

**REFORÇO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM
COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)**

AILÍN FERNÁNDEZ PÉREZ

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

REFORÇO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM
COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)

AILÍN FERNÁNDEZ PÉREZ

ORIENTADOR: GUILHERME SALES SOARES DE AZEVEDO MELO, PHD. (UNB)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E. DM – 14A/16

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**REFORÇO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM
COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)**

AILÍN FERNÁNDEZ PÉREZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

**Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, *PhD* (UnB)
(Orientador)**

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira, *DSc* (UnB)
(Examinador Externo)**

**Dr. Vladimir Villaverde Barbán, *DSc* (PROEST)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE JULHO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

| | |
|---|---------------------|
| FERNÁNDEZ, AILÍN PÉREZ | |
| Reforço de vigas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (PRFC) [Distrito Federal] 2016. | |
| xxiv, 148p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. | |
| 1.Cisalhamento | 2.Reforço |
| 3.Polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) | 4.Vigas |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Mestre) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNÁNDEZ, A. P. de (2016). Reforço de vigas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC). Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 14A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ailín Fernández Pérez

TÍTULO: Reforço de vigas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC).

GRAU: Mestre

ANO: 2016

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

Ailín Fernández Pérez
CLN 407, Bloco C, SS 75, ASA NORTE
70.855-533 Brasília - DF - Brasil.
e-mail: ailinmdez@gmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Nancy e Juan Manuel pelo amor e apoio incondicional, por sempre acreditarem em mim; vocês são minha luz e meus guias,

A Manolito meu querido irmão,

Ao amor da minha vida Mauricio, pelo amor, carinho, dedicação, apoio e muita paciência, por acreditar em nosso amor: eu aguardo você na igreja,

*Às minhas avós Ofelia e Luisita e meus avôs Candido e Juan Manuel
(in memoriam) pelo exemplo de vida,*

A minha tia Norma (in memoriam), eu amo você,

À Tere e Carlos, meus sogros do coração, obrigada pelo carinho.

*Para que possa surgir o possível
é preciso tentar uma e outra vez o impossível.*

“Hermann Hesse”

AGRADECIMENTOS

Ao professor Guilherme Sales pela orientação, e por toda confiança em mim depositada.

Ao professor Marcos Honorato pela disposição e por prestar sua ajuda.

A professora Nívea pelos conselhos oportunos e o carinho em todo momento.

A Yanet, Nelson, Gabi e Yadian, meus amigos cubanos que fizeram deste período de muita correria mais fácil e suportável em especial a Yanet e Nelson que sempre me apoiaram e cuidaram como irmãos mais velhos, obrigada de coração.

Aos meus novos amigos do Brasil: Magno, Lilian, Wanderley, Alejandra e Eduardo, obrigada pelo carinho ao longo deste último ano e pelo apoio em todo momento, por fazer me sentir em casa apesar da distância.

Agradeço especialmente ao Mauricio pela parceria ao longo destes quase 5 anos, pelo carinho em todo momento que tornou-se amor. Obrigada por me fazer feliz.

Aos meus queridos pais, Nancy e Juan Manuel primeiramente pela vida, e ao meu irmão Manolito, a vocês pelo amor e apoio incondicional, por sempre me incentivarem a seguir com meus sonhos, mesmo estando longe de vocês, todas as minhas conquistas e tudo o que sou é para vocês e por vocês. Eu amo vocês.

A minha família que sempre acreditou em mim, minhas avós Ofelia e Luisita e meus avôs Candido e Juan Manuel (in memoriam), tias Norma (in memoriam), Nora e Mary, tios Charlie, Eduardo, Raúl e Jorge, meus primos Yaide e Normita e meu sobrinho Ale, obrigada pelo carinho.

A Tere e Carlos, meus sogros, obrigada por sempre estarem pendentes de meus pais e de mim; a Vivi e a vocês pela preocupação e carinho, vocês sempre estarão no meu coração.

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (UNB), obrigada pela oportunidade de superação.

Eu agradeço a Deus e meu San Judas Tadeu pela vida, pela força, pela coragem, pelas conquistas alcançadas até hoje e pelas que estão no futuro.

RESUMO

REFORÇO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)

Autor: Ailín Fernández Pérez

Orientador: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 26 de Julho de 2016

Os reforços com compósitos de fibras são ainda pouco empregados no Brasil. Estes polímeros reforçados com fibra (PRF), feitos de fibra em uma resina polimérica, aumentam a ductilidade, a capacidade resistente, tem alta resistência à tração e baixa relaxação, e são imunes à corrosão. O reforço ideal para qualquer elemento estrutural é aquele que leva à ruptura por flexão evitando a ruptura por cisalhamento, e assim apresentando maior ductilidade, comparada com as rupturas por cisalhamento.

Nesta pesquisa são analisados os resultados experimentais de 123 vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), as quais conformarão um banco de dados com o objetivo de criar uma metodologia de cálculo que melhor represente os resultados experimentais. Foram comparadas as previsões do tipo de ruptura em função do tipo de reforço, da forma de colocação, e da eficiência do tipo de ancoragem utilizado.

Os resultados foram também comparados com prescrições de normas, estabelecidas pelo ACI 318-2011, ABNT NBR 6118-2014, ACI 440.2R 2008, e pelo CEB–FIB–Bulletin 14 (2001), e com as teorias dos pesquisadores Zsutty (1968), e Chen e Teng (2003). De uma maneira geral as melhores estimativas foram obtidas com as expressões de Zsutty (1968), e Chen e Teng (2003). Entretanto, foram obtidas boas estimativas com o método da CEB–FIB–Bulletin 14. Sendo que o ACI 440.2R 2008 tendeu muito mais a subestimar a capacidade resistente das vigas se comparada com os resultados experimentais.

Palavras chaves: Cisalhamento; Reforço; Polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC); Vigas.

ABSTRACT

STRENGTHENING OF BEAMS IN SHEAR WITH CARBON FIBER COMPOSITES (CFRP)

Author: Ailín Fernández Pérez
Supervisor: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, July 2016

Strengthening of structures with FRP is not yet commonly used in Brazil. These strengthening materials increase the ductility and ultimate load, have high tensile strength and have no corrosion. The ideal shear strengthening leads the beams to fail in bending, so increasing their ductility.

This research analyzes the experimental results of 123 reinforced concrete beams strengthened to shear with carbon fiber composite (CFRP), which conform a database in order to create a calculation method that best represents the experimental results. Their ultimate loads are compared as function of the strengthening type, the way of disposing it, and the efficiency of the anchorage type used.

The results were compared with estimates by codes: ACI 318 (2014), ABNT NBR 6118 (2014), ACI 440.2R (2008), and by CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), and by the propositions from Zsutty (1968), and Chen & Teng (2003). In general, the best estimates were obtained using the equations proposed by Zsutty (1968) and by the Chen & Teng (2003). However, good estimates with small variations were obtained in some cases with the method of CEB – FIB, *Bulletin* 14. However the code ACI 440.2R (2008) tended more to underestimate the ability of resisting beams compared with the experimental results.

Keywords: Shear; Strengthening, Carbon fiber reinforced polymers (CFRP); Beam.

ÍNDICE

| | |
|--|----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.2. MOTIVAÇÃO | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4. METODOLOGIA | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. PRELIMINARES..... | 4 |
| 2.2. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS E ESTUDOS DE ZSUTTY (1968) PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS AO CISALHAMENTO | 5 |
| 2.2.1. Disposições da Norma ABNT NBR. 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto | 5 |
| 2.2.1.1. Verificação do Estado Limite Último. (ELU)..... | 6 |
| 2.2.1.2. Modelo de cálculo I..... | 7 |
| 2.2.1.3. Modelo de cálculo II. | 8 |
| 2.2.2. Disposições do ACI. 318 (2011): Requerimentos de norma para concreto estrutural..... | 8 |
| 2.2.2.1. Parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento. | 9 |
| 2.2.2.2. Parcela de força resistida pela armadura de cisalhamento. | 10 |
| 2.2.2.3. Aspectos construtivos..... | 10 |
| 2.2.3. Disposições segundo ZSUTTY (1968): Previsão da resistência ao cisalhamento | 11 |
| 2.2.3.1. Parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento | 11 |
| 2.2.3.2. Parcela de força resistida pela armadura ao cisalhamento | 12 |
| 2.3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS E ESTUDOS DE CHEN E TENG (2003) PARA O DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO EM VIGAS AO CISALHAMENTO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO (PRFC) | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1. Disposições do CEB – FIB, <i>Bulletin</i> 14. (2001): Reforço de PRF colados externamente em estruturas de concreto armado | 13 |
| 2.3.2. Disposições do ACI 440.2R (2008): Guia para dimensionamento e construção de sistemas de PRF colados externamente para reforço de estruturas de concreto | 15 |
| 2.3.2.1. Contribuição do concreto e armadura transversal na resistência nominal ao cisalhamento..... | 15 |
| 2.3.2.2. Contribuição do reforço (PRF) no mecanismo resistente ao cisalhamento . | 16 |
| 2.3.2.3. Limites do reforço | 17 |
| 2.3.3. Disposições segundo Chen e Teng (2003): Capacidade ao cisalhamento de vigas de concreto armado reforçadas com FRP..... | 18 |
| 2.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE REFORÇO COM COMPÓSITO DE FIBRA (PRF), EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO | 21 |
| 2.5. PRELIMINARES..... | 21 |
| 2.5.1. Materiais Compósitos..... | 21 |
| 2.5.2. Classificação dos Materiais Compósitos em função das fases..... | 22 |
| Dependendo do tipo de matriz empregado:..... | 22 |
| 2.5.3. Materiais compósitos de matriz polimérica. | 23 |
| 2.5.3.1. Descrições dos adesivos..... | 23 |
| 2.5.3.2. Descrições das matrizes. | 25 |
| 2.5.3.3. Descrições das fibras..... | 26 |
| 2.5.3.4. Comparação das fibras. | 31 |
| 3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO, (PRFC)..... | 33 |
| 3.1. PRELIMINARES..... | 33 |
| 3.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS NACIONAIS..... | 33 |
| 3.2.1. Salles Neto (2000)..... | 34 |
| 3.2.2. Silva Filho (2001)..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.3. Araújo (2002) | 42 |
| 3.2.4. Gallardo (2002) | 46 |
| 3.2.5. Beber (2003)..... | 49 |
| 3.2.6. Galvez (2003)..... | 55 |
| 3.2.7. Spagnolo et al. (2013) | 58 |
| 3.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS INTERNACIONAIS..... | 61 |
| 3.3.1. Khalifa e Nanni (2000)..... | 62 |
| 3.3.2. Pellegrino e Modena (2002)..... | 65 |
| 3.3.3. Täljsten Björn (2003) | 68 |
| 3.3.4. Altin <i>et al.</i> (2010)..... | 71 |
| 3.3.5. Mofidi e Chaallal (2011)..... | 75 |
| 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS. RELAÇÃO TEÓRICA EXPERIMENTAL | 79 |
| 4.1. PRELIMINARES..... | 79 |
| 4.2. VIGAS DE REFERÊNCIA SEM REFORÇO AO CISALHAMENTO..... | 80 |
| 4.3. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC SOMENTE NAS LATERAIS DA ALMA | 83 |
| 4.3.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)..... | 83 |
| 4.3.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)..... | 86 |
| 4.3.3. Cálculo base com Zsutty (1968)..... | 89 |
| 4.4. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM | 92 |
| 4.4.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)..... | 92 |
| 4.4.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)..... | 95 |
| 4.4.3. Cálculo base com Zsutty (1968)..... | 98 |
| 4.5. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC EM “U” COM ANCORAGEM | 101 |
| 4.5.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)..... | 101 |

| | |
|---|------------|
| 4.5.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)..... | 103 |
| 4.5.3. Cálculo base com Zsutty (1968)..... | 106 |
| 4.6. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC COM ENVOLVIMENTO TOTAL DA ALMA..... | 107 |
| 4.6.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)..... | 108 |
| 4.6.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)..... | 110 |
| 4.6.3. Cálculo base com Zsutty (1968)..... | 111 |
| 4.7. MODO DE RUPTURA DAS VIGAS | 113 |
| 4.8. ANCORAGEM DO REFORÇO | 119 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 121 |
| 5.1. CONCLUSÕES..... | 121 |
| 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 123 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 125 |
| ANEXOS | 130 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1: TIPOS DE REFORÇO EMPREGADOS (HTTP://WWW.ZALDIGAIN.COM , 2016)..... | 1 |
| FIGURA 1.2: TIPOS DE REFORÇOS AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO (HTTP://WWW.ZALDIGAIN.COM , 2016)..... | 2 |
| FIGURA 2.1: ALTERNATIVAS DE COLOCAÇÃO DA FIBRA PARA REFORÇOS AO CISALHAMENTO (ACI 440.2R, 2008)..... | 15 |
| FIGURA 2.2: ILUSTRAÇÃO DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS USADAS NO REFORÇO AO CISALHAMENTO (ACI 440.2R, 2008)..... | 17 |
| FIGURA 2.3: ILUSTRAÇÃO DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS USADAS NO REFORÇO AO CISALHAMENTO (CHEN E TENG, 2003)..... | 19 |
| FIGURA 2.4: MATERIAIS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE REFORÇO (MOLINA, 2012) ... | 23 |
| FIGURA 2.5: TIPOS DE FIBRA (MENDONÇA, 2005) | 23 |
| FIGURA 2.6: ALGUMAS FORMAS DISPONÍVEIS PARA A FIBRA DE VIDRO: MANTA DE FIBRAS ALEATORIAMENTE ORIENTADAS E TECIDOS COM IGUAIS PROPRIEDADES A 0° E 90° (MENDONÇA, 2005). | 28 |
| FIGURA 2.7: ALGUMAS FORMAS DISPONÍVEIS PARA A FIBRA DE ARAMIDA E COLOCAÇÃO DA FIBRA (HTTP://WWW.CONSTRUPOR.COM.BR , 2016)..... | 29 |
| FIGURA 2.8: ALGUMAS FORMAS DISPONÍVEIS PARA A FIBRA DE CARBONO (WWW.VIAPOL.COM.BR , 2016) | 30 |
| FIGURA 2.9: MATERIAIS COMPONENTES DO SISTEMA DE REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO (<i>MASTER BUILDERS, INC</i>) | 30 |
| FIGURA 2.10: REFORÇOS AO CISALHAMENTO EM VIGAS COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO (HTTP://REFORCODEESTRUTURAS.COM.BR , 2016) | 30 |
| FIGURA 2.11: GRÁFICOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS REFORÇOS, (PRF)..... | 31 |
| FIGURA 3.1: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (SALLES NETO, 2000)..... | 34 |
| FIGURA 3.2: ARMADURA DAS VIGAS ENSAIADAS (SALLES NETO, 2000) | 35 |
| FIGURA 3.3: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS (SALLES NETO, 2000)..... | 36 |
| FIGURA 3.4: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (SILVA FILHO, 2001) | 38 |
| FIGURA 3.5: ARMADURA DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO, 2001)..... | 39 |
| FIGURA 3.6: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO, 2001)..... | 40 |
| FIGURA 3.7: DETALHE DAS ANCORAGENS DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO, 2001). | 40 |
| FIGURA 3.8: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (ARAÚJO, 2002)..... | 42 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.9: ARMADURA DAS VIGAS ENSAIADAS (ARAÚJO, 2002)..... | 43 |
| FIGURA 3.10: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS (ARAÚJO, 2002). | 44 |
| FIGURA 3.11: DETALHE DAS ANCORAGENS DAS VIGAS (ARAÚJO, 2002)..... | 44 |
| FIGURA 3.12: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (GALLARDO, 2002)..... | 46 |
| FIGURA 3.13: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS (GALLARDO, 2002). | 47 |
| FIGURA 3.14: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS (GALLARDO, 2002). | 48 |
| FIGURA 3.15: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (BEBER, 2003)..... | 49 |
| FIGURA 3.16: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS (BEBER, 2003). | 51 |
| FIGURA 3.17: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS (BEBER, 2003)..... | 52 |
| FIGURA 3.18: ESQUEMA DE ENSAIO VIGAS GRUPO 1, (DIMENSÕES EM CM) (GALVEZ, 2003) . | 55 |
| FIGURA 3.19: ESQUEMA DE ENSAIO VIGAS GRUPO 2, (DIMENSÕES EM CM) (GALVEZ, 2003) . | 55 |
| FIGURA 3.20: ARMADURAS DAS VIGAS ENSAIADAS (GALVEZ, 2003)..... | 56 |
| FIGURA 3.21: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (GALVEZ, 2003)..... | 57 |
| FIGURA 3.22: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013) | 58 |
| FIGURA 3.23: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS ENSAIADAS (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013)..... | 59 |
| FIGURA 3.24: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013). | 60 |
| FIGURA 3.25: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (KHALIFA E NANNI, 2000)..... | 62 |
| FIGURA 3.26: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS (KHALIFA E NANNI, 2000). | 63 |
| FIGURA 3.27: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (KHALIFA E NANNI, 2000)..... | 64 |
| FIGURA 3.28: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (PELLEGRINO E MODENA, 2002) | 65 |
| FIGURA 3.29: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS ENSAIADAS (PELLEGRINO E MODENA, 2002). | 67 |
| FIGURA 3.30: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (PELLEGRINO E MODENA, 2002). | 67 |
| FIGURA 3.31: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003)..... | 69 |
| FIGURA 3.32: ARMADURAS DAS VIGAS ENSAIADAS (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003)..... | 70 |
| FIGURA 3.33: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (TÄLJSTEN BJÖRN, (2003)..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3.34: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 72 |
| FIGURA 3.35: ARMADURA DAS VIGAS ENSAIADAS (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010). | 73 |
| FIGURA 3.36: DETALHE DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 74 |
| FIGURA 3.37: DETALHE DAS ANCORAGENS DAS VIGAS ENSAIADAS (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 74 |
| FIGURA 3.38: ESQUEMA DE ENSAIO, (DIMENSÕES EM CM) (MOFIDI E CHAALLAL, 2011) ... | 76 |
| FIGURA 3.39: DETALHAMENTO DO ARMADO DAS VIGAS ENSAIADAS. [MOFIDI E CHAALLAL (2011)]..... | 77 |
| FIGURA 3.40: DETALHES DE COLOCAÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS ENSAIADAS (MOFIDI E CHAALLAL, 2011)..... | 77 |
| FIGURA 5.1: MODELO NUMÉRICO DE UMA VIGA “T” REFORÇADA COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO NO SAP2000. | 124 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 2.1: COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÍPICAS DOS: ADESIVO EPÓXI, CONCRETO E AÇO (CEB – FIB, <i>BULLETIN</i> 14, 2001) | 25 |
| TABELA 2.2: VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS POLÍMEROS EM RELAÇÃO AOS METAIS E OUTROS MATERIAIS. (MENDONÇA, 2005)..... | 26 |
| TABELA 2.3: PROPRIEDADES TÍPICAS DAS FIBRAS (CEB – FIB, <i>BULLETIN</i> 14, 2001). | 31 |
| TABELA 3.1: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS, (SALLES NETO, 2000). | 34 |
| TABELA 3.2: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (SALLES NETO, 2000). | 34 |
| TABELA 3.3: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (SALLES NETO, 2000). | 37 |
| TABELA 3.4: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (SALLES NETO, 2000). | 37 |
| TABELA 3.5: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO, 2001). | 38 |
| TABELA 3.6: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO, 2001). | 38 |
| TABELA 3.7: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” SILVA FILHO, 2001). | 41 |
| TABELA 3.8: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (SILVA FILHO 2001). | 41 |
| TABELA 3.9: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (ARAÚJO, 2002). | 42 |
| TABELA 3.10: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (ARAÚJO, 2002). | 42 |
| TABELA 3.11: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (ARAÚJO, 2002). | 45 |
| TABELA 3.12: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS. (ARAÚJO, (2002). | 45 |
| TABELA 3.13: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (GALLARDO, 2002). | 46 |
| TABELA 3.14: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (GALLARDO, 2002). | 46 |
| TABELA 3.15: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALO DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (GALLARDO, 2002). | 48 |
| TABELA 3.16: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (GALLARDO, 2002). | 49 |
| TABELA 3.17: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (BEBER, 2003). | 49 |
| TABELA 3.18: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (BEBER, 2003). | 50 |

