de Janeiro, 2009. 193p. Msc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work is an experimental research of concrete short corbels wrapped with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strips. Different strengthening configurations were used. Was carried out on six corbels strengthened by CFRP. One control specimen without CFRP, three corbels with horizontal CFRP strips and two corbels with diagonal CFRP strips. The concrete had a 28 day compressive strength of 30 MPa. The column cross-section dimensions were 25 cm x 50 cm and the corbel cross-section dimensions were 25 cm x 37,5 cm. The flexural reinforcement consisted of four deformed bars each of diameter 10 mm with four transverse bars of diameter 6,3 mm. The corbels were instrumented with strain gages in flexural reinforcement, stirrup, concrete surface and CFRP strips. The analytical models based on Strut-and-Tie model and in the kinematic model of the Theory of Plasticity, allows one to determine the bearing capacity of corbels. The experimental values are then compared with the analytical results, showing good agreement. The strut angle and the strengthening effectiveness were evaluated.

Keywords

Corbel; Carbon Fiber Reinforced Polymer; Structural Strengthening; Experimental Analysis; Reinforced Concrete.

Sumário

1	Introdução	24
1.1.	Generalidades	24
1.2.	Objetivos	24
1.3.	Organização do trabalho	25
2	Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono	26
2.1.	Introdução	26
2.2.	Tipos de Fibras	27
2.3.	Tipos de Resina	27
2.4.	Compósitos de Fibras de Carbono	28
2.5.	Aplicações do CFC na Engenharia Civil	29
3	Revisão Bibliográfica	35
3.1.	Introdução	35
3.2.	Considerações Gerais Sobre o Comportamento dos Consoles Curtos	35
3.2.1.	Modos de Ruptura	35
3.3.	Modelos Teóricos	38
3.3.1.	Modelo de Bielas e Tirantes	38
3.3.1.1.	Classificação das bielas e nós	39
3.3.1.2.	Tirantes	42
3.3.1.3.	Dimensionamento de Console	43
3.3.1.4.	Recomendações de Normas e Autores	45
3.3.2.	Teoremas da Análise Limite	48
3.3.2.1.	Modelo Cinemático	50
3.4.	Revisão da Literatura	58
3.4.1.	CORRY e DOLAN (2001)	58
3.4.2.	ELGWADY <i>et al.</i> (2002)	60
3.4.3.	SOUZA <i>et al.</i> (2006)	63
3.4.4.	RIBEIRO <i>et al.</i> (2007)	67
4	Programa Experimental dos Consoles Curtos Reforçados com Tecido de Fibras de Carbono	70

4.1. Introdução	70
4.2. Ensaios de Caracterização dos Materiais	70
4.2.1. Tecido de Fibras de Carbono	70
4.2.1.1. Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibras de Carbono	71
4.2.2. Aço	73
4.2.3. Concreto	77
4.2.3.1. Resistência à Compressão	78
4.2.3.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos	79
4.2.3.3. Módulo de Elasticidade e Diagrama Tensão Deformação Específica	80
4.3. Programa Experimental	83
4.3.1. Descrição dos Consoles	83
4.3.2. Características Geométricas	84
4.4. Aplicação do Sistema de Reforço com CFC	86
4.5. Instrumentação	88
4.5.1. Extensômetros Elétricos de Resistência	88
4.5.1.1. Aço	88
4.5.1.2. Concreto e CFC	88
4.5.2. Transdutor de Deslocamentos	90
4.6. Esquema de Ensaio	90
4.7. Execução dos Ensaios	92
5 Apresentação e Análise dos Resultados	94
5.1. Introdução	94
5.2. Rupturas dos Consoles	94
5.2.1. Modo de Ruptura	94
5.2.2. Força de Ruptura	96
5.3. Deformações Específicas nas Armaduras de Aço e CFC	98
5.3.1. Aço	98
5.3.2. CFC	102
5.4. Deformações Específicas na Biela	105
5.5. Análise do ângulo de Inclinação da Biela	106
5.6. Deslocamentos	109
5.7. Análise dos Modelos Teóricos	112
5.7.1. Modelo de Bielas e Tirantes	112
5.7.2. Modelo Cinemático	114

5.8. Comparação entre os Valores Experimentais e os Valores Teóricos Obtidos pelo Modelo Cinemático e Modelo de Bielas e Tirantes	117
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	118
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	119
Referências Bibliográficas	120
Anexo A Registros Fotográficos	124
Anexo B Resultados dos Ensaios dos Consoles	136
Anexo C Rotinas de Cálculo das Forças Teóricas	170