| | |
|--|----|
| TABELA 3.19: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (BEBER, 2003)..... | 53 |
| TABELA 3.20: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (BEBER, 2003). | 54 |
| TABELA 3.21: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (GALVEZ, 2003). | 55 |
| TABELA 3.22: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (GALVEZ, 2003). | 56 |
| TABELA 3.23: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (GALVEZ, 2003). | 57 |
| TABELA 3.24: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS. (GALVEZ, 2003). | 58 |
| TABELA 3.25: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013). | 59 |
| TABELA 3.26: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013). | 59 |
| TABELA 3.27: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013) | 60 |
| TABELA 3.28: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS. (SPAGNOLO <i>ET AL.</i> , 2013). | 61 |
| TABELA 3.29: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (KHALIFA E NANNI, 2000). | 62 |
| TABELA 3.30: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (KHALIFA E NANNI, 2000). | 62 |
| TABELA 3.31: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (KHALIFA E NANNI, (2000). | 64 |
| TABELA 3.32: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (KHALIFA E NANNI, (2000). | 65 |
| TABELA 3.33: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (PELLEGRINO E MODENA, 2002) | 66 |
| TABELA 3.34: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (PELLEGRINO E MODENA, 2002). | 66 |
| TABELA 3.35: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (PELLEGRINO E MODENA, 2002). | 68 |
| TABELA 3.36: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (PELLEGRINO E MODENA, 2002). | 68 |
| TABELA 3.37: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003). | 69 |
| TABELA 3.38: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003). | 69 |
| TABELA 3.39: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003). | 71 |

| | |
|---|----|
| TABELA 3.40: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003). | 71 |
| TABELA 3.41: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010). | 72 |
| TABELA 3.42: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010). | 72 |
| TABELA 3.43: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010). | 75 |
| TABELA 3.44: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS. (ALTIN <i>ET AL.</i> , 2010). | 75 |
| TABELA 3.45: CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ENSAIADAS (MOFIDI E CHAALLAL, 2011). ... | 76 |
| TABELA 3.46: DESCRIÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS (MOFIDI E CHAALLAL, 2011). | 76 |
| TABELA 3.47: QUANTIDADE DE CAMADAS DA FIBRA DE CARBONO E VALOR DA PARCELA QUE É RESISTIDA PELA FIBRA “ <i>V_f</i> ” (MOFIDI E CHAALLAL, 2011). | 78 |
| TABELA 3.48: MODO DE RUPTURA E CARGA ÚLTIMA EXPERIMENTAL DAS VIGAS ENSAIADAS (MOFIDI E CHAALLAL, 2011). | 78 |
| TABELA 4.1: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2011) E ZSUTTY (1968), PARA VIGAS SEM REFORÇO AO CISALHAMENTO. | 81 |
| TABELA 4.2: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ABNT NBR 6118 (2014) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO SOMENTE NAS LATERAIS. | 84 |
| TABELA 4.3: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ACI 318 (2011) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO SOMENTE NAS LATERAIS. | 87 |
| TABELA 4.4: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ZSUTTY (1968) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO SOMENTE NAS LATERAIS. | 90 |
| TABELA 4.5: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ABNT NBR 6118 (2014) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM. | 93 |
| TABELA 4.6: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ACI 318 (2011) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM. | 96 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 4.7: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ZSUTTY (1968) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM. | 99 |
| TABELA 4.8: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ABNT NBR 6118 (2014) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” COM ANCORAGEM. | 102 |
| TABELA 4.9: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ACI 318 (2011) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” COM ANCORAGEM..... | 104 |
| TABELA 4.10: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ZSUTTY (1968) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO EM “U” COM ANCORAGEM..... | 106 |
| TABELA 4.11: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ABNT NBR 6118 (2014) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO COM ENVOLVIMENTO TOTAL DA ALMA..... | 108 |
| TABELA 4.12: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ACI 318 (2011) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001), E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO COM ENVOLVIMENTO TOTAL DA ALMA. | 110 |
| TABELA 4.13: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ZSUTTY (1968) COMBINADOS COM ACI 440.2R (2008), CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001) E CHEN E TENG (2003), PARA VIGAS COM REFORÇO AO CISALHAMENTO COM ENVOLVIMENTO TOTAL DA ALMA. | 112 |
| TABELA 4.14: COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA TEÓRICO E EXPERIMENTAL, PARA VIGAS SEM REFORÇO. | 114 |
| TABELA 4.15: COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA TEÓRICO E EXPERIMENTAL, PARA VIGAS COM REFORÇO SOMENTE NAS LATERAIS..... | 115 |
| TABELA 4.16: COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA TEÓRICO E EXPERIMENTAL, PARA VIGAS COM REFORÇO EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM. | 116 |
| TABELA 4.17: COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA TEÓRICO E EXPERIMENTAL, PARA VIGAS COM REFORÇO EM “U” COM ANCORAGEM..... | 117 |
| TABELA 4.18: COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA TEÓRICO E EXPERIMENTAL, PARA VIGAS COM ENVOLVIMENTO COMPLETO DA FIBRA..... | 118 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 4.19: PORCENTAGEM DE INCREMENTO DA RESISTÊNCIA ÚLTIMA PRODUTO A ANCORAGEM DAS VIGAS. | 120 |
| TABELA A.1: CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA A FLEXÃO DAS VIGAS..... | 130 |
| TABELA A.2: CÁLCULO DO CISALHAMENTO PELA ABNT NBR 6118 (2014) | 133 |
| TABELA A.3: CÁLCULO DO CISALHAMENTO PELO ACI 318 (2011). | 136 |
| TABELA A.4: CÁLCULO DO CISALHAMENTO PELO ZSUTTY (1968). | 139 |
| TABELA A.5: CÁLCULO DO CISALHAMENTO COM FIBRA PELO ACI 440.2R (2008). | 142 |
| TABELA A.6: CÁLCULO DO CISALHAMENTO COM FIBRA PELA CEB–FIB– <i>BULLETIN</i> 14 (2001). | 144 |
| TABELA A.7: CÁLCULO DO CISALHAMENTO COM FIBRA PELO CHEN E TENG (2003). | 146 |

SIMBOLOGIA

Símbolo e Significado

| | |
|---|--|
| $A_{sw} = A_v$ | Área da seção transversal dos estribos |
| A_{fv} | Área da seção transversal da fibra |
| b_w | Largura média da alma, medida ao longo da altura útil da seção |
| b_f | Largura da fibra |
| d | Altura útil da seção, igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração |
| d_{fv} | Altura útil da fibra |
| $E_{fu} = E_f$ | Modulo de elasticidade da fibra |
| $\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{fe}$ | Deformação da fibra |
| ε_{fu} | Deformação última de projeto da fibra |
| $f_{ck} = f'_c$ | Resistência característica/especificada à compressão do concreto |
| f_{cd} | Resistência de cálculo a compressão do concreto |
| $f_{ywk} = f_{yt}$ | Resistência característica/especificada ao escoamento do aço da armadura transversal |
| $f_{ct,m}$ | Resistência média à tração do concreto |
| f_{ywd} | Resistência de cálculo de escoamento do aço da armadura de cisalhamento |
| f_{cm} | Resistência média do concreto |
| $f_{fe} = f_{frp,e}$ | Tensão efetiva da fibra na seção de análise |
| $h_{frp,e}$ | Altura efetiva da fibra |
| k_1 | Fator de modificação, leva em conta a resistência do concreto |
| k_2 | Fator de modificação, leva em conta a forma de colocação da fibra |
| k_v | Coefficiente redutor da aderência |

| | |
|-------------------------|---|
| L_e | Comprimento efetivo da fibra |
| M_o | Momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção |
| $M_{Sd,máx}$ | Momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise |
| M_u | Momento fletor último |
| n | Número de camadas de fibra |
| n_f | Relação modular da elasticidade entre PRF e o concreto |
| s | Espaçamento dos estribos, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural |
| s_f | Espaçamento entre lâminas de fibra de centro a centro das fibras |
| $t_f = t_{frp}$ | Espessura da fibra ou espessura de uma camada de fibra |
| V_{Sd} | Força cortante solicitante de cálculo, na seção |
| V_{Rd2} | Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto |
| V_{Rd3} | Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal |
| V_{Rd} | Resistência ao cisalhamento |
| $V_c = V_{cd}$ | Parcela de força cortante resistida pelo concreto |
| $V_s = V_{sw} = V_{wd}$ | Parcela de força resistida pela armadura transversal |
| V_u | Esforço de cisalhamento fatorizado na seção de análise |
| V_n | Resistência nominal ao cisalhamento |
| $V_{Rd,c}$ | Valor de cálculo do esforço cortante resistente do elemento sem armadura de cisalhamento |
| $V_{Rd,s}$ | Valor de cálculo do reforço cortante suportado por um elemento com armadura de cisalhamento |
| $V_{Rd,max}$ | Valor máximo de reforço cortante suportado sem ocorrência de esmagamento das bielas de compressão do concreto |
| V_f | Contribuição do PRF na resistência ao cisalhamento |
| v_1 | Fator de eficácia |

| | |
|-----------------|--|
| $w_f = w_{frp}$ | Largura da fibra |
| σ_{cp} | Razão entre o esforço normal e a área total, na seção de concreto |
| τ_{wu} | Tensão nominal última de cisalhamento |
| α | Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural Inclinação da fibra para elementos reforçados |
| θ | Ângulo entre a biela e o eixo longitudinal da peça Ângulo da fissura diagonal respeito do eixo longitudinal da peça, assumido igual a 45° para elementos reforçados |
| γ_c | Coefficiente de ponderação da resistência do concreto |
| γ_f | Fator de seguridade |
| λ | Função da densidade do concreto |
| λ | Comprimento de aderência máximo da norma para reforço |
| $\rho = \rho_1$ | Taxa geométrica de armadura longitudinal |
| ρ_f | Taxa de armadura do PRF |
| ψ_f | Fator de redução |
| PRF | Polímeros reforçados com fibra |
| PRFA | Polímeros reforçados com fibra de aramida |
| PRFC | Polímeros reforçados com fibra de carbono |
| PRFV | Polímeros reforçados com fibra de vidro |

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As construções de concreto armado muitas vezes têm sua vida útil limitada devido a fenômenos externos que acontecem (mudança na funcionalidade, deterioração da estrutura com o decorrer do tempo, impactos, entre outros) ou a falhas na etapa de projeto e construção, necessitando-se assim que estas sejam reforçadas para aumentar a capacidade portante das estruturas.

Os tipos de reforço mais utilizados são:

- Reforço mediante adição de concreto simples ou armado;
- Encamisamento;
- Concreto projetado
- Reforço por adição de perfis metálicos;
- Reforço por adição de chapas metálicas coladas;
- Reforço por colagem de lâminas de compósitos de fibras.

A Figura 1.1 mostra alguns dos tipos de reforço utilizados.



Reforço por adição de perfis metálicos.

Reforço por adição de chapas metálicas.

Reforço por encamisamento.

Figura 1.1: Tipos de reforço empregados (<http://www.zaldigain.com>, 2016)

O método que revolucionou na atualidade a forma de abordagem dos reforços nas estruturas de concreto, é o reforço com compósitos de fibra. Estes tipos de materiais compósitos consistem em uma fibra de resina polimérica, conhecidos como polímeros reforçados com fibra. Este tem como objetivo aumentar a ductilidade e capacidade resistente dos elementos

reforçados aumentando sua vida útil. Além da redução de custos de material, possui alta resistência à tração, baixa relaxação e imunidade à corrosão.

Existem três tipos fundamentais de reforços com fibra; reforços com fibra de vidro, fibra de aramida e com fibra de carbono. A presente pesquisa centra-se nos reforços com fibra de carbono. Figura 1.2

No caso da aplicação dos polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) ao reforço de vigas ao cisalhamento, provoca um acréscimo da resistência ao corte resultando em rupturas a flexão, as quais apresentam ductilidade se comparada com as rupturas das vigas ao cisalhamento que tendem a ser abruptas.



Figura 1.2: Tipos de reforços ao cisalhamento em vigas de concreto armado
(<http://www.zaldigain.com>, 2016)

1.2. MOTIVAÇÃO

Embora a utilização desses compósitos, formados da combinação de dois ou mais materiais com características mecânicas distintas dos componentes individuais, tenha sido feita de forma empírica, seu desenvolvimento e emprego como material de construção sofre um aumento muito rápido, evidenciando assim a necessidade de se fazer estudos e pesquisas a fim de conhecer melhor suas características e aplicabilidades.

Partindo do antes exposto e conhecendo a complexidade na hora de fazer o dimensionamento dos reforços ao cisalhamento em vigas com compósitos de fibra de carbono (PRFC), é preciso conhecer as expressões que melhor representam o comportamento do reforço, a partir da recopilação dos resultados experimentais de pesquisadores no Brasil e no Mundo. Surgindo assim a principal motivação da pesquisa, contribuir ao desenvolvimento de uma metodologia de trabalho que facilite o dimensionamento do reforço ao cisalhamento com emprego de

compósitos de fibra de carbono (PRFC), a partir dos resultados de estudos experimentais já realizados.

1.3. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral a criação de um banco de dados conjuntamente com uma metodologia de cálculo para o dimensionamento de vigas de concreto armado, reforçadas com polímeros de fibra de carbono (PRFC) ao cisalhamento.

Os objetivos específicos são a análise dos resultados experimentais de pesquisas feitas no Brasil e no Mundo de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com polímeros de fibra de carbono (PRFC) para a criação de um banco de dados, bem como avaliar a aplicação de algumas prescrições normativas para o cálculo ao cisalhamento, estabelecidas pelo ACI 318-2014, ABNT NBR 6118-2014, ACI 440.2R 2008, e pelo CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e as proposições dos pesquisadores Zsutty (1968), e Chen & Teng (2003); assim como a predição do modo de falha das vigas em função da forma de colocação e ancoragem do reforço.

1.4. METODOLOGIA

Para atingir aos resultados propostos, a metodologia será a realização da revisão bibliográfica, na qual são apresentados as recomendações normativas e guias para o dimensionamento do reforço com PRFC. Analisar estudos nacionais e internacionais para a conformação de um banco de dados que poderá ser alimentado continuamente. Analisar os resultados obtidos pelas pesquisas deste banco de dados e compara-los com as normativas atuais no dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com fibra de carbono (PRFC) ao cisalhamento. E por último recomendar a metodologia de trabalho e as formulações que melhor se adequam ao desempenho deste tipo de reforço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRELIMINARES

O fenômeno do cisalhamento em estruturas de concreto armado é complexo devido a sua dependência com o desenvolvimento de mecanismos internos, sendo a sua magnitude e combinação, sem dúvida, tema de debate e pesquisa.

A resistência ao cisalhamento encontra-se determinada pela contribuição oferecida pela zona de compressão não fissurada, resistência dos agregados e armadura de cisalhamento, quando presente (CEB–FIB, *Bulletin* 14, 2001).

Inúmeros são os pesquisadores que ao longo do tempo desenvolveram pesquisas no entendimento do comportamento das estruturas de concreto armado ao cisalhamento, mas um dos maiores descobrimentos foi a teoria da analogia da Treliça de Morsch (1909). Outros pesquisadores desenvolveram metodologias, mas a complexidade do tema faz com que a aplicação desses modelos diretamente nas equações de dimensionamento seja difícil. A maioria das normativas e prescrições de dimensionamento são baseadas em aproximações semi-empíricas, supondo que os mecanismos para a resistência são plásticos e que a redistribuição de tensões possa ocorrer seguindo o escoamento da armadura (CEB–FIB, *Bulletin* 14, 2001).

Neste capítulo serão comentadas as prescrições normativas relativas ao dimensionamento e revisão da armadura ao cisalhamento de vigas de concreto armado, bem como as recomendações do pesquisador Zsutty (1968), além disso, as prescrições normativas para o dimensionamento ao cisalhamento de reforços com compósitos de fibra de carbono (PRFC) e as recomendações e adaptações dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

São apresentadas também considerações gerais sobre os tipos de fibras empregadas no reforço de estruturas de concreto armado, as características do compósito e as vantagens de um tipo de fibra em relação a outro.

2.2. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS E ESTUDOS DE ZSUTTY (1968) PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS AO CISALHAMENTO

As prescrições normativas apresentadas relativas ao dimensionamento da armadura ao cisalhamento serão escolhidas de acordo com as normas ABNT NBR. 6118 (2014), ACI 318 (2011) e as recomendações de Zsutty (1968). O objetivo final é determinar qual e/ou quais são as formulações que melhor aproximam os resultados experimentais obtidos com as formulações analíticas.

2.2.1. Disposições da Norma ABNT NBR. 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto

A ABNT NBR 6118 (2014) em seu item 17.4.1 prescreve que, para elementos lineares admitem-se dois modelos de cálculo que pressupõem a analogia com modelo em treliça, de banzos paralelos, associado a mecanismos resistentes complementares desenvolvidos no interior do elemento estrutural e traduzidos por uma componente adicional V_c .

- Modelo I: Diagonais de compressão inclinadas ($\theta = 45^\circ$) em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, e V_c tem valor constante.
- Modelo II: Diagonais de compressão inclinadas ($30^\circ < \theta < 45^\circ$) em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, e V_c é reduzida com o aumento de V_{sd} .

Em seu item 17.4.1.1.1 a ABNT NBR. 6118 (2014) condicionam que todos os elementos lineares submetidos à força cortante, com exceção dos:

- Elementos estruturais lineares com $b_w > 5 d$ (em que d é a altura útil da seção), caso que deve ser tratado como laje.
- As nervuras de lajes nervuradas, que também podem ser verificadas como lajes.

($e \leq 65$ cm)

- Os pilares e elementos lineares de fundação submetidos predominantemente à compressão.

Devem conter armadura transversal mínima constituída por estribos:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \text{ sen}\alpha} \geq 0,2 \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}} \quad \text{Equação 2.1}$$

5

Onde:

ρ_{sw} : Quantia geométrica

A_{sw} : Área da seção transversal dos estribos, expresso em (mm²)

s : Espaçamento dos estribos, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, expresso em (mm)

b_w : Largura média da alma, medida ao longo da altura útil da seção, expresso em (mm)

f_{ywk} : Resistência de cálculo de escoamento do aço da armadura de cisalhamento, expresso em (MPa)

$f_{ct,m}$: Resistência média à tração do concreto, expresso em (MPa)

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Para concretos até C50}) \quad \text{Equação 2.2}$$

f_{ck} : Resistência característica/especificada à compressão do concreto, expresso em (MPa)

2.2.1.1. Verificação do Estado Limite Último. (ELU)

Em uma determinada seção transversal a resistência do elemento estrutural, é considerada satisfatória, quando verificadas simultaneamente as seguintes condições:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

V_{Sd} : força cortante solicitante de cálculo, na seção.

V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, de acordo com os modelos indicados em 17.4.2.2 ou 17.4.2.3 da ABNT NBR. 6118 (2014).

V_{Rd3} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_{sw} é a parcela resistida pela armadura transversal, de acordo com os modelos indicados em 17.4.2.2 ou 17.4.2.3 da ABNT NBR. 6118 (2014).

2.2.1.2. Modelo de cálculo I.

- Verificação da compressão diagonal do concreto.

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad \text{Equação 2.5}$$

Com:

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad \text{Equação 2.6}$$

- Cálculo da armadura transversal.

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) 0,9df_{ywd}(\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) \quad \text{Equação 2.8}$$

$V_c = 0$: nos elementos estruturais tracionados quando a linha neutra situasse fora da seção.

$V_c = V_{c0}$: na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção.

V_c na flexo-compressão é obtida pela Equação 2.9 abaixo.

$$V_c = V_{c0} \left(1 + \frac{M_o}{M_{sd,m\acute{a}x}}\right) \leq 2V_{c0} \quad \text{Equação 2.9}$$

Com:

$$V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad , \quad f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} \quad e \quad f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

f_{ywd} : limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70% desse valor no caso de barras dobradas.

γ_c : para condições normais, $\gamma_c = 1,4$.

γ_s : para condições normais, $\gamma_s = 1,15$.

α : pode-se tomar $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

M_o : é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção, sendo essa tensão calculada com valores de γ_f e γ_p iguais a 1,0 e 0,9.

$M_{sd,max}$: é o momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise.

2.2.1.3. Modelo de cálculo II.

- Verificação da compressão diagonal do concreto.

$$V_{Rd2} = 0,54\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \operatorname{sen}^2\theta(\cotg\alpha + \cotg\theta) \quad \text{Equação 2.11}$$

- Cálculo da armadura transversal.

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad \text{Equação 2.12}$$

Onde:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) 0,9df_{ywd}(\cotg\alpha + \cotg\theta)\operatorname{sen}\alpha \quad \text{Equação 2.13}$$

$V_c = 0$, em elementos estruturais tracionados quando a linha neutra situasse fora da seção.

$V_c = V_{c1}$, na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção.

V_c na flexo-compressão é obtida pela Equação 2.14 abaixo.

$$V_c = V_{c1} \left(1 + \frac{M_o}{M_{sd,max}}\right) \leq 2V_{c1} \quad \text{Equação 2.14}$$

Com:

$$V_{c1} = V_{c0} \text{ quando } V_{sd} \leq V_{c0}$$

$V_{c1} = 0$ quando $V_{sd} = V_{Rd2}$, interpolando-se linearmente para valores intermediários.

2.2.2. Disposições do ACI. 318 (2011): Requerimentos de norma para concreto estrutural

Segundo o ACI. 318 (2011) de acordo com 11.1.1, o dimensionamento ao cisalhamento de estruturas de concreto armado baseia-se na Equação 2.15, sendo adotado o fator de redução da capacidade resistente da viga ao cisalhamento, $\phi = 0,75$.

$$V_u \leq \phi V_n \quad \text{Equação 2.15}$$

Onde:

V_u : Esforço de cisalhamento majorado na seção de análise.

V_n : Resistência nominal ao cisalhamento. Equação 2.16.

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde:

V_c : Parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento.

V_s : Parcela de força resistida pela armadura de cisalhamento.

2.2.2.1. Parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento.

Para elementos sometidos unicamente a cisalhamento e flexão, no item 11.2.1.1, a resistência ao cisalhamento pode ser obtida pela Equação 2.17 abaixo.

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \leq 0,29\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad \text{Equação 2.17}$$

Onde:

V_c : Parcela de força cortante resistida pelo concreto, expressos em (N).

b_w : Largura média da alma, medida ao longo da altura útil da seção, expressos em (mm).

d : Altura útil da seção, igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração, expressos em (mm).

f'_c : Resistência característica/especificada à compressão do concreto, expresso em (MPa).

$\sqrt{f'_c} \leq 8.3$ MPa, para elementos sem reforço ao cisalhamento.

λ : toma o valor um (1) para concreto de peso normal.

A norma no item 11.2.2.1 sugere uma expressão refinada para calcular a contribuição do concreto para a resistência ao cisalhamento, V_c . Esta expressão considera a taxa geométrica de armadura longitudinal (levando em conta o efeito pino) e a relação a/d . A Equação 2.18 apresenta este cálculo refinado.

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f'_c} + 0,17\rho\frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b_wd \leq 0,29\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde:

V_c e V_u : são expressos em (N).

f'_c : expresso em (MPa).

b_wd : expressos em (mm).

a/d : Razão entre a distancia do ponto de aplicação da carga ao apoio e à altura útil da seção.

Para vigas com duas cargas concentradas.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} \quad \text{e} \quad \frac{V_u d}{M_u} \leq 1.0$$

M_u : Momento fletor último, expresso em (N.mm)

V_u : Esforço de cisalhamento fatorizado na seção de análise, expresso em (N)

2.2.2.2. Parcela de força resistida pela armadura de cisalhamento.

A equação 2.19 fornece o valor de V_s para estribos perpendiculares ao eixo da peça, assumindo as condições de que todos os estribos que atravessam a fissura ao cisalhamento encontram-se escoando. Item 11.4.7.2 e 11.4.7.9.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} \cdot d}{s} \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Equação 2.19}$$

Onde:

V_s : Parcela de força resistida pela armadura transversal, expresso em (N).

A_v : Área da seção transversal dos estribos, expresso em (mm²).

s : Espaçamento dos estribos, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, expresso em (mm).

f_{yt} : Resistência característica/especificada ao escoamento do aço da armadura transversal, expresso em (MPa).

f'_c : Resistência característica/especificada à compressão do concreto, expresso em (MPa).

b_w : Largura média da alma, medida ao longo da altura útil da seção, expressos em (mm).

d : Altura útil da seção, igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração, expressos em (mm).

2.2.2.3. Aspectos construtivos

A resistência de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento à tração, não deve exceder 420 MPa (para não sobrestimar a capacidade resistente do aço), e o espaçamento entre estribos não deve ser superior a $d/2$ ou 600 mm. A Equação 2.20 utiliza-se para calcular a área mínima da armadura ao cisalhamento; item 11.4.6.3.

$$A_{v,min} = 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \leq \left(\frac{0,35 b_w s}{f_{yt}} \right) \quad \text{Equação 2.20}$$

2.2.3. Disposições segundo ZSUTTY (1968): Previsão da resistência ao cisalhamento

Os estudos iniciais do professor Theodore C. Zsutty membro do *American Concret Institute* ACI resultaram uma publicação no jornal científico do ACI em 1968 sobre um método empírico que combina técnicas de análise dimensional com análise estatística de regressão aplicada a fontes de dados de vigas de concreto armado testadas ao cisalhamento. No seu estudo de 1971 avalia as formulações da normativa vigente na época o ACI 318 (1963), concluindo que não eram as mais precisas representações do comportamento de vigas previamente testadas, mas o desejo de manter os métodos de dimensionamento já estabelecidos e previsões conservadoras manteriam as formulações da norma. Mas Zsutty desenvolveu equações empíricas para análise da resistência ao cisalhamento baseada nas propriedades de dimensionamento a/d , f'_c , ρ e f_{yd} .

De acordo com Zsutty (1968), a resistência ao esforço cortante último das vigas é dada por:

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) \quad \text{Equação 2.21}$$

Onde:

$\phi = 0,85$: Coeficiente de minoração da capacidade resistente.

2.2.3.1. Parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento

Para as vigas com relação $a/d \geq 2,5$ a parcela de esforço cortante resistida pelo concreto é determinada por:

$$V_c = 2,3b_w d \sqrt[3]{f'_c \rho \frac{d}{a}} \quad \text{Equação 2.22}$$

Onde:

V_c : expressos em (N).

$b_w d$: expressos em (mm).

f'_c : expresso em (MPa).

a : Distancia desde o ponto de aplicação da carga até o apoio, para cargas concentradas, expresso em (mm)

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d}$$

Para as vigas com a relação $a/d < 2,5$ a Equação 2.22 é multiplicada por um fator linear que leva em conta a ação de arco. Por conseguinte, a parcela resistida pelo concreto é dada por:

$$V_c = \left(\frac{2,5}{a/d}\right) \left(2,3b_w d \sqrt{f'_c \rho \frac{d}{a}}\right) \quad \text{Equação 2.23}$$

2.2.3.2. Parcela de força resistida pela armadura ao cisalhamento

A parcela do esforço cortante resistida pelos estribos é dada pela Equação 2.24 abaixo:

$$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s} \quad \text{Equação 2.24}$$

A tensão nominal última ao cisalhamento, para vigas com armadura transversal, é dada por:

$$\tau_{wu} = \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + \rho f_{yw} \right) \quad \text{Equação 2.25}$$

Sendo

τ_{wu} , a tensão resistente nominal última ao cisalhamento.

2.3. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS E ESTUDOS DE CHEN E TENG (2003) PARA O DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO EM VIGAS AO CISALHAMENTO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)

As prescrições normativas apresentadas relativas ao dimensionamento do reforço com fibra ao cisalhamento serão escolhidas do código CEB – FIB, *Bulletin* 14. (2001), da norma ACI 440.2R (2008) e as recomendações dos pesquisadores Chen e Teng (2003). O objetivo final é determinar em função das formas do reforço qual/quais são as formulações que melhor aproximam os resultados experimentais sem comparadas com os obtidos pelas formulações analíticas.

No caso dos sistemas de reforço com fibra de carbono (PRFC) deveriam ser dimensionados para resistir às forças de tração, mantendo a compatibilidade de deformação entre o reforço (PRFC) e a superfície de concreto, sendo que o reforço (PRFC) não deve ser dimensionado para suportar cargas de compressão, porém, é aceitável que tome os esforços de compressão se eles decorrem a inversões de momento ou mudanças no padrão do carregamento.

2.3.1. Disposições do CEB – FIB, *Bulletin 14*. (2001): Reforço de PRF colados externamente em estruturas de concreto armado

Baseada nos modelos desenvolvidos por pesquisadores como Triantafillou (1998) e Täljsten (1999), os quais propõem que o reforço de PRF pode ser tratado em analogia ao aço de reforço interno assumindo que no estado limite último de cisalhamento (tração diagonal no concreto), o PRF desenvolve uma deformação efetiva na direção principal do reforço que, em geral, é menor que a deformação de tensão de ruptura. (SPAGNOLO *et al.*, 2013)

A capacidade resistente ao cisalhamento de um elemento reforçado calcula-se pela Equação 2.26 abaixo.

$$V_{Rd} = (V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}V_{Rd2}) \quad \text{Equação 2.26}$$

Onde:

V_{Rd} : resistência ao cisalhamento

V_{cd} : parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento.

V_{wd} : parcela de força resistida pela armadura de cisalhamento.

V_{fd} : contribuição do reforço (PRF), Equação 2.27 abaixo.

V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto.

$$V_{fd} = 0.9\varepsilon_{fd,e}E_{fu}\rho_f b_w d(\cot\theta + \cot\alpha)\text{sen}\alpha \quad \text{Equação 2.27}$$

Onde:

$\varepsilon_{fd,e}$: Deformação da fibra

E_{fu} : Modulo de elasticidade da fibra

b_w : Largura média da alma, medida ao longo da altura útil da seção

d : Altura útil da seção, igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração

θ : Ângulo da fissura diagonal respeito do eixo longitudinal da peça, assumido igual a 45° para elementos reforçados

α : Inclinação da fibra para elementos reforçados

γ_f : Fator de seguridade

ρ_f : Taxa de armadura do PRF

t_f : Espessura da fibra

b_f : Largura da fibra

s_f : Espaçamento de centro a centro das fibras

$$\varepsilon_{fk,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} \quad ; \quad \gamma_f = \gamma_{fb} = 1.30 \quad ; \quad \rho_f = (2t_f/b_w)(b_f/s_f)$$

$$s_f \leq \left(0.9d - \frac{b_f}{2}\right) \quad \text{Para seções retangulares.}$$

$$s_f \leq \left(d - h_f - \frac{b_f}{2}\right) \quad \text{Para seções T, com } h_f: \text{ espessura da aba.}$$

Sendo:

$$\varepsilon_{fk,e} = k\varepsilon_{f,e} \quad ; \quad k = 0.8$$

Onde:

$\varepsilon_{f,e}$: Deformação da fibra

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad \text{Para envolvimento completo da peça com (PRFC)}$$

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3} , 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \right] \quad \text{Para reforço em "U" com (PRFC)}$$

$$\varepsilon_{f,e} = 0.048 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu}\rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad \text{Para envolvimento completo da peça com (PRFA)}$$

E_{fu} : Modulo de elasticidade da fibra, expresso em (GPa)

f_{cm} : Resistência média do concreto, expresso em (MPa)

2.3.2. Disposições do ACI 440.2R (2008): Guia para dimensionamento e construção de sistemas de PRF colados externamente para reforço de estruturas de concreto

As recomendações apresentadas pelo ACI 440.2R (2008), encontram-se baseadas nos princípios tradicionais de projeto de concreto armado dispostos no ACI 318 (2008) e o conhecimento do comportamento mecânico do reforço (PRF). Estas recomendações baseiam-se no princípio dos estados limites, definindo-se nível aceitáveis de segurança para a ocorrência dos estados limites de utilização (deslocamentos ou flechas excessivas e fissuras) e dos estados limites último (falha, ruptura e fadiga).

A Figura 2.1 mostra as formas utilizadas para fazer o reforço com fibra, sendo três fundamentalmente os tipos empregados, a primeira é a mais efetiva, mas é a mais difícil de executar na obra para o caso de vigas pela presença da laje acima, sendo as mais utilizadas o reforço em “U” e nas laterais.

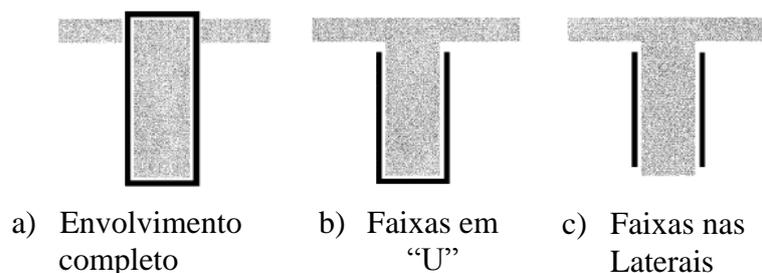


Figura 2.1: Alternativas de colocação da fibra para reforços ao cisalhamento (ACI 440.2R, 2008)

2.3.2.1. Contribuição do concreto e armadura transversal na resistência nominal ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento está dada pela Equação 2.28 a qual leva em conta um coeficiente de minoração da capacidade resistente ($\phi = 0,75$).

$$V_u \leq \phi(V_n) \quad \text{Equação 2.28}$$

Na determinação da resistência nominal ao cisalhamento do reforço com fibra (PRF), considerar-se a adição da contribuição do reforço (V_f) ao mecanismo resistente ao cisalhamento (estribos e concreto), Equação 2.29. Além de um fator de redução (ψ_f) aplicado na contribuição do sistema (FRP). Item 11.3 do ACI 440.2R (2008).

$$\phi(V_n) = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad \text{Equação 2.29}$$

A parcela de força resistida pelo concreto ao cisalhamento é obtida pela Equação 2.17 e Equação 2.18, e a parcela de força resistida pela armadura de cisalhamento pela Equação 2.19 do ACI. 318 (2011)

Baseado nos estudos de confiabilidade de Boussetham e Chaallal (2006), Deniaud e Cheng (2001, 2003), Funakawa *et al.* (1997), Matthys e Triantafillou (2001), e Pellegrino e Modena (2002), o fator de redução (ψ_f) recomendado para o reforço em “U” e nos laterais, é $\psi_f = 0,85$, para o reforço envolvendo a peça toda o fator $\psi_f = 0,95$.

2.3.2.2. Contribuição do reforço (PRF) no mecanismo resistente ao cisalhamento

A contribuição do reforço (PRF) (V_f) baseia-se na orientação da fibra e o padrão de fissuração assumido, Equação 2.30 abaixo.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad \text{Equação 2.30}$$

Com:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad \text{Equação 2.31}$$

Onde:

A_{fv} : Área da seção transversal da fibra, expresso em (mm²)

f_{fe} : Tensão efetiva da fibra na seção de análise, expresso em (MPa); Equação 2.32

d_{fv} : Altura útil da fibra, expresso em (mm)

s_f : Espaçamento de centro a centro das fibras, expresso em (mm);

$$s_f \leq \frac{d}{4} + w_f$$

t_f : Espessura da fibra, expresso em (mm)

w_f : Largura da fibra, expresso em (mm)

n : Número de camadas de fibra

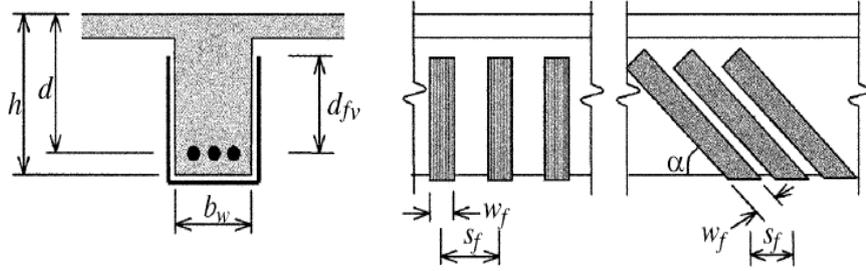


Figura 2.2: Ilustração das principais variáveis usadas no reforço ao cisalhamento
(ACI 440.2R, 2008)

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad \text{Equação 2.32}$$

Onde:

E_f : Modulo de elasticidade da fibra, expresso em (MPa)

k_v : Coeficiente redutor da aderência

L_e : Comprimento efetivo da fibra

$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{fu}$ Para envolvimento completo da peça

$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004$ Para reforço em “U” e nos laterais

Onde:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \quad \text{Equação 2.33}$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad \text{Equação 2.34}$$

Com:

$$n_f = E_f / E_c \quad , \quad k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad , \quad k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{Para reforço em “U”} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{Para reforço nos laterais} \end{cases}$$

k_1 : Fator de modificação, leva em conta a resistência do concreto

k_2 : Fator de modificação, leva em conta a forma de colocação da fibra

2.3.2.3. Limites do reforço

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Equação 2.35}$$

2.3.3. Disposições segundo Chen e Teng (2003): Capacidade ao cisalhamento de vigas de concreto armado reforçadas com FRP.

Para Chen e Teng (2003), as causas principais da falha das fibras ocorrem pela ruptura e descolagem da fibra, baseando sua teoria em uma ampla base de dados e conhecendo as limitações dos métodos de dimensionamento da parcela resistida pelo reforço (tipo de envolvimento do reforço, tipo de ligação entre concreto e fibra), propõem dois modelos racionais para o dimensionamento ao cisalhamento da parcela resistida pela fibra (para ruptura do reforço e ruptura por descolamento do reforço), que tentam suprir as limitações achadas nos modelos existentes (modelo de Chaallal *et al.*(1998), modelo de Triantafillou (1998), modelo de Triantafillou e Antonopoulos (2000) propor a extensão do modelo de Triantafillou (1998), recomendado pelo CEB – FIB, Bulletin 14. (2001) e modelo de Khalifan *et al.* (1998) adotado pelo “Concrete Society in UK”), além da previsão de uma deformação específica racional e não tão empírica.

A contribuição da parcela do reforço ao cisalhamento (V_{frp}) pode ser expressa segundo Equação 2.36 e Figura 2.3 abaixo.

$$V_{frp} = 2f_{frp,e}t_{frp}w_{frp}\frac{h_{frp,e}(\cot\theta + \cot\beta)\text{sen}\beta}{s_{frp}} \quad \text{Equação 2.36}$$

Com:

$$f_{frp,e} = D_{frp}\sigma_{frp,max} \quad \text{Equação 2.37}$$

Onde:

$\sigma_{frp,max}$: Tensão máxima na fibra.

D_{frp} : Fator de distribuição da tensão.

$f_{frp,e}$: Tensão efetiva da fibra na seção de análise

t_{frp} : Espessura da fibra

w_{frp} : Largura da fibra

$h_{frp,e}$: Altura efetiva da fibra

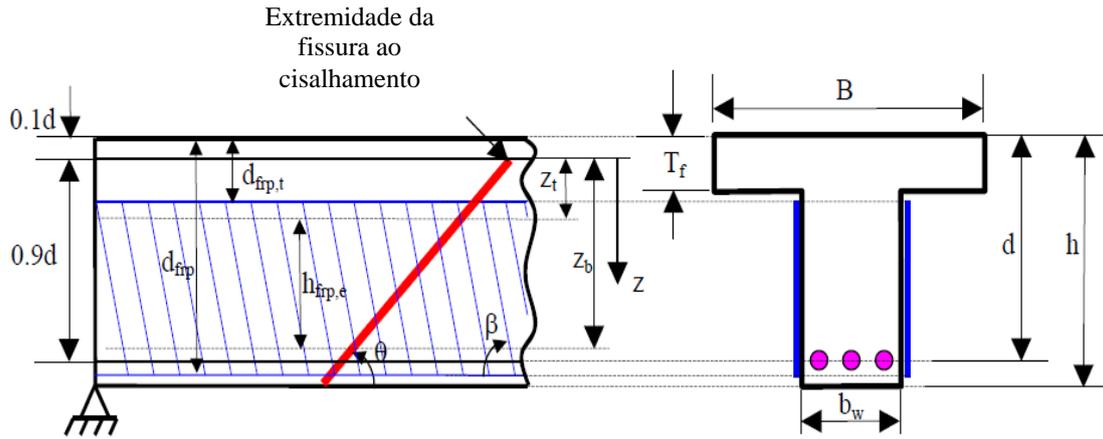


Figura 2.3: Ilustração das principais variáveis usadas no reforço ao cisalhamento (CHEN e TENG, 2003).

Da análise dos resultados experimentais comprovou-se que existe um comprimento de ancoragem efetivo, sendo que um aumento nesse comprimento não aumenta a resistência da ligação concreto-fibra, portanto, essa é a principal diferença entre o reforço de fibra colado externamente e o reforço interno.

Por tanto a máxima tensão no reforço, ocorre onde o FRP tem o maior comprimento de ancoragem. Equação 2.38 e Equação 2.40.

- Para ruptura por deslocamento:

$$\sigma_{frp,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{frp} \\ 0,427\beta_w\beta_L \sqrt{\frac{E_{frp}\sqrt{f'_c}}{t_{frp}}} \end{array} \right\} \quad \text{Equação 2.38}$$

Com:

$$\beta_L = \begin{cases} 1, & \lambda \geq 1 \\ \text{sen} \frac{\pi\lambda}{2}, & \lambda < 1 \end{cases}, \quad \beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_{frp}/(S_{frp}\text{sen}\beta)}{1 + w_{frp}/(S_{frp}\text{sen}\beta)}}$$

Onde:

λ : Comprimento de aderência máximo da norma

$\beta_w = \sqrt{2}/2$ para faixas contínuas do reforço pois $w_{frp}/(S_{frp}\text{sen}\beta) = 1$.