Lista de figuras

- Figura 2.1 – Micrografia estrutural das fibras de carbono (<http://www.carbonfiber.gr.jp/english/>, visitado em 20/09/08). 26
- Figura 2.2 – Fibras de vidro, aramida e carbono (<http://www.fibertex.com.br/plasticoreforcado.htm>, visitado em 20/09/08). 27
- Figura 2.3 – Compósito de fibras de carbono (http://www.cesec.ufpr.br/pet/titulos/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 28
- Figura 2.4 – Ampliação em microscópio eletrônico da matriz polimérica (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 29
- Figura 2.5 – Ponte Storchen na Suíça (<http://www.compositesworld.com/ct/issues/2006/February/1180/3>). 29
- Figura 2.6 – Cabo de compósito de fibras de carbono utilizado na Ponte Storchen em Switzerland (<http://www.compositesworld.com/ct/issues/2006/February/1180/3>). 30
- Figura 2.7 – Reabilitação de ponte utilizando CFC (<http://www.compositesworld.com/ct/issues/2006/April/1240>). 30
- Figura 2.8 – Laje e viga reforçada no viaduto de Santa Tereza (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 31
- Figura 2.9 – Reforço em console (<http://www.kcq.cc/index.php?id=117> visitado em 18/05/2009). 31
- Figura 2.10 – Reforço á flexão e à força cortante de viga externa do Edifício da Alcan Alumino do Brasil em Ouro Preto (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 31
- Figura 2.11 – Reforço de pilares retangulares e de colunas (http://media.wiley.com/product_data/excerpt/61/04716812/0471681261.pdf, visitado em 20/09/08). 32

- Figura 2.12 – Reforço da Torre da Rede Globo de Televisão no Rio de Janeiro RJ
 (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 32
- Figura 2.13 – Fábrica de Laticínios Itambé em Sete lagoas MG
 (http://www.cesec.ufpr.–Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforc_o_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf). 33
- Figura 2.14 – Fábrica de Laticínios Itambé em Sete lagoas MG, onde foi executado um reforço ao redor dos furos na laje
 (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 33
- Figura 2.15 – Reforço da viga à flexão e à força cortante na Fundação Mineira de Educação e Cultura – FUMEC
 (http://www.cesec.ufpr.Br/pet/titulo/biblioteca/seminarios/arquivo_seminarios/construcao_civil/reforco_estrutural_com_fibras_de_carbono.pdf, visitado em 20/09/08). 34
- Figura 3.1 – Trajetórias de tensões (FRANZ, 1970). 36
- Figura 3.2 – Modos de ruptura: (a) ruptura por flexão; (b) ruptura por fendilhamento da biela; (c) ruptura por cisalhamento. 37
- Figura 3.3 – Modos de ruptura: (a) falha na ancoragem; (b) força horizontal; (c) esmagamento do concreto. 37
- Figura 3.4 – Exemplos de regiões D (SCHÄFER e SCHLAICH,1988). 38
- Figura 3.5 – Configurações típicas de campos de tensão de compressão (SCHÄFER e SCHLAICH,1988). 40
- Figura 3.6 – Tipos de nós: (a) nó CCC; (b) nó CCT; (c) nó CTT; (d) nó TTT (ACI – 318, 2008). 41
- Figura 3.7 – (a) Modelo de Bielas e Tirantes; (b) Configuração da treliça do modelo de Bielas e Tirantes. 43
- Figura 3.8 – Modelo de Bielas e Tirantes com a parcela do CFC; (a) CFC na horizontal; (b) CFC na diagonal. 44
- Figura 3.9 – Modelo de Bielas e Tirantes para console curto (NBR 6118:2004). 46
- Figura 3.10 – Armadura típica de console curto (NBR 6118:2004). 47
- Figura 3.11 – Critérios para armadura do tirante (LEONHARDT e MÖNNIG,