O fator de distribuição da tensão (D_{frp}). Equação 2.47

$$D_{frp} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{2}{\pi\lambda} \frac{1 - \cos \frac{\pi\lambda}{2}}{\sin \frac{\pi\lambda}{2}}, & \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi-2}{\pi\lambda}, & \lambda > 1 \end{array} \right\} \quad \text{Equação 2.39}$$

Com:

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}, \quad L_e = \sqrt{\frac{E_{frp} t_{frp}}{\sqrt{f'_c}}}, \quad L_{max} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{h_{frp,e}}{\text{sen}\beta} & \text{Para reforço em "U"} \\ \frac{h_{frp,e}}{2\text{sen}\beta} & \text{Para reforço nas laterais} \end{array} \right\}$$

- Para ruptura do FRP:

Sendo:

$$\sigma_{frp,max} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0.8 \frac{f_{frp}}{\gamma_{frp}} & \text{sem } \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \leq \varepsilon_{max} \\ 0.8 \frac{\varepsilon_{max} E_{frp}}{\gamma_{frp}} & \text{sem } \frac{f_{frp}}{E_{frp}} > \varepsilon_{max} \end{array} \right\} \quad \text{Equação 2.40}$$

O fator de distribuição da tensão (D_{frp}). Equação 2.49

$$D_{frp} = \frac{1 + \frac{z_t}{z_b}}{2} \quad \text{Equação 2.41}$$

2.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE REFORÇO COM COMPÓSITO DE FIBRA (PRF), EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

São apresentadas considerações gerais sobre os tipos de fibras empregadas no reforço de estruturas de concreto armado, as características do compósito e as vantagens de um tipo de fibra a respeito de outro tipo de fibra.

2.5. PRELIMINARES

Os materiais compósitos vêm-se empregando faz mais de 40 anos, em diferentes ramos da engenharia. Na área da construção civil sua utilização é bastante recente e o aumento do uso desses materiais compósitos deve-se aos benefícios e vantagens que eles proporcionam, (flexibilidade de forma, resistências às variações climáticas, resistência à corrosão, isolamento térmico, elétrico e acústico, resistência ao fogo de algum dos materiais compostos, resistência à fadiga, dureza, ductilidade, redução de peso, aparência estética).

Estes tipos de materiais compósitos, feitos de fibra numa resina polimérica, conhecidos como polímeros reforçados com fibra (*Fiber Reinforced Polymers FRP*, por suas siglas em inglês), têm revolucionado a forma de abordar os reforços nas estruturas de concreto armado na atualidade.

2.5.1. Materiais Compósitos

Segundo Mendonça (2005), define-se como material compósito, um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, tendendo a obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta.

Fases constituintes:

Adesivos: Resinas empregadas na colagem do sistema compósito.

Matriz: Resina que aglomeram o reforço, para lograr as propriedades desejadas.

Reforço: Material específico de atesto que serve de reforço.

Os adesivos têm como finalidade a colagem do sistema composto, estabelecendo um meio de transferência das tensões entre o substrato de concreto e o material laminado, ou mesmo entre diversas camadas de compósitos laminados.

A matriz tem a missão de transmitir os esforços ao reforço, fazendo a função de aglomerante e proteção da fibra contra a abrasão e corrosão do entorno, aportando maior flexibilidade e proporciona a forma. Apresentando menor resistência do que o reforço.

O reforço aporta resistência mecânica, rigidez, dureza e é determinante para obter as principais propriedades mecânicas do compósito. As principais características são sua resistência à tração específica, elevado módulo de elasticidade e alta fragilidade.

Dependendo das propriedades das fases, da proporção de cada uma delas, da geometria (forma, tamanho, orientação) e o grau de dispersão da fase dispersa, serão as características finais do material composto.

2.5.2. Classificação dos Materiais Compósitos em função das fases

Dependendo do tipo de matriz empregado:

- Compósitos de matriz polimérica.

Compósitos de poliéster e resinas epóxis reforçadas com fibra de vidro, fibra de carbono ou fibra de aramida. Sua maior desvantagem: limitação ao uso em altas temperaturas.

- Compósitos de matriz metálica.

Ligas de alumínio, titânio e magnésio. Utilizadas na indústria automobilística principalmente.

- Compósitos de matriz cerâmica.

Óxido de alumínio e carboneto de silício.

Dependendo do tipo de reforço empregado:

- Compósitos por partículas.

Partículas numa matriz.

- Compósitos fibrosos.

Fibras numa matriz.

- Compósitos laminados.

Camadas alternadas das fases.

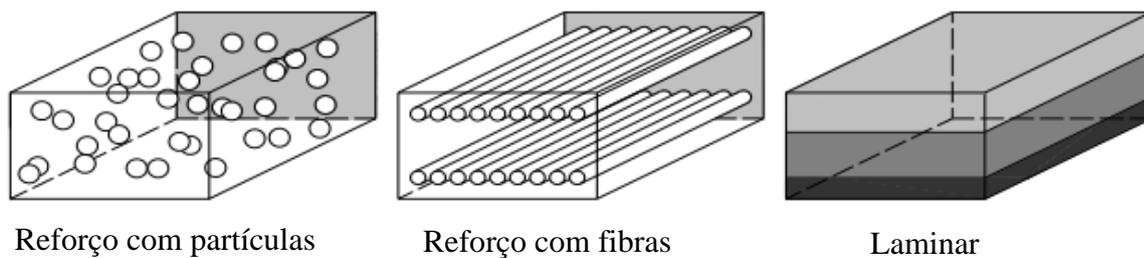


Figura 2.4: Materiais Compósitos em função do tipo de reforço (MOLINA, 2012)

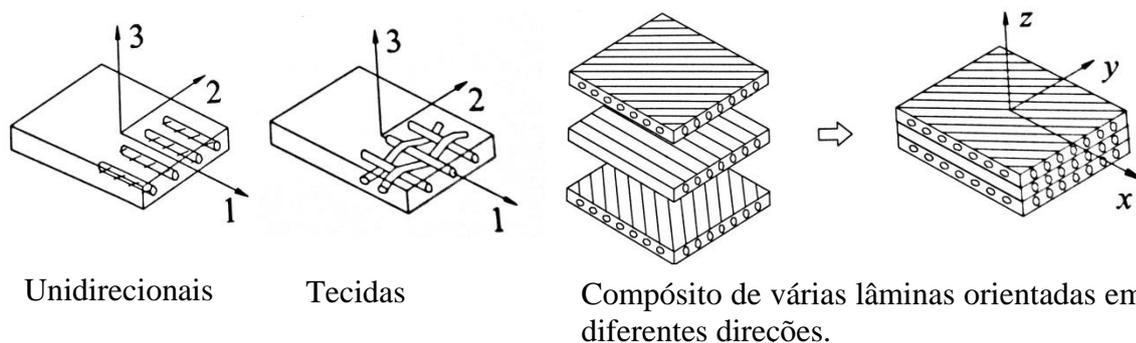


Figura 2.5: Tipos de fibra (MENDONÇA, 2005)

Embora a vasta utilização dos materiais composto na engenharia, a pesquisa baseia-se nos compostos de matriz polimérica, pelo fato de serem os mais empregados como material de reforço em estruturas de concreto armado.

2.5.3. Materiais compósitos de matriz polimérica.

2.5.3.1. Descrições dos adesivos.

A função do adesivo da resina é fornecer uma trajetória de cisalhamento entre a superfície do concreto e o material compósito, de modo que a ação completa do composto possa se desenvolver.

O adesivo estrutural mais comum é o adesivo epóxi, resultado da mistura de uma resina epóxi (polimérica) com um agente endurecedor.

Para uma perfeita aderência é necessário determinar os materiais a serem colados, relacionamento e exigências da mistura, tecnologia de aplicação, temperatura e umidade de

curado, técnicas de preparação da superfície, coeficientes de expansão térmica, escoamento, abrasão, resistência química e viscosidade em adesivos.

Quando são empregados adesivos epóxi se faz necessário conhecer conceitos fundamentais:

- **Pot life:** Tempo em que se pode trabalhar com o adesivo depois de misturar a resina e o endurecedor, antes que comece a endurecer no recipiente de preparação. Pode variar entre poucos segundos e vários anos.
- **Open Time:** Tempo máximo após a aplicação do adesivo sobre a superfície antes da união do material
- **Glass transition temperature:** Temperatura de transição. Ocorre uma perda de propriedades, o adesivo passa a ter um comportamento vítreo a um comportamento plástico sem prestações mecânicas.

Vantagens dos adesivos epóxis. Segundo CEB – FIB, *Bulletin* 14. (2001)

- Perfeita aderência sobre dissimiles suportes, especialmente suportes minerais, concreto, alvenaria, pedra.
- Tem um longo *Open Time*, para facilitar os trabalhos em obra.
- Elevada coesão interna e aderência.
- Possibilidades de elasticidade, mediante adições.
- Não forma subprodutos depois do endurecimento.
- Baixa retração em comparação com resinas de poliéster, vinylester e acrílicas.
- Baixo escoamento
- Formulação com thixotropic para fazer trabalhos em vertical.
- Capacidade de união em suportes irregular.

Na Tabela 2.1, mostram-se as propriedades mecânicas e físicas das resinas epóxi, comparadas com o concreto e o aço. Segundo CEB – FIB, *Bulletin* 14. (2001)

Tabela 2.1: Comparação das propriedades típicas dos: adesivo epóxi, concreto e aço
(CEB – FIB, *Bulletin* 14. 2001)

| Propriedades | Adesivo Epóxi endurecidos | Concreto | Aço |
|---|---------------------------|----------|-----------------------------------|
| Densidade (kg/m ³) | 1100 - 1700 | 2350 | 7800 |
| Módulo de Elasticidade (GPa) | 0,5 - 20 | 20 - 50 | 205 |
| Módulo de Cisalhamento (GPa) | 0,2 - 8 | 8 - 21 | 80 |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 - 0,4 | 0,2 | 0,3 |
| Resistência a Tração (MPa) | 9 - 30 | 1 - 4 | 200 - 600 |
| Resistência a Cisalhamento (MPa) | 10 - 30 | 2 - 5 | 200 - 600 |
| Resistência a Compressão (MPa) | 55 - 110 | 25 - 150 | 200 - 600 |
| Deformação na Rotura (%) | 0,5 - 5 | 0,015 | 25 |
| Energia de Fratura (Jm ⁻²) | 200 - 1000 | 100 | 10 ⁵ - 10 ⁶ |
| Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ /°C) | 25 - 100 | 11 - 13 | 10 - 15 |
| Absorção da água: 7 dias - 25 °C (% w/w) | 0,1 - 3 | 5 | 0 |
| Temperatura de Transição Vítrea (°C) | 60 - 80 | - | - |

2.5.3.2. Descrições das matrizes.

As características físicas e químicas da matriz (temperatura de fusão e curado, viscosidade e reação com as fibras), influenciam na eleição do processo de fabricação.

As matrizes podem ser termofixas ou termoplásticas, sendo o primeiro tipo as mais empregadas. A função da matriz é a proteção das fibras contra abrasão, corrosão do entorno e danos provenientes do manuseio ou desgaste pelo uso, além disso, ela une o conjunto e distribuição das cargas.

O termoplástico é aquele onde os polímeros amolecem ou fundem quando aquecidos. Eles possuem fortes ligações intramoleculares, mais fracas ligações intermoleculares; o resfriamento restabelece as forças de ligação solidificando-o novamente. O processo de aquecimento-amolecimento-resfriamento-endurecimento é reversível, mas deve-se cuidar de suas propriedades mecânicas no processo de reutilização porque apresenta uma redução parcial das propriedades em cada processo. O fato de ser reversível é um dos aspectos mais importantes na utilização das matrizes termoplásticas.

Os termofixos apresentam comportamentos diferentes daqueles dos termoplásticos, uma vez que o material endurece, ele não pode ser fundido ou amolecido pelo calor. Aquecidos acima de certo limite, eles simplesmente se descompõem. Uma vantagem dos termofixos sob os

termoplásticos é que eles podem ser produzidos inteiramente a temperatura ambiente, desde a montagem de fibra e matriz até o processo final de cura.

As matrizes poliméricas compostas de resinas epóxi, poliéster e fenólicas são as mais comuns empregadas com as fibras de reforço. São polímeros termofixo com boa processabilidade e resistência química. As resinas epóxi têm em geral, melhores propriedades mecânicas que o poliéster e as fenólicas, e uma durabilidade excepcional; mas o poliéster e as fenólicas são mais econômicas.

Na seguinte Tabela 2.2, apresentam-se as principais vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais.

Tabela 2.2: Vantagens e Desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais. (MENDONÇA, 2005)

| Vantagens |
|--|
| (1) Facilidade de fabricação. |
| (2) Baixo peso, baixa densidade. |
| (3) Resistência a ataques químicos. |
| (4) Isolamento térmico e elétrico. |
| (5) Autolubrificação. |
| (6) Transparência. Foi a primeira classe de materiais transparente descoberta após séculos. |
| (7) Amortecimento mecânico, usado para absorção de energia. |
| Desvantagens |
| (1) Baixa resistência, mesmo considerando sua baixa densidade. |
| (2) Rigidez inferior à dos metais, cerâmicos e madeiras. |
| (3) Mais frágil que muitos metais e madeiras. |
| (4) Dureza baixa. Risca com facilidade. |
| (5) Expansão térmica superior à dos metais, (pode ser de 5 a 10 vezes maior). |
| (6) Mais inflamáveis que os metais. |
| (7) Temperatura máxima de serviço baixa. |
| (8) São suscetíveis à deterioração pela exposição à radiação ultravioleta como a presença da luz natural |
| (9) Muito suscetíveis às deformações de fluência. |
| (10) Baixa resistência a produtos químicos orgânicos. |

2.5.3.3. Descrições das fibras.

As fibras são o material de reforço do compósito, proporcionando a resistência e rigidez. Elas podem ser produzidas de forma contínua o descontínua, mas neste estudo são apresentadas as

fibras contínuas, as quais são mais apropriadas no reforço de estruturas, devido a sua excelente capacidade de transferência de cargas e alta resistência à tração.

Existem três tipos principais de fibras para o reforço de estruturas na engenharia:

- Reforço com fibra de vidro, (PRFV)
- Reforço com fibra de aramida, (PRFA)
- Reforço com fibra de carbono, (PRFC)

Reforço com fibra de vidro (PRFV)

As fibras de vidro são usadas no reforço de matrizes poliméricas formando compósitos estruturais e produtos moldados. O vidro é a fibra mais empregada em termos gerais, sendo a de menor custo, apresentando uma alta relação resistência/densidade (a resistência específica), embora as vantagens anteriormente expostas, as fibras de vidro têm baixa relação módulo de elasticidade/densidade (a rigidez específica), baixa resistência à abrasão, o que reduz a resistência à ruptura e baixa aderência das resinas, especialmente na presença de umidade.

Estruturalmente os tipos de fibras de vidro mais empregadas devido às suas características, são do tipo “E” e “S”. O primeiro tipo produzido foi o vidro-“E” (Aluminoborosilicato de cálcio), dirigido às aplicações elétricas; logo em seguida foram identificadas as potencialidades estruturais do produto. O vidro-“S” (Aluminosilicato de magnésio) resultou de um aperfeiçoamento sobre o vidro-“E”, alterando sua composição, de forma a incrementar sua resistência.

Algumas formas comerciais para a fibra de vidro apresentam-se na Figura 2.6. As fibras de vidro mais comuns são: mantas de fibras picotadas (*chopped-strand mat*), e tecidos de fibras (*woven roving*) de estrutura regular simples.

Existindo também as barras de fibra de vidro para o reforço.



Figura 2.6: Algumas formas disponíveis para a fibra de vidro: Manta de fibras aleatoriamente orientadas e Tecidos com iguais propriedades a 0° e 90° (MENDONÇA, 2005).

As mantas podem ser ajustadas de formas complicadas sem desmanchar ou rasgar, tornando-se úteis na modelagem manual de peças e na modelagem por prensa. No caso dos tecidos os regulares são os mais baratos, sendo de fácil uso na modelagem manual e por prensagem.

Reforço com fibra de aramida (PRFA)

As fibras de aramida (ou fibras de kevlar) foram introduzidas em 1971, são fibras orgânicas criadas a partir de um perfeito alinhamento de polímeros. Apresentam excepcionais características de resistência e rigidez e possuem baixa resistência à compressão. Além disso, as fibras de aramida têm baixa densidade, de 1440 kg/m^3 , em comparação as fibras de carbono com 1800 kg/m^3 , o vidro com 2540 kg/m^3 e o aço com 7800 kg/m^3 . (MENDONÇA, 2005).

Outra característica das fibras de aramida é que apresentam textura flexível, não frágil como as demais fibras, sendo bastante semelhante às fibras têxteis de vestuário, permitindo serem tecidas em tramas muito mais miúdas e complexas que o permitido dos tecidos de vidro.

Na Figura 2.7: apresentassem tecidos de fibras de aramida, empregados no reforço de estruturas.



Tecidos de fibra de aramida

Colocação da fibra de aramida

Figura 2.7: Algumas formas disponíveis para a fibra de aramida e colocação da fibra
(<http://www.construpor.com.br>, 2016).

Reforço com fibra de carbono (PRFC)

As fibras de carbono são aquelas que na sua composição apresentam conteúdo de carbono entre 80% e 95%. Comparadas com as fibras de vidro, as fibras de carbono oferecem maior rigidez, maior resistência à altas temperaturas quando o vidro tende a se fundir, densidade inferior, cerca de 68% da do vidro e custo maior.

O carbono para materiais compósitos é feito de fibras de poliacrilonitrile (PAN), que é um polímero de tipo acrílico. As fibras se submetem a um processo de três etapas para produzir fibras com faixas gráficas orientadas preferencialmente ao eixo da fibra.

- **Orientação do polímero precursor PAN por estiramento:** O primeiro passo é esticar a fibra precursora de maneira que fique paralelo ao que será o eixo da fibra. O processo é feito durante um período de 24 horas a uma temperatura no domínio de 230°C. O polímero que uma vez foi branco, agora é preto.
- **Carbonização das fibras:** Para garantir a alta resistência da fibra, se faz um tratamento térmico de carbonização a 1500°C em atmosfera inerte até formar folhas de grafite, logrando-se elevada resistência na tração.
- **Grafitização:** O processo é feito a temperaturas na faixa dos 3000°C, com ele obtém-se um acréscimo do módulo de elasticidade.

Embora as fibras de carbono tenham sido proibitivamente caras no passado para muitas aplicações, o custo caiu significativamente na última década conforme o volume de produção e a demanda mundial crescem. Dessa forma, as fibras de carbono são as mais usadas no reforço de estruturas na construção.

Na Figura 2.8, apresentam-se algumas formas disponíveis para a fibra de carbono, na Figura 2.9, apresentam-se os materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono e na Figura 2.10, mostram-se reforços ao cisalhamento em vigas.



Figura 2.8: Algumas formas disponíveis para a fibra de carbono (www.viapol.com.br, 2016)

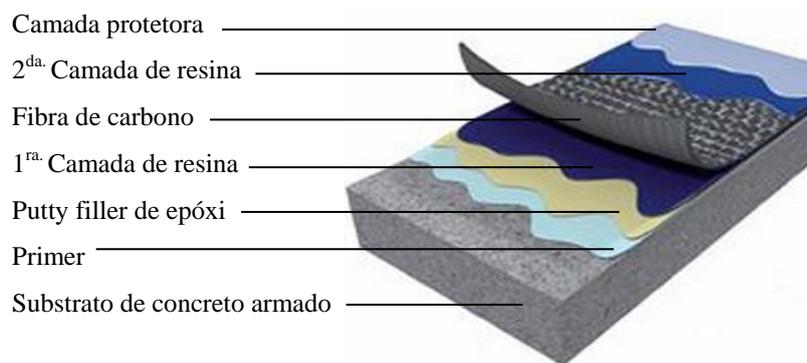


Figura 2.9: Materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono
(MASTER BUILDERS, INC)



Figura 2.10: Reforços ao cisalhamento em vigas com compósitos de fibra de carbono
(http://reforcodeestruturas.com.br, 2016)

2.5.3.4. Comparação das fibras.

As características principais dos tipos de fibras mencionadas encontram-se na Tabela 2.3. Os valores na Tabela correspondem a dados obtidos de fibras com carga estática sem exposição ao exterior. Para o dimensionamento com (PRF) os valores devem levar em conta a presença da resina e as reduções devidas a cargas de longo prazo, agentes ambientais além de outros fatores. Na Figura 2.11, apresentam-se gráficos tensão-deformação dos reforços (PRF), comparada com o aço.