1978).	48
Figura 3.12 – Posição da placa de força (LEONHARDT e MÖNNIG, 1978).	48
Figura 3.13 – Armaduras de tração: (a) para uma força axial de compressão pequena; (b) para uma força axial de compressão grande (LEONHARDT e MÖNNIG, 1978).	48
Figura 3.14 – Soluções usando-se os teoremas da Análise Limite.	50
Figura 3.15 – Parâmetros geométricos do console curto de concreto armado.	51
Figura 3.16 – Parâmetros geométricos do console curto de concreto armado reforçado com CFC.	51
Figura 3.17 – Parâmetros geométricos do console curto de concreto armado com $x=0$.	55
Figura 3.18 – Geometria e armadura do console (CORYY e DOLAN, 2001).	58
Figura 3.19 – Descolamento do reforço (CORYY e DOLAN, 2001).	59
Figura 3.20 – Dimensões (centímetro) dos consoles curtos ensaiados por ELGWADY <i>et al.</i> (2002).	61
Figura 3.21 – Consoles ensaiados: a) console de referência (CONT); b) 11HOR;	61
c) 21HOR; d) 61DIG; e) 82 HAD; f) 32 HOR; ELGWADY <i>et al.</i> (2002).	61
Figura 3.22 – Dimensões dos consoles curtos ensaiados por SOUZA <i>et al.</i> (2006).	64
Figura 3.23 – Descrição consoles (Ribeiro <i>et al.</i> , 2007).	68
Figura 3.24 – (a) Armadura dos consoles; (b) realização do ensaio (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2007).	69
Figura 4.1 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio à tração do CFC de acordo com a ASTM D 3039 / D 3039 M.	71
Figura 4.2 – (a) Corpos-de-prova de CFC, (b) Ensaios dos corpos-de-prova (SPAGNOLO, 2008).	73
Figura 4.3 – Ensaio à tração dos corpos-de-prova: (a) Laboratório de Estruturas e Materiais; (b) ITUC.	74
Figura 4.4 – Diagrama tensão x deformação específica para as barras de ϕ 5,0 mm.	75
Figura 4.5 – Diagrama tensão x deformação específica para as barras de ϕ 6,3 mm.	76
Figura 4.6 – Diagrama tensão x deformação específica para as barras de ϕ 10,0 mm.	76

Figura 4.7 – Diagrama tensão x deformação específica para as barras de ϕ 12,5 mm.	77
Figura 4.8 – Variação da resistência média à compressão do concreto para diferentes idades.	78
Figura 4.9 – Ensaio de resistência à tração do concreto por compressão diametral.	80
Figura 4.10 – Diagrama tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1.81	
Figura 4.11 – Diagrama tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2.82	
Figura 4.12 – Diagrama tensão x deformação específica do corpo-de-prova 3.82	
Figura 4.13 – Fluxograma das séries dos consoles.	83
Figura 4.14 – Geometria dos consoles (medidas em cm).	84
Figura 4.15 – Armadura de aço dos consoles.	85
Figura 4.16 – Posições do reforço em CFC: série H e série D.	86
Figura 4.17 – Preparação das superfícies.	87
Figura 4.18 – Instrumentação nas armaduras internas de aço.	88
Figura 4.19 – Posições das rosetas no CFC dos consoles das séries H e D (medidas em centímetros).	89
Figura 4.20 – Posições dos ERR no CFC dos consoles das séries H e D (medidas em centímetros).	89
Figura 4.21 – Posições das régua de deslocamento linear (medidas em centímetros).	90
Figura 4.22 – Esquema do ensaio.	91
Figura 4.23 – Esquema de ensaio do console RUD2.	91
Figura 4.24 – Consoles ensaiados.	93
Figura 5.1 – Tipos de fissuras.	95
Figura 5.2 – Comparação entre as forças de fissuração.	95
Figura 5.3 – (a) ruptura por destacamento da fibra; (b) ruptura por fendilhamento da biela.	96
Figura 5.4 – Comparação entre as forças últimas de ruptura.	97
Figura 5.5 – Força x deformação específica das armaduras internas do console de referência.	98
Figura 5.6 – Força x deformação específica das armaduras internas do console RUH1.	99
Figura 5.7 – Força x deformação específica das armaduras internas do console RUH2.	99
Figura 5.8 – Força x deformação específica das armaduras internas do console	