Tabela 2.3: Propriedades típicas das fibras (CEB – FIB, *Bulletin* 14, 2001).

| Tipo de Fibra | | Resistência a Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Deformação Específica Última (%) |
|---------------|--|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Vidro | Aluminoborosilicato de cálcio (Vidro-E) | 1900 - 3000 | 70 | 3,0 - 4,5 |
| | Aluminosilicato de magnésio (Vidro-S) | 3500 - 4800 | 85 - 90 | 4,5 - 5,5 |
| Aramida | Com módulo de elasticidade intermédio (IM) | 3500 - 4100 | 70 - 80 | 4,3 - 5,0 |
| | Com alto módulo de elasticidade (HM) | 3500 - 4000 | 115 - 130 | 2,5 - 3,5 |
| Carbono | Alta resistência | 3500 - 4800 | 215 - 235 | 1,4 - 2,0 |
| | Ultra-alta resistência | 3500 - 6000 | 215 - 235 | 1,5 - 2,3 |
| | Alto módulo de elasticidade | 2500 - 3100 | 350 - 500 | 0,5 - 0,9 |
| | Ultra-alto módulo de elasticidade | 2100 - 2400 | 500 - 700 | 0,2 - 0,4 |

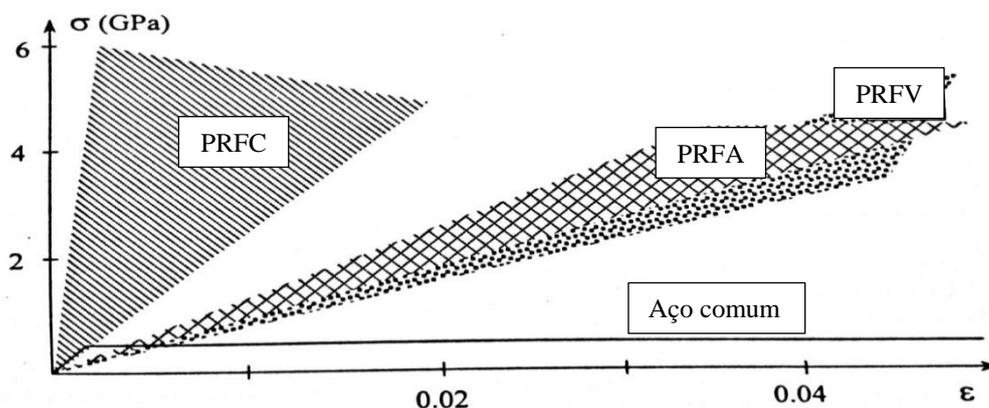


Figura 2.11: Gráficos Tensão-Deformação dos reforços, (PRF) (CEB – FIB, *Bulletin* 14, 2001).

Pode-se perceber que o reforço com compósito de fibra de carbono (PRFC), apresenta maiores módulos de elasticidade e resistência à tração se for comparado com os demais compósitos de fibra de vidro (PRFV), fibra de aramida (PRFA) e com o aço comum. Estas propriedades fazem com que o reforço com compósito de fibra de carbono (PRFC) seja o mais empregado na construção civil, além da utilização de compósitos misturados (híbridos).

No caso desta pesquisa foca-se a atenção nos reforços feitos com compósitos de fibra de carbono.

3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO, (PRFC)

3.1. PRELIMINARES

Em continuação apresenta-se um resumo dos resultados de trabalhos experimentais realizados por pesquisadores no Brasil e no mundo, com vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono aderido ao substrato de concreto com resina epóxi.

Os resultados experimentais expostos compõem o banco de dados da presente pesquisa, os mesmos mostram-se em tabelas. O banco de dados está composto por 12 pesquisas (sete nacionais e cinco internacionais) totalizando 123 vigas.

Devido às particularidades das pesquisas experimentais encontradas, o banco de dados fica limitado, muitos dos estudos apresentam um banco de dados pré-estabelecido e não conta com a informação necessária para poder reproduzir os resultados, além de que muitos dos trabalhos encontrados apresentam experimentos feitos em situações específicas para obter resultados particulares não permitindo a comparação com os outros estudos.

Embora o banco de dados seja composto por 123 vigas, foi criado um modelo preliminar o qual pode ser alimentado continuamente.

3.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS NACIONAIS

Os estudos nacionais estão divididos em: três pesquisas da Universidade de Brasília (UnB), Salles Neto (2000), Silva Filho (2001) e Araújo (2002) executadas no laboratório de estruturas da Faculdade de Tecnologia e Construção Civil, orientadas pelo professor Dr. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, (No Brasil a UnB foi a primeira a estudar experimentalmente o reforço com fibra de carbono).

Uma pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Beber. (2003), duas pesquisas da Universidade de Campinas (UNICAMP), Gallardo (2002) e Galvez (2003) e uma pesquisa da Universidade de Rio de Janeiro (PUC), Spagnolo *et al.* (2013).

Em continuação apresenta-se um resumo das pesquisas que foram a base para a composição do banco de dados.

3.2.1. Salles Neto (2000)

Salles Neto (2000) na sua dissertação de Mestrado analisou o comportamento de oito (8) vigas de seção transversal em forma de “T” de concreto armado, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, sendo duas de referência e quatro com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Salles mostra-se na Figura 3.1 e as características das vigas aparecem na Tabela 3.1 e a descrição encontra-se na Tabela 3.2.

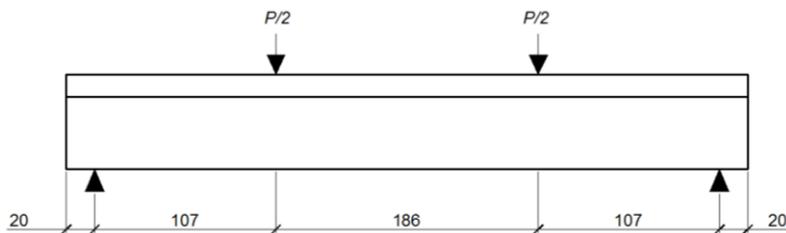


Figura 3.1: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (SALLES NETO, 2000)

Tabela 3.1: Características das vigas, (SALLES NETO, 2000).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 44,6 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V2 | 44,6 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V3 | 44,6 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V4REF | 40 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V5 | 40 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V6 | 40 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V7 | 40 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V8 | 40 | 773 | 812 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |

Tabela 3.2: Descrição das vigas ensaiadas (SALLES NETO, 2000).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|------------------|-----------|---|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V2 | Em “U” | - | Faixas de fibra de carbono inclinadas a 45° |
| V3 | | | Faixas de fibra de carbono verticais |
| V4REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V5 | Em “U” | - | Faixas de fibra de carbono verticais |
| V6 | | | Faixas de fibra de carbono verticais |
| V7 | | | Faixas de fibra de carbono inclinadas a 45° |
| V8 | | | Faixas de fibra de carbono inclinadas a 45° |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.2: as vigas V1, V2 e V3, não possuíam armadura ao cisalhamento no vão de corte, tendo apenas estribos construtivos, e as vigas V4, V5, V6, V7 e V8, estavam subdimensionadas ao cisalhamento.

O reforço com fibra de carbono (PRFC) foi colado nas vigas em forma de “U”, composto por faixas verticais e inclinadas a 45° sem ancoragem. Os detalhes apresentam-se na Figura 3.3.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|-------|---------------|-------------------|
| V1 | | |
| V2 | | |
| V3 | | |
| V4 | | |
| V5 | | |
| V6 | | |
| V7 | | |
| V8 | | |

Figura 3.2: Armadura das vigas ensaiadas (SALLES NETO, 2000)

| Vigas | Vista Lateral |
|---|---------------|
| V2 | |
| V3 (ângulo de inclinação das fibras 45°) | |

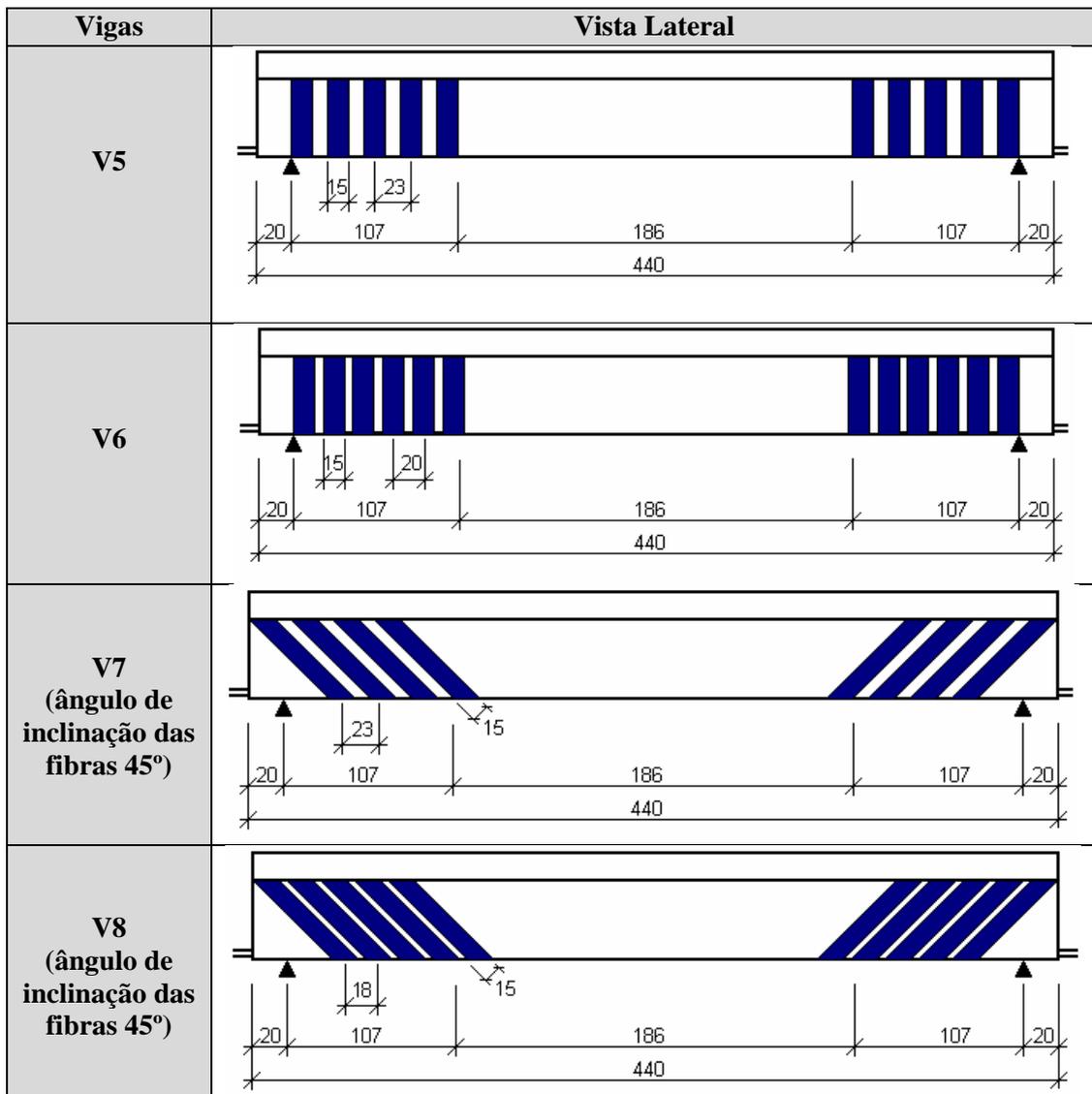


Figura 3.3: Detalhes de colocação do reforço das vigas (SALLES NETO, 2000).

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento com fibra de carbono (PRFC) foi realizado de acordo com o “Guia de Projeto Estrutural com Fibras de Carbono”, desenvolvido pela *Master Builders, INC*, adotando coeficientes de segurança unitários. A metodologia de cálculo que serve de base à *Master Builders, INC*, é o ACI 440-2R (2000).

A Tabela 3.3 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.3: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (SALLES NETO, 2000).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| V2 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90° | 230 | 50,09 |
| V3 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45° | 230 | 70,84 |
| V5 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90° | 230 | 50,09 |
| V6 | 2 | 0,165 | 150 | 228000 | 744,62 | 90° | 200 | 94,06 |
| V7 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45° | 230 | 70,84 |
| V8 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45° | 180 | 90,52 |

A Tabela 3.4 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.4: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (SALLES NETO, 2000).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|-------------------------|--|--|
| V1REF | Não | Tração diagonal | 51,60 | 251,00 |
| V2 | Não | Descolamento do reforço | 137,30 | 275,60 |
| V3 | Não | Descolamento do reforço | 168,50 | 320,50 |
| V4REF | Sem | Tração diagonal | 101,50 | 368,40 |
| V5 | Sem | Descolamento do reforço | 197,50 | 403,00 |
| V6 | Sem | Descolamento do reforço | 263,70 | 402,80 |
| V7 | Sem | Descolamento do reforço | 234,30 | 402,60 |
| V8 | Sem | Descolamento do reforço | 269,10 | 395,30 |

3.2.2. Silva Filho (2001)

Silva Filho (2001) na sua dissertação de Mestrado analisou o comportamento de oito (8) vigas de concreto armado, de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo uma viga de referência e sete com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Siva mostra-se na Figura 3.4 e as características das vigas aparecem na Tabela 3.5 e a descrição encontra-se na Tabela 3.6.

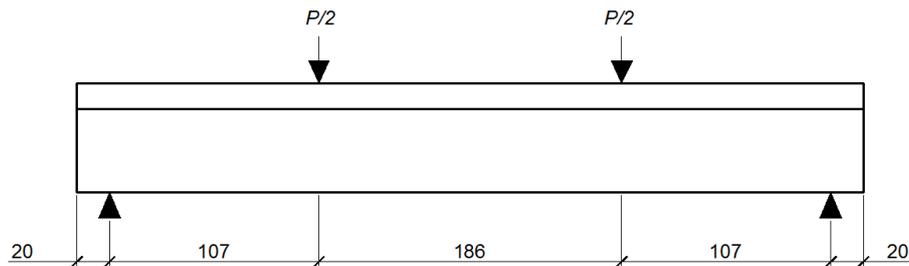


Figura 3.4: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (SILVA FILHO, 2001)

Tabela 3.5: Características das vigas ensaiadas (SILVA FILHO, 2001).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 41,9 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V2 | 41,9 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V3 | 42,2 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V5 | 45,3 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V6 | 46,4 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V4* | 43,8 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V7 | 45,3 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V8 | 45,3 | 769 | 808 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |

V4*: Viga reagrupada em função da mudança do tipo de ancoragem.

Tabela 3.6: Descrição das vigas ensaiadas (SILVA FILHO, 2001).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|--------------------|---------------------------------------|---|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V2 | Envolvim. Completo | Envolvim. Completo | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V3 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra por faixa |
| V5 | | | Faixas inclinadas a 45° com duas camadas de fibra por faixa |
| V6 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa |
| V4* | Em "U" | Na alma com barras horizontais de aço | Faixas verticais com três camadas de fibra por faixa |
| V7 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V8 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra por faixa |

V4*: Viga reagrupada em função da mudança do tipo de ancoragem.

Em função dos resultados dos ensaios das vigas reforçadas V2 e V3, foi alterado o sistema de ancoragem da fibra de carbono da viga V4, passando a ser ancorada somente na alma da viga.

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.5, as vigas encontram-se subdimensionadas ao cisalhamento.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|----------------|--|--|
| Todas as vigas | <p>26 \varnothing 4.2 a c/ 17 400 3 \varnothing 16 - 470 3 \varnothing 20 - 470</p> | <p>55 \varnothing 4.2 3 \varnothing 16 3 \varnothing 20 15 30</p> |

Figura 3.5: Armadura das vigas ensaiadas (SILVA FILHO, 2001).

As vigas reforçadas foram divididas em dois grupos: grupo 1, constituído por quatro vigas que foram reforçadas com fibra de carbono envolvendo a alma e a mesa da viga (envolvimento completo), variando a inclinação das faixas de 45° e 90° e o grupo 2 composto por três vigas onde o reforço foi somente na alma em forma de “U” com posterior fixação de barras de aço de 8,00 mm de diâmetro coladas externamente com resina epóxi como mostra a Figura 3.6 e Figura 3.7.

| Vigas | Vista Lateral |
|-------|------------------------------------|
| V2 | <p>20 15 23 107 186 107 20 440</p> |
| V3 | <p>20 15 23 107 186 107 20 440</p> |
| V4 | <p>20 15 20 107 186 107 20 440</p> |

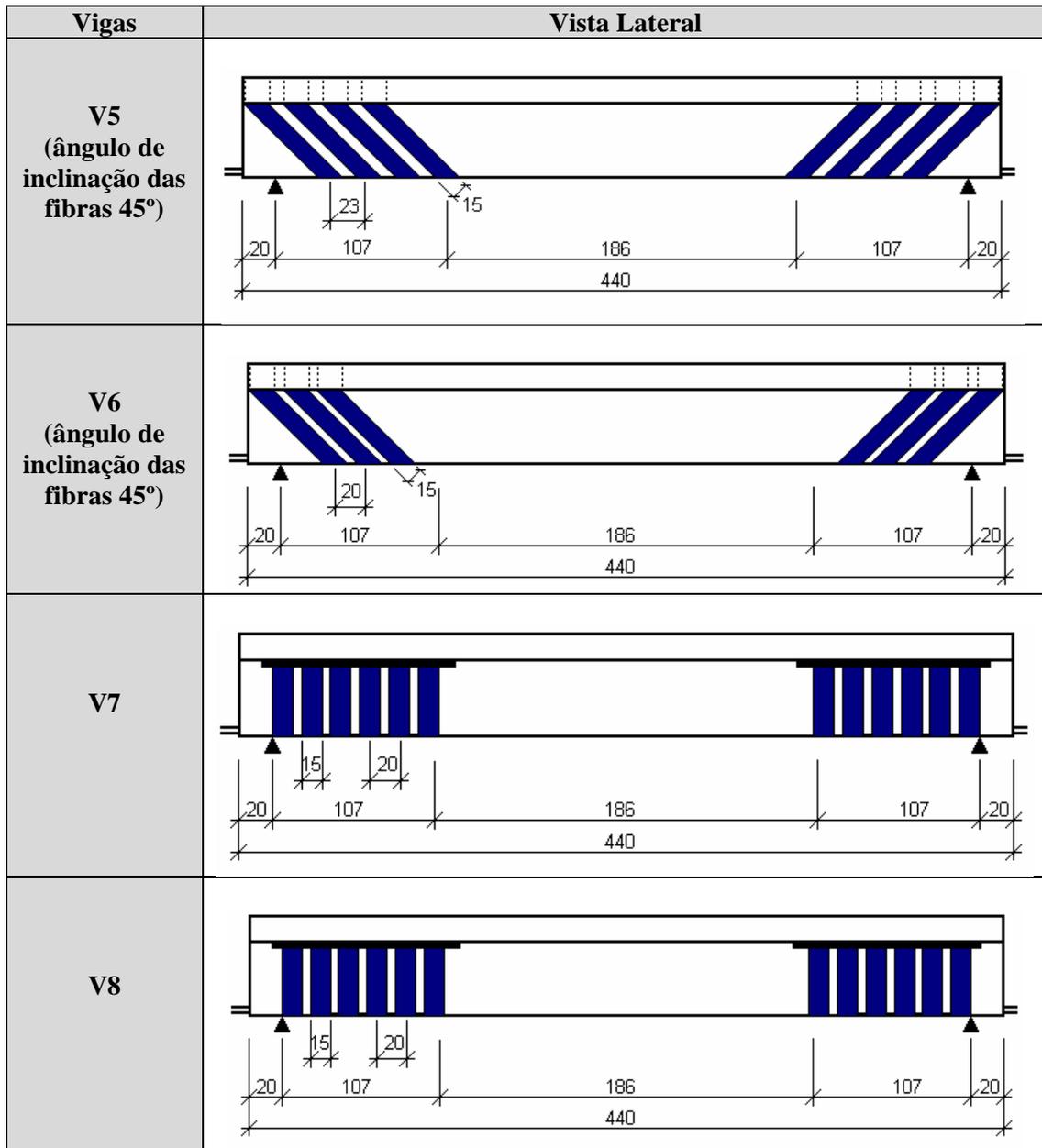


Figura 3.6: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas (SILVA FILHO, 2001).

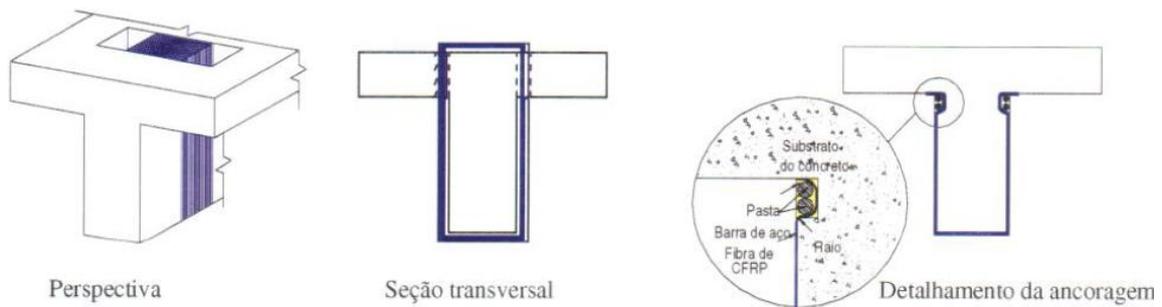


Figura 3.7: Detalhe das ancoragens das vigas ensaiadas (SILVA FILHO, 2001).

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento com fibra de carbono foi realizado de acordo com o “Guia de Projeto Estrutural com Fibras de Carbono”, desenvolvido pela *Master Builders, INC*, adotando coeficientes de segurança unitários. A metodologia de cálculo que serve de base à *Master Builders, INC*, é o ACI 440-2R (2000).

A Tabela 3.7 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.7: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (SILVA FILHO, 2001).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fc} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| V2 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90° | 230 | 69,72 |
| V3 | 2 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90° | 200 | 160,35 |
| V5 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45° | 230 | 113,39 |
| V6 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45° | 200 | 98,60 |
| V4* | 3 | 0,165 | 150 | 228000 | 568,33 | 90° | 200 | 107,69 |
| V7 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 832,02 | 90° | 230 | 45,70 |
| V8 | 2 | 0,165 | 150 | 228000 | 682,15 | 90° | 200 | 86,17 |

V4*: Viga reagrupada em função da mudança do tipo de ancoragem.

A Tabela 3.8 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vidas ensaiadas.

Tabela 3.8: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (SILVA FILHO 2001).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|-------------------------|--|--|
| V1REF | Sem | Tração diagonal | 388 | 360 |
| V2 | Sem | Flexão | 505 | 589 |
| V3 | Sem | Flexão | 667 | 570 |
| V5 | Sem | Flexão | 561 | 579 |
| V6 | Sem | Flexão | 568 | 573 |
| V4* | Sem | Descolamento do reforço | 643 | 420 |
| V7 | Sem | Descolamento do reforço | 506 | 491 |
| V8 | Sem | Descolamento do reforço | 593 | 510 |

V4*: Viga reagrupada em função da mudança do tipo de ancoragem.

3.2.3. Araújo (2002)

Araújo (2002) na dissertação de Mestrado analisou o comportamento de oito (8) vigas de concreto armado, de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo duas vigas de referência e seis com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Araújo mostra-se na Figura 3.8 e as características das vigas ensaiadas aparecem na Tabela 3.9 e a descrição encontra-se na Tabela 3.10.

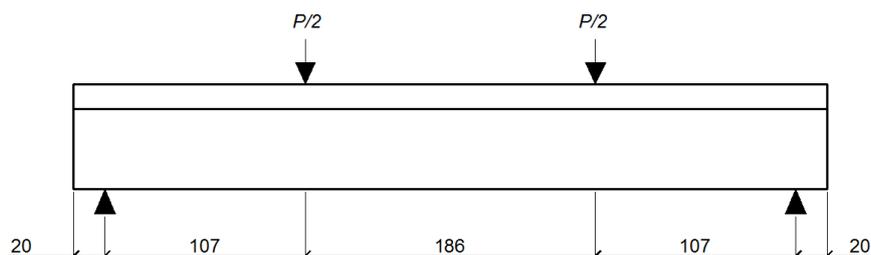


Figura 3.8: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (ARAÚJO, 2002)

Tabela 3.9: Características das vigas ensaiadas (ARAÚJO, 2002).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 23,3 | 771 | 771 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V2 | 22,5 | 771 | 771 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V3 | 22,5 | 771 | 771 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V4 | 22,5 | 771 | 771 | 150 | 355,2 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V5REF | 46,1 | 771 | 771 | 150 | 349,3 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V6 | 45,7 | 771 | 771 | 150 | 349,3 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V7 | 45,8 | 771 | 771 | 150 | 349,3 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |
| V8 | 46,6 | 771 | 771 | 150 | 349,3 | 550 | 400 | 3,01 | 4000 |

Tabela 3.10: Descrição das vigas ensaiadas (ARAÚJO, 2002).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|--------------------|---|--|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V2 | Em “U” | Na alma com faixas horizontais de tecido de fibra | Faixas verticais com uma camada de fibra e uma faixa horizontal de fibra de 50 mm de largura (uma camada) |
| V3 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra e uma faixa horizontal de fibra de 100 mm de largura (uma camada) |
| V4 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra e uma faixa horizontal de fibra de 100 mm de largura (duas camadas) |
| V5REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V6 | Envolvim. Completo | Envolvim. Completo | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V7 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra por faixa |
| V8 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.9.

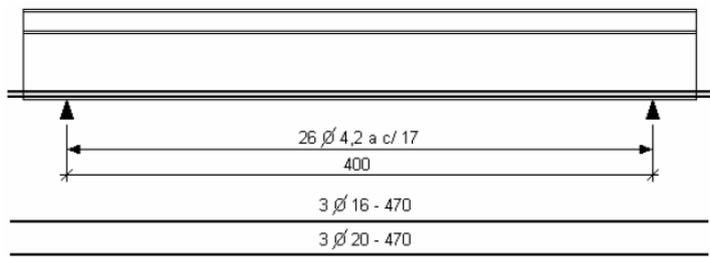
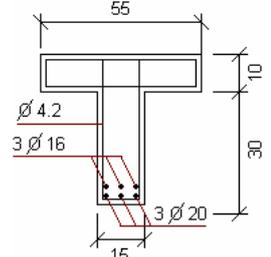
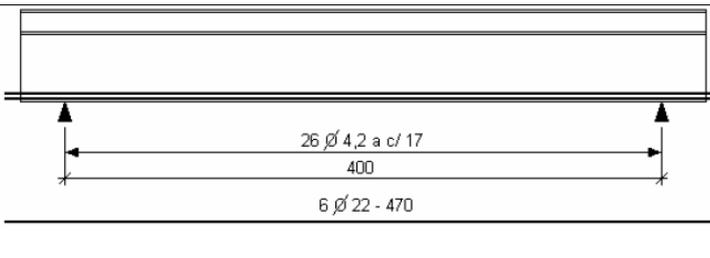
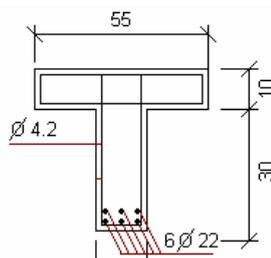
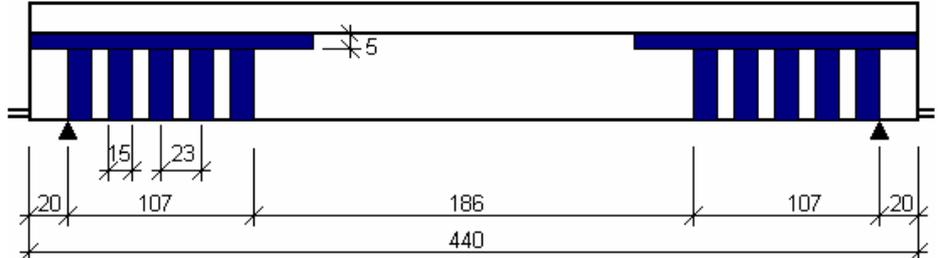
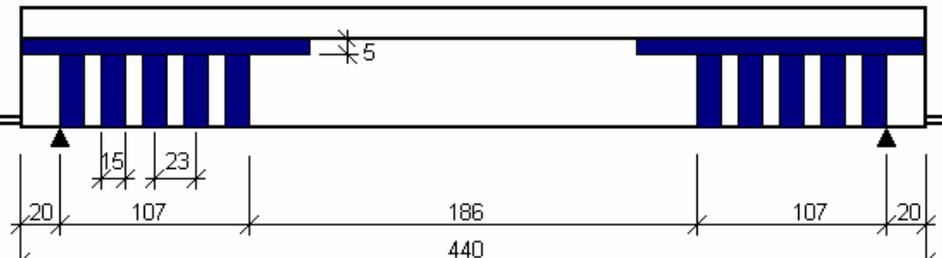
| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|-------------------------|--|---|
| V1REF V2 V3 V4 |  |  |
| V5REF V6 V7 V8 |  |  |

Figura 3.9: Armadura das vigas ensaiadas (ARAÚJO, 2002).

As vigas reforçadas foram divididas em dois grupos: grupo 1, constituído por três vigas com reforço em “U” e ancoragem na alma com faixas horizontais de tecido de fibra de carbono e o grupo 2, composto por três vigas com reforço envolvendo a alma e a mesa da viga (envolvimento completo). A Figura 3.10 e Figura 3.11 apresentam a forma de distribuição e ancoragem do reforço nas vigas ensaiadas.

| Vigas | Vista Lateral |
|-------|--|
| V2 |  |
| V3 |  |

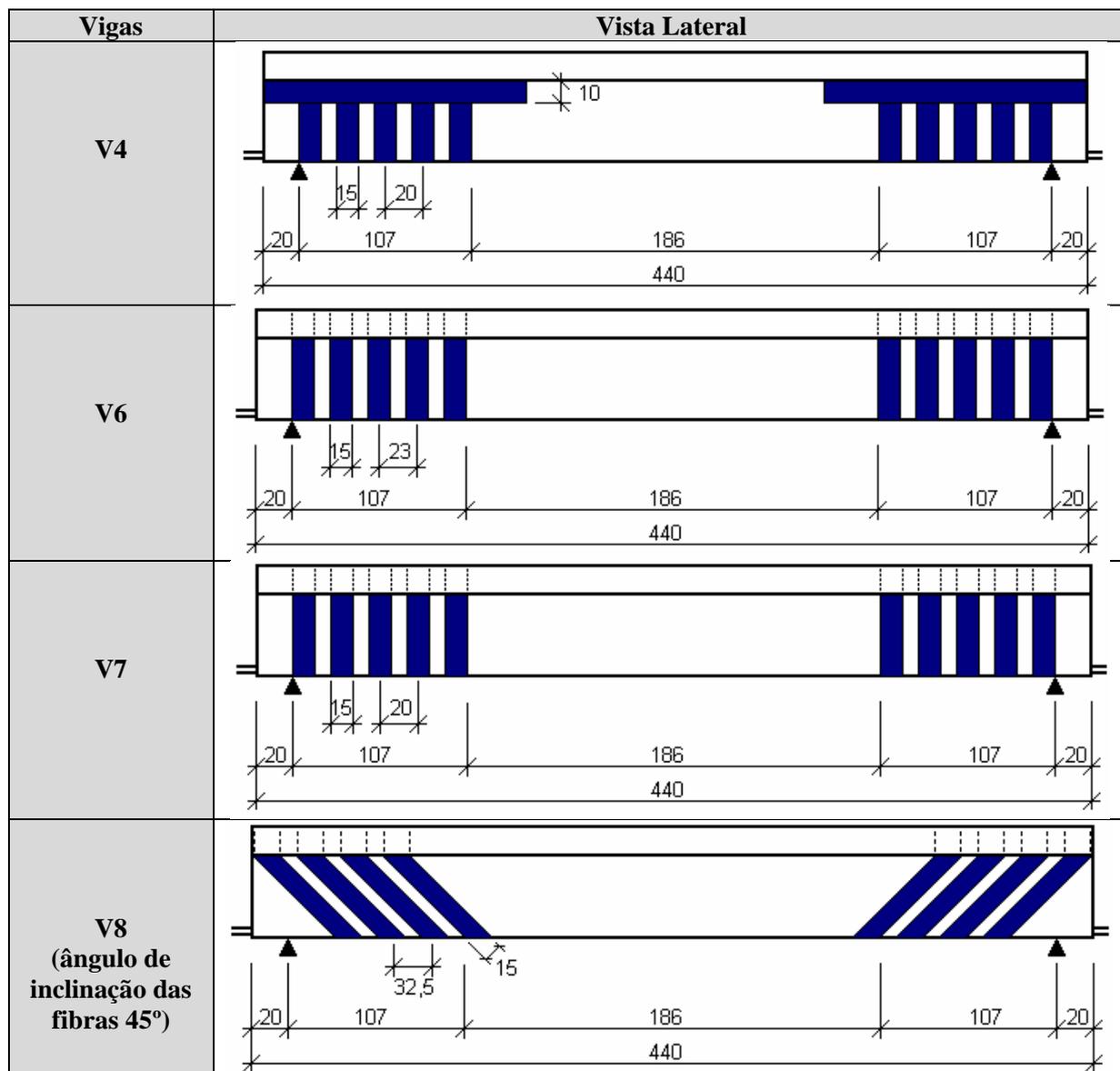


Figura 3.10: Detalhes de colocação do reforço das vigas (ARAÚJO, 2002).

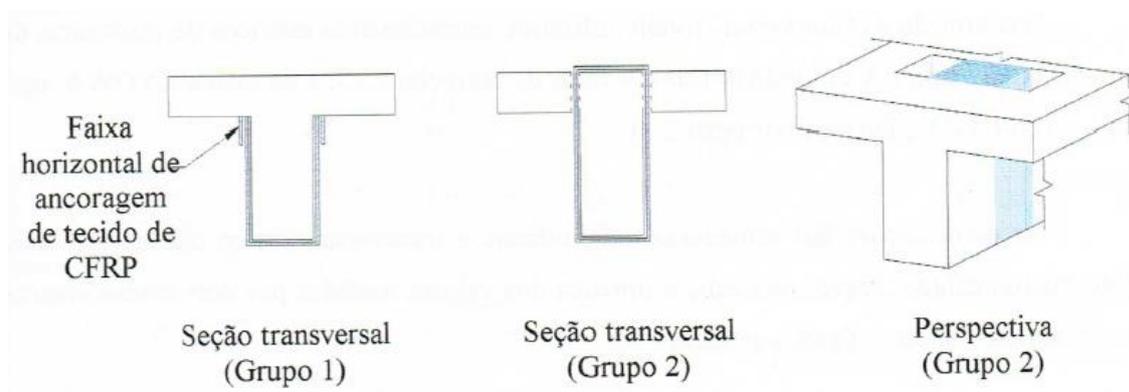


Figura 3.11: Detalhe das ancoragens das vigas (ARAÚJO, 2002).

O dimensionamento do reforço a cisalhamento com fibra de carbono foi realizado de acordo com as precisões do ACI 440.R (2000), adotando-se coeficientes de segurança unitários, e as cargas ao cisalhamento antes do reforço foram estimadas pelas recomendações do pesquisador Zsutty (1968).

A Tabela 3.11 apresenta a quantidade de camadas de fibras utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.11: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (ARAÚJO, 2002).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_{fe} (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| V2 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 699,63 | 90 | 230 | 38,43 |
| V3 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 699,63 | 90 | 230 | 38,43 |
| V4 | 2 | 0,165 | 150 | 228000 | 507,40 | 90 | 200 | 64,10 |
| V6 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90 | 230 | 68,56 |
| V7 | 2 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 90 | 200 | 157,69 |
| V8 | 1 | 0,165 | 150 | 228000 | 912,00 | 45 | 325 | 68,62 |

A Tabela 3.12 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.12: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas.
(ARAÚJO, (2002).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|-------------------------|--|--|
| V1REF | Sem | Tração diagonal | 235,00 | 260 |
| V2 | | Descolamento do reforço | 324,00 | 295 |
| V3 | | Descolamento do reforço | 324,00 | 315 |
| V4 | | Descolamento do reforço | 368,00 | 300 |
| V5REF | | Tração diagonal | 290,60 | 372 |
| V6 | | Ruptura do reforço | 502,00 | 650 |
| V7 | | Ruptura do reforço | 672,00 | 788 |
| V8 | | Ruptura do reforço | 502,40 | 612 |

3.2.4. Gallardo (2002)

Gallardo (2002) na sua dissertação de Mestrado analisou o comportamento de seis (6) vigas de concreto armado se seção “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo uma viga de referência e cinco com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Gallardo mostra-se na Figura 3.12 e as características das vigas aparecem na Tabela 3.13 e a descrição encontra-se na Tabela 3.14.

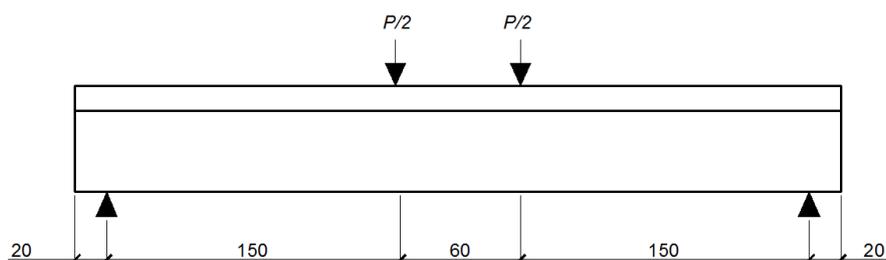


Figura 3.12: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (GALLARDO, 2002)

Tabela 3.13: Características das vigas ensaiadas (GALLARDO, 2002).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_v (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 45,33 | 681,9 | * | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |
| V2 | 45,84 | 681,9 | | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |
| V3 | 46,23 | 681,9 | | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |
| V4 | 46,8 | 681,9 | | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |
| V5 | 45,12 | 681,9 | | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |
| V6 | 44,83 | 681,9 | | 120 | 415,8 | 300 | 460 | 4,089 | 3600 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.14: Descrição das vigas ensaiadas (GALLARDO, 2002).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|-------------------------------|---|--|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V2 | Somente nas laterais | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V3 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V4 | Em “U” | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V5 | Em “U”+ face inferior da mesa | Faixas na zona inferior da mesa | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V6 | Em “U”+ face inferior da mesa | Na alma com faixas horizontais de tecido de fibra | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 313.

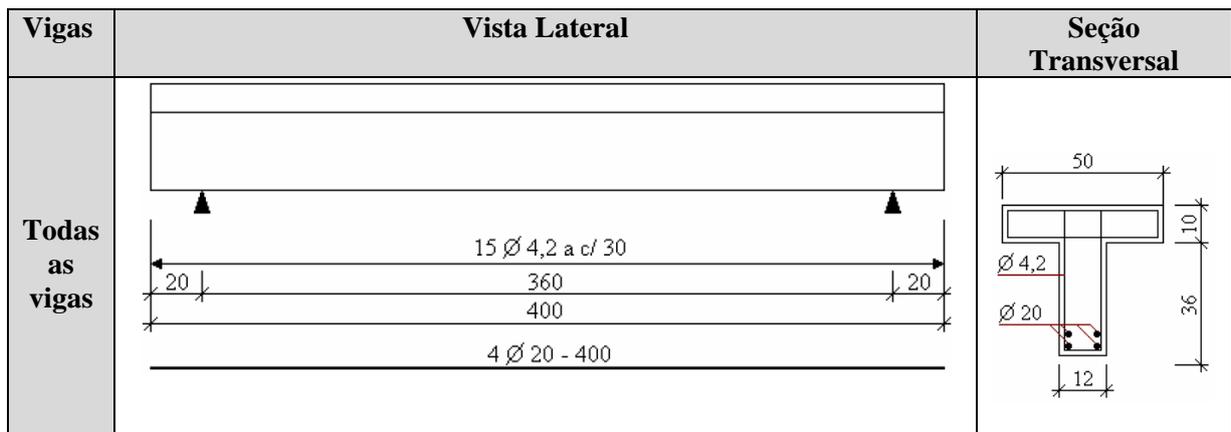
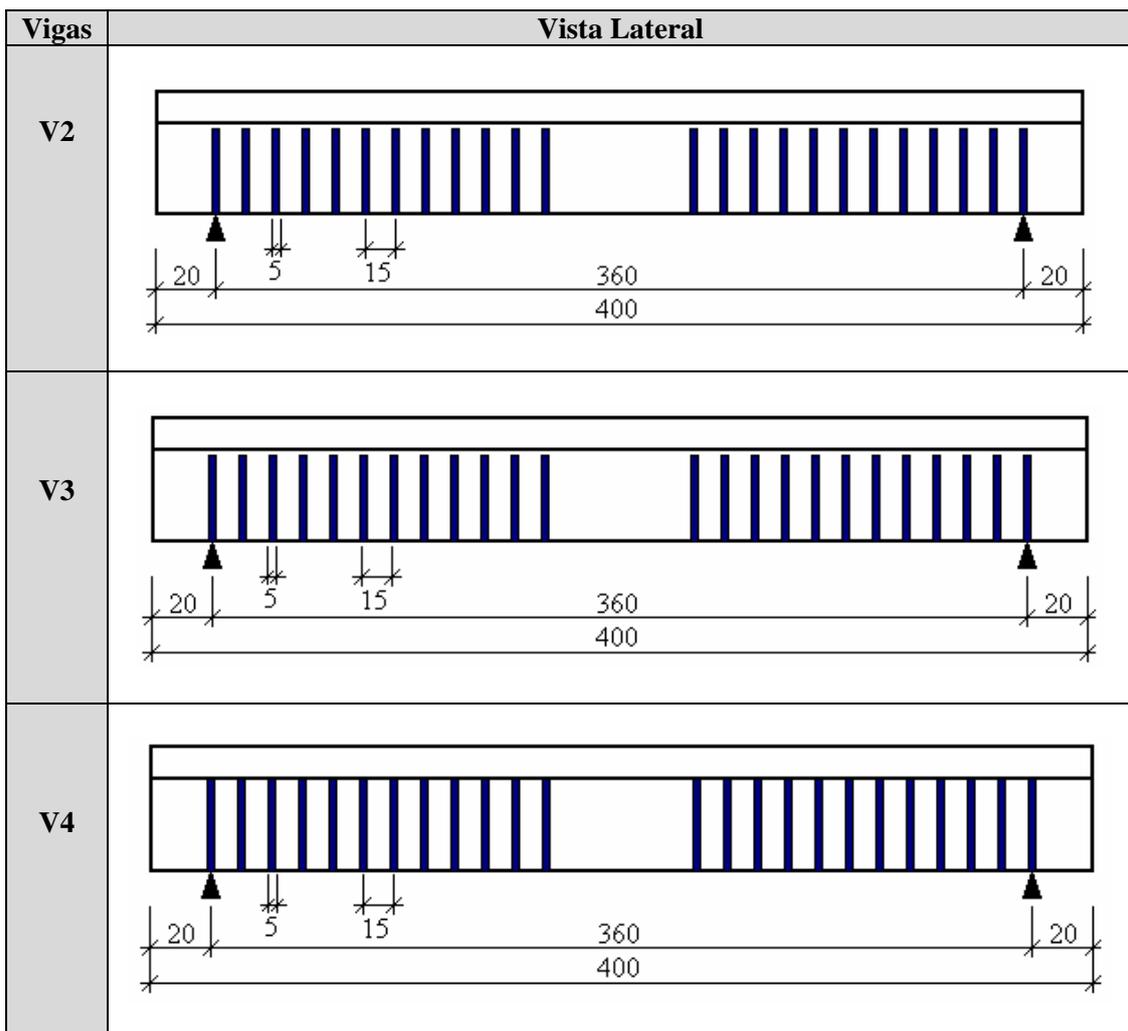


Figura 3.13: Detalhamento do armado das vigas (GALLARDO, 2002).