RUH3.	100
Figura 5.9 – Força x deformação específica das armaduras internas do console RUD1.	100
Figura 5.10 – Força x deformação específica das armaduras internas do console RUD2.	101
Figura 5.11 – Força x deformação específica do CFC do console RUH1.	102
Figura 5.12 – Força x deformação específica do CFC do console RUH2.	102
Figura 5.13 – Força x deformação específica do CFC do console RUH3.	103
Figura 5.14 – Força x deformação específica do CFC do console RUD1.	103
Figura 5.15 – Força x deformação específica do CFC do console RUD2.	104
Figura 5.16 – Ângulo θ_{CR} medido por meio digital.	107
Figura 5.17 – Ilustração do ângulo da biela.	107
Figura 5.18 – Ângulo da biela vs força: (a) console de referência; (b) console RUD1; (c) console RUD2; (d) console RUH1; (e) console RUH2; (f) console RUH3.	108
Figura 5.19 – Esquema dos deslocamentos dos consoles.	110
Figura 5.20 – Força x deslocamentos do console de referência.	110
Figura 5.21 – Força x deslocamentos do console RUH1.	110
Figura 5.22 – Força x deslocamentos do console RUH2.	111
Figura 5.23 – Força x deslocamentos do console RUH3.	111
Figura 5.24 – Força x deslocamento do console RUD1.	111
Figura 5.25 – Força x deslocamento do console RUD2.	112
Figura 5.26 – Representação das armaduras analisadas por meio do modelo de Bielas e Tirantes.	113
Figura 5.27 – Comparação das razões entre a força última experimental e as forças últimas teóricas obtidas nos dois modelos teóricos.	117
Figura A.1 – Tecido de fibras de carbono.	124
Figura A.2 – Resina epoxídica componentes A e B.	124
Figura A.3 – Rolo: material utilizado para aplicação da resina.	125
Figura A.4 – Armaduras dos consoles.	125
Figura A.5 – EER sendo colado na armadura interna.	126
Figura A.6 – Formas e armaduras.	126
Figura A.7 – Montagem dos consoles antes do recebimento do concreto.	127
Figura A.8 – Enchimento do carrinho de mão com o concreto do caminhão betoneira.	127
Figura A.9 – Vista superior de todos os consoles preparados para receber o	

concreto.	128
Figura A.10 – Consoles concretados.	128
Figura A.11 – Transporte das peças.	129
Figura A.12 – Arrumação das peças a serem ensaiadas.	129
Figura A.13 – Série H.	130
Figura A.14 – Detalhe da roseta.	130
Figura A.15 – Detalhe do console RUD1.	131
Figura A.16 – Console RUD2, ruptura do CFC na face lisa.	131
Figura A.17 – Console RUD2, ruptura do CFC na face rugosa.	132
Figura A.18 – Ensaio do console RUH1.	132
Figura A.19 – Ensaio do console RUH2, descolamento do CFC na face rugosa.	133
Figura A.20 – Detalhe do console RUH2.	133
Figura A.21 – Ensaio do console RUH3.	134
Figura A.22 – Bombas hidráulicas de pressão controlada, marca AMSLER.	134
Figura A.23 – Prensa Contenco com capacidade de 2400kN.	135
Figura A.24 – Atuadores Hidráulicos.	135

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Valores de β_s .	41
Tabela 3.2 – Valores de β_n .	42
Tabela 3.3 – Resultados experimentais e teóricos.	63
Tabela 3.4 – Dimensionamento no Estado Limite Último.	65
Tabela 3.5 – Largura da biela e tensão.	65
Tabela 3.6 – Características dos consoles.	68
Tabela 3.7 – Força e modo de ruptura.	69
Tabela 4.1 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D 3039/D3039 M.	72
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova com uma camada de CFC.	73
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios das barras de aço.	75
Tabela 4.4 – Consumo de materiais por m ³ de concreto.	77
Tabela 4.5 – Valores médios da resistência à compressão do concreto.	79
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração do concreto por compressão diametral.	80
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.	81
Tabela 5.1 – Força (kN) das primeiras fissuras dos consoles.	95
Tabela 5.2 – Valores da força última.	97
Tabela 5.3 – Deformações específicas efetivas nas armaduras de aço.	101
Tabela 5.4 – Deformações específicas efetivas nos reforços do CFC.	104
Tabela 5.5 – Tensão na armadura nos reforços de CFC e fator de efetividade.	105
Tabela 5.6 – Deformações específicas lidas na superfície do concreto dos consoles para força de ruptura.	106
Tabela 5.7 – Ângulos θ_{cr} e θ_ϵ .	109
Tabela 5.8 – Resultados das forças últimas do modelo de Bielas e Tirantes.	113
Tabela 5.9 – Variáveis do modelo cinemático.	115
Tabela 5.10 – Valores das dimensões x e y.	115
Tabela 5.11 – Força vertical última.	116
Tabela B.1 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console de referência.	136

Tabela B.2 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console de referência.	138
Tabela B.3 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console RUH1.	140
Tabela B.4 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console RUH1.	142
Tabela B.5 – Leitura dos extensômetros colados no CFC do console RUH1.	144
Tabela B.6 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console RUH2.	146
Tabela B.7 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console RUH2.	148
Tabela B.8 – Leitura dos extensômetros colados no CFC do console RUH2.	150
Tabela B.9 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console RUH3.	152
Tabela B.10 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console RUH3.	154
Tabela B.11 – Leitura dos extensômetros colados no de CFC do console RUH3.	156
Tabela B.12 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console RUD1.	158
Tabela B.13 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console RUD1.	160
Tabela B.14 – Leitura dos extensômetros colados no CFC do console RUD1.	162
Tabela B.15 – Leitura dos TD e extensômetros colados no aço do console RUD2.	164
Tabela B.16 – Leitura dos extensômetros colados na superfície do concreto do console RUD2.	166
Tabela B.17 – Leitura dos extensômetros colados no CFC do console RUD2.	168