Foi empregado apenas um tipo de sistema de reforço (mantas flexíveis pré-impregnadas), composto por uma camada de tiras verticais coladas na superfície das vigas somente nas laterais, e uma e duas camadas de tiras verticais em forma de “U”. Figura 3.14



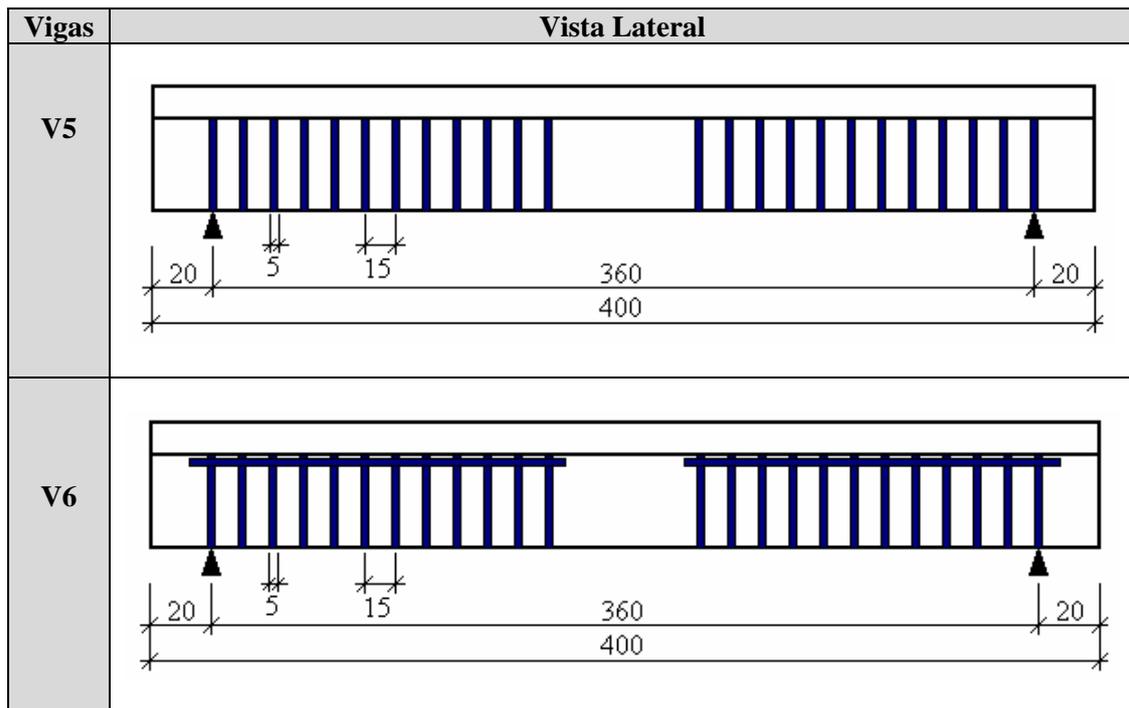


Figura 3.14: Detalhes de colocação do reforço das vigas (GALLARDO, 2002).

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento com fibra de carbono (PRFC) foi realizado de acordo com as prescrições do ACI 440.R (2000), adotando-se coeficientes de segurança unitários.

A Tabela 3.15 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.15: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valo da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (GALLARDO, 2002).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_{fe} (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| V2 | 1 | 0,117 | 50 | 288000 | 1152,00 | 90 | 150 | 28,38 |
| V3 | 1 | 0,117 | 50 | 288000 | 1152,00 | 90 | 150 | 28,38 |
| V4 | 1 | 0,117 | 50 | 288000 | 1152,00 | 90 | 150 | 28,38 |
| V5 | 1 | 0,117 | 50 | 288000 | 1110,07 | 90 | 150 | 54,69 |
| V6 | 1 | 0,117 | 50 | 288000 | 1105,31 | 90 | 150 | 54,45 |

A Tabela 3.16 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.16: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas
(GALLARDO, 2002).

| Viga | Pre-fissura | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|-------------|-------------------------|--|--|
| V1REF | Não | Tração diagonal | 178,34 | 234,06 |
| V2 | Não | Descolamento do reforço | 188,06 | 212,48 |
| V3 | Não | Descolamento do reforço | 251,40 | 257,16 |
| V4 | Não | Descolamento do reforço | 262,90 | 277,00 |
| V5 | Não | Descolamento do reforço | 311,64 | 323,00 |
| V6 | Não | Descolamento do reforço | 249,26 | 298,46 |

3.2.5. Beber (2003)

Beber (2003) na sua dissertação de Doutorado analisou o comportamento de 30 vigas de concreto armado de seção retangular, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo duas vigas de referência, e 28 vigas com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Beber mostra-se na Figura 3.15 e as características das vigas aparecem na Tabela 3.17 e a descrição encontra-se na Tabela 3.18.

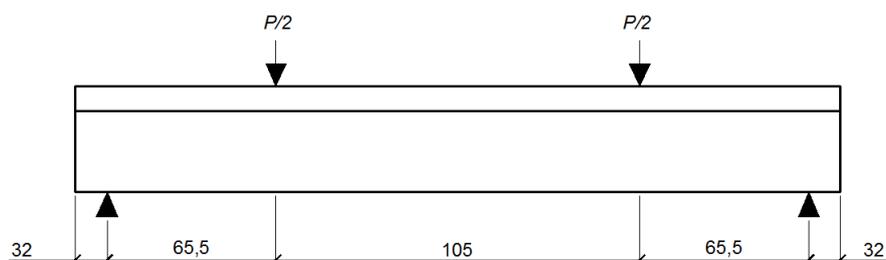


Figura 3.15: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (BEBER, 2003)

Tabela 3.17: Características das vigas ensaiadas (BEBER, 2003).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|---------------------|--------------|--------------|-------------|------------|----------|------------|----------|-------|----------|
| Para todas as vigas | 32,8 | 747 | * | 150 | 255 | 150 | 300 | 2,9 | 2360 |

(*)Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.18: Descrição das vigas ensaiadas (BEBER, 2003).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|---------|----------------------|--------------------|---|
| V8A REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V8B REF | | | |
| V9A | Somente nas laterais | - | Faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V9B | | | |
| V21A | | | |
| V10A | Em “L” | - | Faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V10B | | | |
| V17A | | | |
| V11A | Em “U” | - | Faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V11B | | | |
| V17B | | | |
| V12A | Envolvim. Completo | Envolvim. Completo | Faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V18A | | | |
| V20A | | | |
| V12B | Somente nas laterais | - | Faixas inclinadas a 45° com duas camadas de fibra de carbono por faixa |
| V14B | | | |
| V19A | Em “L” | - | Faixas inclinadas a 45° com duas camadas de fibra de carbono por faixa |
| V19B | | | |
| V13A | Somente nas laterais | - | Faixa vertical continua com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V13B | | | |
| V15B | Em “U” | - | Faixa vertical continua com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V16B | | | |
| V16A | Envolvim. Completo | Envolvim. Completo | Faixa vertical continua com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V18B | | | |
| V14A | Somente nas laterais | - | Faixa inclinada continua a 45° com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V15A | | | |
| V20B | Somente nas laterais | - | Faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa |
| V22B | | | |
| V21B | Somente nas laterais | - | Faixas inclinadas a 45° com duas camadas de fibra de carbono por faixa |
| V22A | | | |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.16. As vigas ensaiadas, não possuíam armadura de cisalhamento no vão de corte, tendo apenas estribos construtivos.

Empregou-se dois tipos de sistema de reforço (laminados pré-fabricados e mantas flexíveis pré-impregnadas), colado nas laterais, verticais e inclinados a 45°, em forma de “L” verticais e inclinados a 45°, em forma de “U” verticais e por envolvimento completo, os detalhes apresentam-se na Figura 3.17.

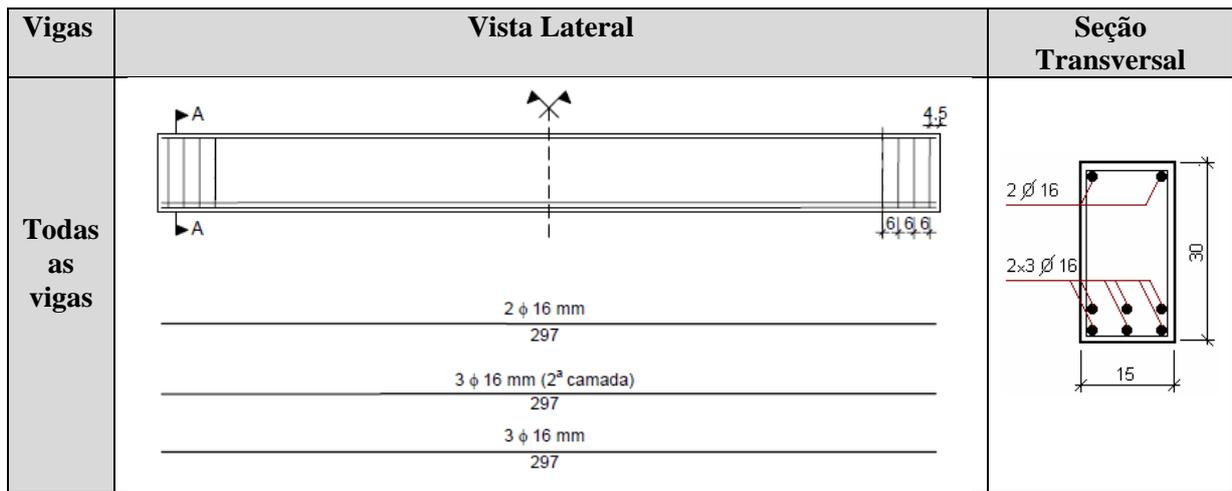
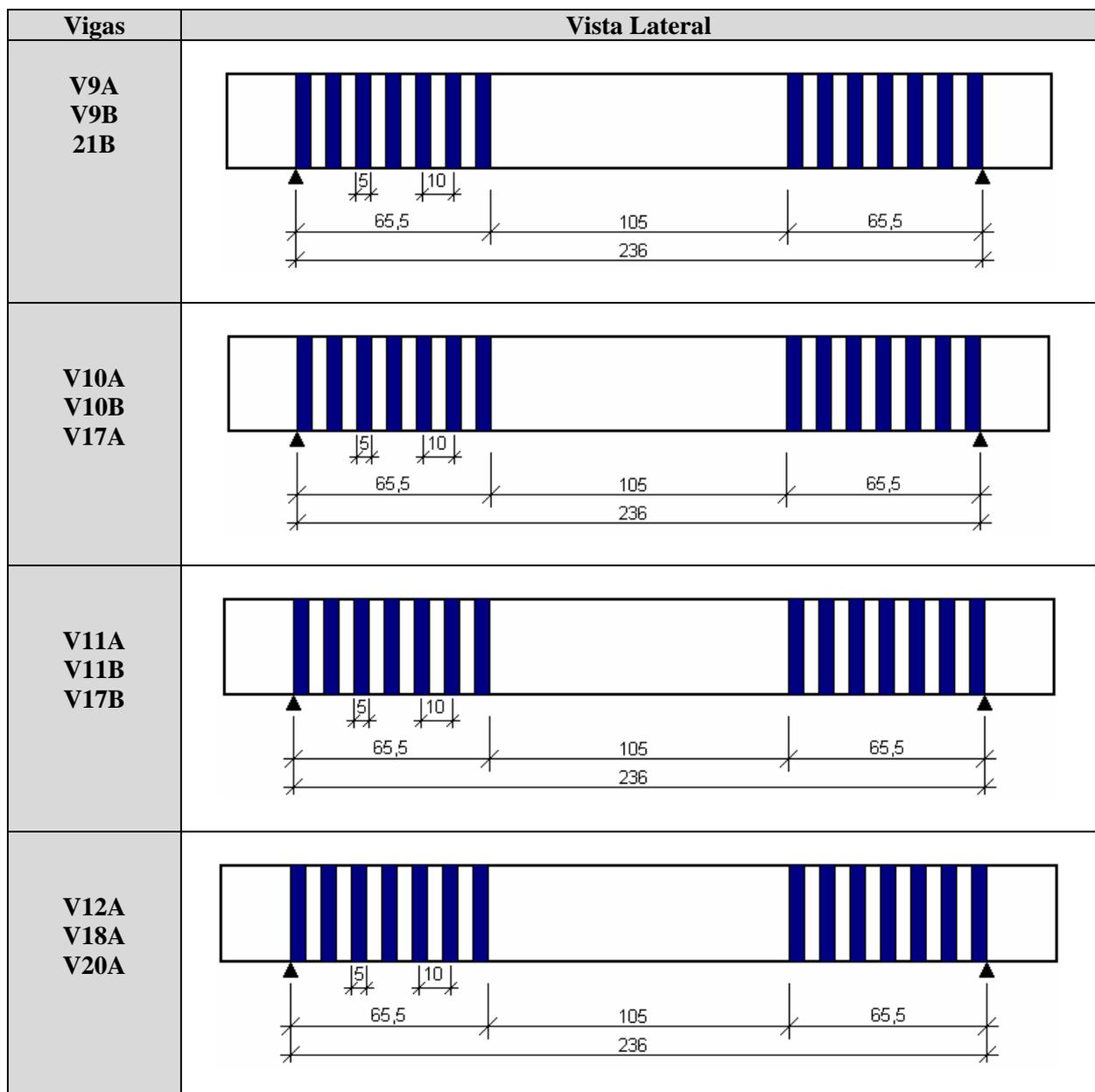


Figura 3.16: Detalhamento do armado das vigas (BEBER, 2003).



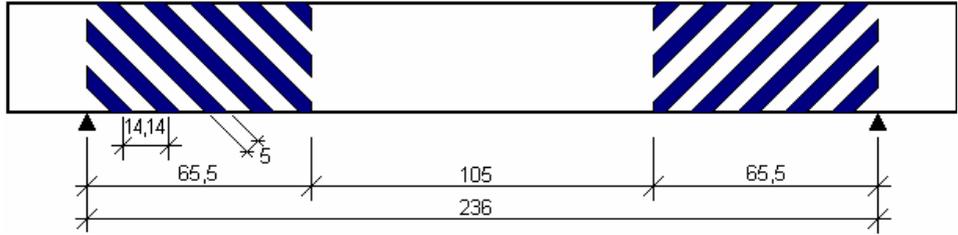
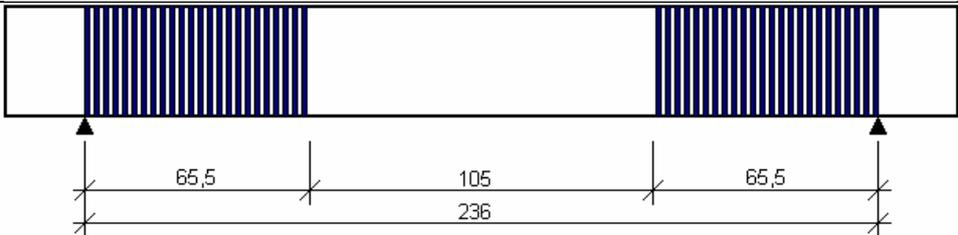
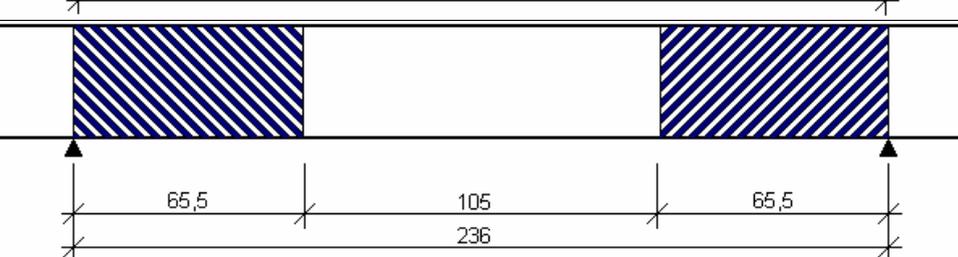
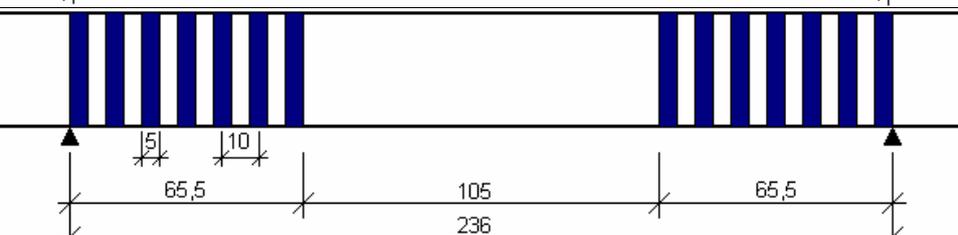
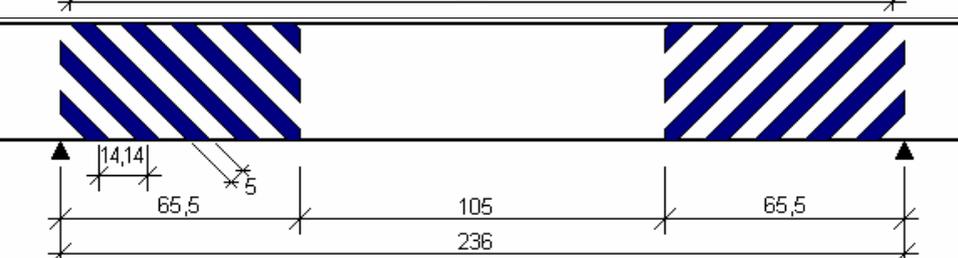
| Vigas | Vista Lateral |
|---|--|
| V19A V19B (ângulo de inclinação das fibras 45°) |  |
| V13A V13B |  |
| V15B V16B |  |
| V18B V16A |  |
| V14A V15A (ângulo de inclinação das fibras 45°) |  |
| V22B V20B |  |
| V21B V22A (ângulo de inclinação das fibras 45°) |  |

Figura 3.17: Detalhes de colocação do reforço das vigas (BEBER, 2003).