Lista de símbolos

Romanos

a	Distância da face do pilar até o eixo de aplicação da força externa
A_f	Área da seção transversal do reforço
A_s	Área de aço
b	Largura do console
c_1	Distância do bordo da placa de apoio até o bordo do pilar
d	Altura útil
d_s	Distância da zona comprimida até a armadura principal
d_i	Distância da zona comprimida até a camada i de armadura
d_f	Braço de alavanca do reforço
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do reforço
$E_{f,ef.}$	Módulo de elasticidade efetiva do CFC
E_s	Módulo de elasticidade do aço
$E_{sec,0,3}$	Módulo de elasticidade secante
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{ce}	Resistência efetiva das bielas e dos nós
f_f	Resistência à tração do reforço
$f_{f,e}$	Resistência efetiva à tração do reforço
$f_{f,u}$	Resistência última à tração do reforço
f_t	Resistência do concreto à tração
$f_{t,D}$	Resistência à tração do concreto por compressão diametral
f_y	Resistência de escoamento do aço
f_{yi}	Resistência de escoamento do aço na camada i
f_{yd}	Resistência de escoamento de cálculo do aço
F_{CFC}	Força resistida do reforço
$F_{máx,f}$	Força máxima no reforço
F_n	Força nominal resistente da biela, tirante ou nó

F_{xf}	Força na direção x do reforço
h	Altura total do console
h'	Recobrimento da armadura do tirante
H	Força na horizontal
H_u	Força na horizontal teórica última
l_i	Comprimento do elemento i
T_i	Força na biela ou no tirante i
T	Força atuante no tirante
V	Força vertical atuante
$V_{exp.}$	Força vertical experimental
$V_{teorica}$	Força vertical teórica
V_u	Força vertical última
$V_{u,ref}$	Força vertical última do console de referência
x	Posição horizontal da fissura inclinada
y	Posição vertical da fissura inclinada
z	Braço de alavanca
\dot{w}	Rotação virtual
W_{EXT}	Trabalho virtual externo
W_{INT}	Trabalho virtual interno

Gregos

α	Ângulo entre a força de tração e a biela comprimida
α'	Inclinação do reforço diagonal do CFC
β_n	Fator determinado pelo tipo de nó
β_s	Fator determinando pelo tipo de biela
$\varepsilon_{1,2}$	Deformações específicas principais
ε_x	Deformação específica do concreto na direção x
ε_y	Deformação específica do concreto na direção y
ε_{45°	Deformação específica do concreto na diagonal à 45°
ε_c	Deformação específica do concreto
$\varepsilon_{c,máx}$	Deformação específica máxima do concreto
$\varepsilon_{f,e}$	Deformação específica efetiva da fibra
$\varepsilon_{f,ef.}$	Deformação específica efetiva do CFC
ε_i	Deformação específica média do elemento i
$\varepsilon_{f,u}$	Deformação específica última do CFC
$\varepsilon_{s,u}$	Deformação específica última do aço
ϕ_r	Coefficiente de redução para bielas, nós e tirantes
ϕ	Diâmetro da barra de aço
γ_f	Fator de ponderação da força
ν_c	Fator de efetividade à compressão do concreto
ν_f	Fator de efetividade do CFC
ν_t	Fator de efetividade à tração do concreto
θ	Ângulo de inclinação da biela de concreto (campo de compressão)
θ_{CR}	Ângulo de inclinação fissura
θ_e	Ângulo de deformação específica principal
ρ	Taxa de armadura
\bar{w}_{EXT}	Trabalho virtual externo
\bar{w}_{INT}	Trabalho virtual interno
δ'	Deslocamento horizontal no topo do pilar
δ''	Deslocamento vertical na extremidade do console

Lista de abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB	Comité Euro–International du Béton
CFC	Compósitos de Fibras de Carbono
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CCC	Nó que recebe três barras comprimidas
CCT	Nó que recebe duas barras comprimidas e uma tracionada
CTT	Nó que recebe uma barra comprimida e duas tracionadas
EER	Extensômetro elétricos de resistência
ITUC	Instituto Tecnológico da PUC–Rio
LEM	Laboratório de Estruturas e Materiais
NBR	Norma Brasileira
PUC–RIO	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
TD	Transdutor de deslocamento
TTT	Nó que recebe três barras tracionadas