A Tabela 3.19 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.19: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (BEBER, 2003).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fc} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| V9A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 90 | 100 | 19,67 |
| V9B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 90 | 100 | 19,67 |
| V21A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 90 | 100 | 19,67 |
| V10A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V10B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V17A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V11A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V11B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V17B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V12A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V18A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V20A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 920,00 | 90 | 100 | 25,81 |
| V12B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 45 | 141,4 | 19,67 |
| V14B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 45 | 141,4 | 19,67 |
| V19A | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 45 | 141,4 | 19,67 |
| V19B | 1 | 0,11 | 50 | 230000 | 701,10 | 45 | 141,4 | 19,67 |
| V13A | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 701,10 | 90 | 655 | 39,33 |
| V13B | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 701,10 | 90 | 655 | 39,33 |
| V15B | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 920,00 | 90 | 655 | 51,61 |
| V16B | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 920,00 | 90 | 655 | 51,61 |
| V16A | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 920,00 | 90 | 655 | 51,61 |
| V18B | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 920,00 | 90 | 655 | 51,61 |
| V14A | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 701,10 | 45 | 655 | 55,62 |
| V15A | 1 | 0,11 | 655 | 230000 | 701,10 | 45 | 655 | 55,62 |
| V20B | 1 | 1,4 | 50 | 205000 | 273,17 | 90 | 100 | 97,52 |
| V22B | 1 | 1,4 | 50 | 205000 | 273,17 | 90 | 100 | 97,52 |
| V21B | 1 | 1,4 | 50 | 205000 | 273,17 | 45 | 141,4 | 97,54 |
| V22A | 1 | 1,4 | 50 | 205000 | 273,17 | 45 | 141,4 | 97,54 |

A Tabela 3.20 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.20: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas
(BEBER, 2003).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|---------|---------------|---|--|--|
| V8A REF | Não | Tração diagonal | - | 114,70 |
| V8B REF | | | - | 112,98 |
| V9A | Não | Descolamento do reforço | 124,72 | 196,24 |
| V9B | | | | 208,58 |
| V21A | | | | 230,38 |
| V10A | Não | Descolamento e ruptura do reforço | 135,25 | 214,97 |
| V10B | | | | 211,98 |
| V17A | | | | 205,57 |
| V11A | Não | Descolamento e ruptura do reforço | 135,25 | 196,85 |
| V11B | | | | 249,60 |
| V17B | | | | 185,86 |
| V12A | Não | Ruptura do reforço | 145,79 | 232,71 |
| V18A | | | | 254,57 |
| V20A | | | | 280,24 |
| V12B | Não | Descolamento do reforço | 124,72 | 203,30 |
| V14B | | | | 183,30 |
| V19A | Não | Descolamento e ruptura do reforço | 135,26 | 236,83 |
| V19B | | | | 230,26 |
| V13A | Não | Descolamento do reforço e arranchamento do cobrimento | 141,44 | 244,01 |
| V13B | | | | 251,50 |
| V15B | Não | Descolamento do reforço e arranchamento do cobrimento | 162,51 | 276,74 |
| V16B | | | | 224,85 |
| V16A | Não | Esmagamento do concreto (flexão) | 181,52 | 367,92 |
| V18B | | | | 404,82 |
| V14A | Não | Descolamento do reforço e arranchamento do cobrimento | 155,29 | 256,78 |
| V15A | | | | 241,12 |
| V20B | Não | Descolamento do reforço e arranchamento do cobrimento | Não aplicável | 285,82 |
| V22B | | | | 225,02 |
| V21B | Não | Descolamento do reforço e arranchamento do cobrimento | Não aplicável | 271,40 |
| V22A | | | | 251,19 |

3.2.6. Galvez (2003)

Galvez (2003) na sua dissertação de Mestrado analisou o comportamento de sete (7) vigas de concreto armado de seção retangular, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo duas vigas de referência e cinco com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Galvez mostra-se na Figura 3.18 (para as vigas do Grupo 1) e Figura 3.19 (para as vigas do Grupo 2), as características das vigas aparecem na Tabela 3.21 e a descrição encontra-se na Tabela 3.22.

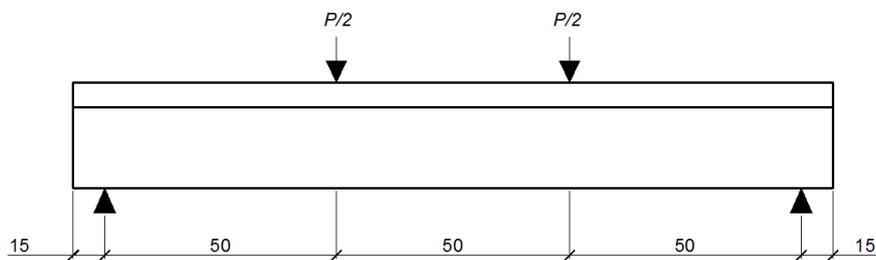


Figura 3.18: Esquema de ensaio vigas Grupo 1, (dimensões em cm) (GALVEZ, 2003)

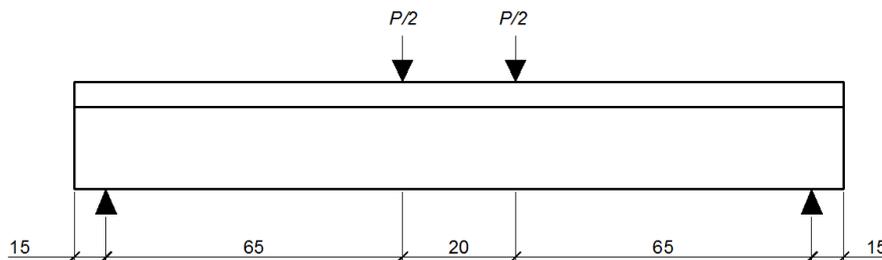


Figura 3.19: Esquema de ensaio vigas Grupo 2, (dimensões em cm) (GALVEZ, 2003)

Tabela 3.21: Características das vigas ensaiadas (GALVEZ, 2003).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| VTG1 | 38,0 | 773,8 | * | 150 | 160 | 150 | 200 | 3,125 | 1500 |
| V1G1 | 32,1 | 773,8 | | 150 | 160 | 150 | 200 | 3,125 | 1500 |
| V2G1 | 35,3 | 773,8 | | 150 | 160 | 150 | 200 | 3,125 | 1500 |
| VTG2 | 85,2 | 799,2 | | 150 | 168,7 | 150 | 200 | 2,964 | 1500 |
| V1G2 | 85,2 | 799,2 | | 150 | 168,7 | 150 | 200 | 2,964 | 1500 |
| V2G2 | 93,2 | 799,2 | | 150 | 168,7 | 150 | 200 | 2,964 | 1500 |
| V3G2 | 101,9 | 799,2 | | 150 | 168,7 | 150 | 200 | 2,964 | 1500 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.22: Descrição das vigas ensaiadas (GALVEZ, 2003).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|----------------------|--------------------|--|
| VTG1 | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V1G1 | Somente nas laterais | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V2G1 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa |
| VTG2 | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V1G2 | Somente nas laterais | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa, distribuída ao longo de todo o vão |
| V2G2 | Em “U” | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V3G2 | Envolvim. Completo | Envolvim. Completo | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.20.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|------------------------------|---------------|-------------------|
| VTG1 V1G1 V2G1 | | |
| VTG2 V1G2 V2G2 V3G2 | | |

Figura 3.20: Armaduras das vigas ensaiadas (GALVEZ, 2003).

As vigas reforçadas foram divididas em dois grupos: grupo 1, constituído por duas vigas com reforço em “U” aplicado em folhas posicionadas nos terços do vão próximos aos apoios, com as fibras a 90° e a 45° e o grupo 2, composto por três vigas com reforço aplicado em folhas nas laterais, ao longo do vão, e em tiras, envolvendo a viga em “U” ou envolvendo a viga por completo. A Figura 3.21 apresenta a forma de distribuição do reforço nas vigas ensaiadas.

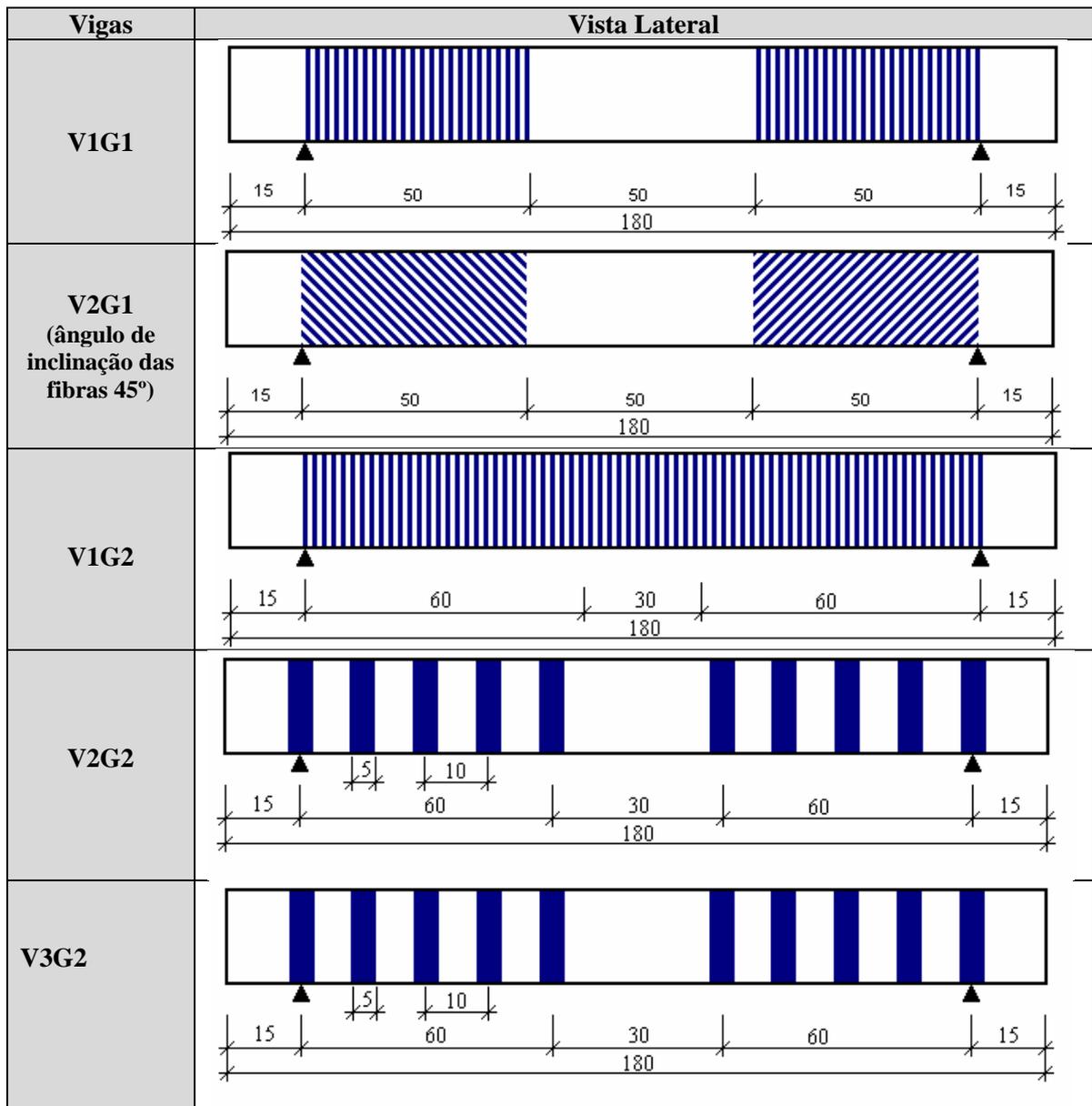


Figura 3.21: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas (GALVEZ, 2003).

A Tabela 3.23 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.23: Quantidade de camadas da fibra e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (GALVEZ, 2003).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_{fe} (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| V1G1 | 1 | 0,117 | 500 | 240000 | 324,61 | 90 | 500 | 12,15 |
| V2G1 | 1 | 0,117 | 500 | 240000 | 345,85 | 45 | 500 | 18,31 |
| V1G2 | 1 | 0,117 | 750 | 240000 | 727,31 | 90 | 750 | 28,71 |
| V2G2 | 1 | 0,117 | 50 | 240000 | 960,00 | 90 | 150 | 12,63 |
| V3G2 | 1 | 0,117 | 50 | 240000 | 960,00 | 90 | 150 | 12,63 |

A Tabela 3.24 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.24: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas.
(GALVEZ, 2003).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|-------------------------|--|--|
| VTG1 | Sem | Tração diagonal | * | 95 |
| V1G1 | Sem | Flexão | 151,32 | 134 |
| V2G1 | Sem | Flexão | 174,64 | 145 |
| VTG2 | Sem | Tração diagonal | * | 150 |
| V1G2 | Sem | Flexão | 214,94 | 241 |
| V2G2 | Sem | Descolamento do reforço | 171,72 | 175 |
| V3G2 | Sem | Descolamento do reforço | 174,28 | 232 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

3.2.7. Spagnolo et al. (2013)

Spagnolo *et al.* (2013), analisaram o comportamento de oito (8) vigas de concreto armado de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, sendo duas vigas de referência e seis com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Spagnolo mostra-se na Figura 3.22, as características das vigas aparecem na Tabela 3.25 e a descrição encontra-se na Tabela 3.26.

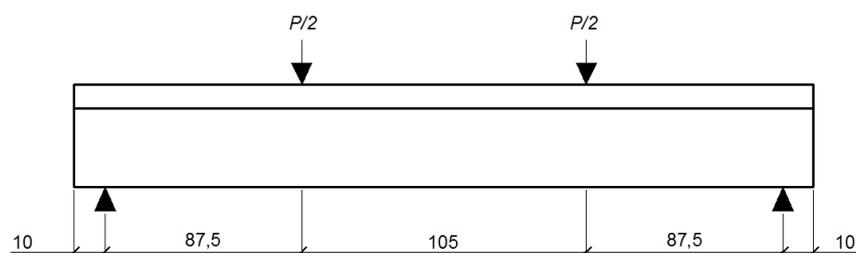


Figura 3.22: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (SPAGNOLO *et al.*, 2013)

Tabela 3.25: Características das vigas ensaiadas (SPAGNOLO *et al.*, 2013).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 48,44 | 596 | * | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VI-1 | 51,73 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VI-2 | 51,73 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VI-3 | 52,3 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| V2REF | 49,92 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VII-1 | 50,94 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VII-2 | 51,73 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |
| VII-3 | 52,3 | 596 | | 150 | 360 | 400 | 400 | 2,4 | 2800 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.26: Descrição das vigas ensaiadas (SPAGNOLO *et al.*, 2013).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|------------------|---|--|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| VI-1 | Em "U" | Na alma com faixas horizontais de tecido de fibra | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| VI-2 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra por faixa |
| VI-3 | | | Faixas verticais com três camadas de fibra por faixa |
| V2REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| VII-1 | Em "U" | Na alma com faixas horizontais de tecido de fibra | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| VII-2 | | | Faixas verticais com duas camadas de fibra por faixa |
| VII-3 | | | Faixas verticais com três camadas de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.23.

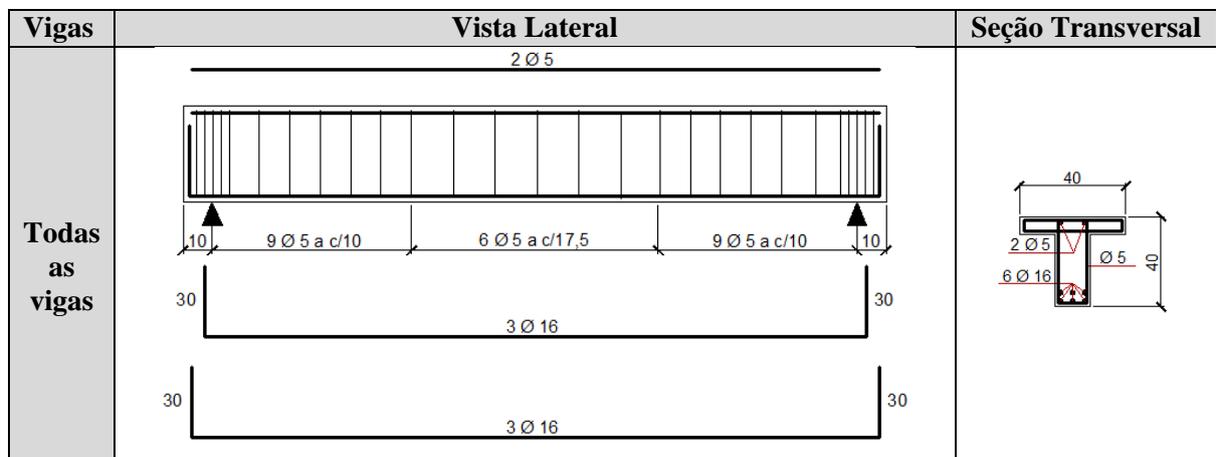


Figura 3.23: Detalhamento do armado das vigas ensaiadas (SPAGNOLO *et al.*, 2013).

O reforço com fibra de carbono (PRFC) foi colado nas vigas em forma de “U”, composto por faixas verticais de uma, duas e três camadas de fibra por faixa, e ancorado com uma faixa horizontal de tecido de fibra na alma da viga. Os detalhes apresentam-se na Figura 3.24.

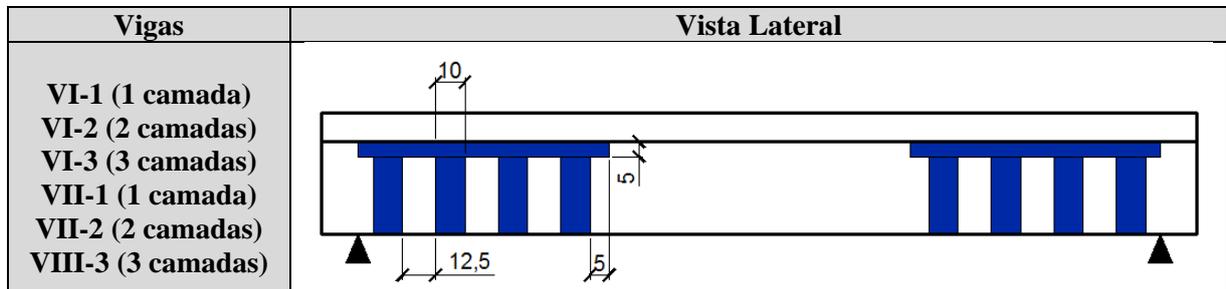


Figura 3.24: Detalhes de colocação do reforço das vigas (SPAGNOLO *et al.*, 2013).

A Tabela 3.27 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.27: quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (SPAGNOLO *et al.*, 2013)

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fc} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_{fc} (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| VI-1 | 1 | 0,122 | 100 | 255000 | 1020,00 | 90 | 30,97 | 61,94 |
| VI-2 | 2 | 0,122 | 100 | 255000 | 1020,00 | 90 | 61,94 | 123,89 |
| VI-3 | 3 | 0,122 | 100 | 255000 | 905,78 | 90 | 82,51 | 165,02 |
| VII-1 | 1 | 0,122 | 100 | 255000 | 1020,00 | 90 | 30,97 | 61,94 |
| VII-2 | 2 | 0,122 | 100 | 255000 | 1020,00 | 90 | 61,94 | 123,89 |
| VII-3 | 3 | 0,122 | 100 | 255000 | 905,78 | 90 | 82,51 | 165,02 |

A Tabela 3.28 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.28: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas.
(SPAGNOLO *et al.*, 2013).

| Viga | Pre-fissura | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{kR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|--------------|-------------|---|--|--|
| V1REF | Não | Tração diagonal | * | 407,22 |
| VI-1 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 500,14 | 552,79 |
| VI-2 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 519,66 | 586,65 |
| VI-3 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 533,70 | 590,13 |
| V2REF | Não | Tração diagonal | * | 302,50 |
| VII-1 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 402,00 | 433,34 |
| VII-2 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 430,86 | 466,57 |
| VII-3 | Sem | Tração diagonal com descolamento do reforço | 448,98 | 416,30 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

3.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS INTERNACIONAIS

Os estudos internacionais estão divididos em: uma pesquisa da Universidade de Missouri (Estados Unidos), Khalifa e Nanni (2000), uma pesquisa da Universidade de Padova (Itália), Pellegrino e Modena (2002), uma pesquisa da Universidade de Lulea (Suécia), Täljsten Björn (2003), uma pesquisa da Universidade de Gazi (Turquia) Altin *et al.* (2010) e uma pesquisa da Universidade McGill (Canada) Mofidi e Chaallal (2011).

No caso da coleta de dados de pesquisas internacionais, resulta mais complexo achar dados que se adequem aos requerimentos para a formação do banco de dados, pelo fato que as pesquisas serem muito específicas e a falta de algum dos parâmetros necessários para serem reproduzidos analiticamente.

Em continuação apresenta-se as pesquisas internacionais que foram a base do banco de dados.

3.3.1. Khalifa e Nanni (2000)

Khalifa e Nanni (2000) analisaram o comportamento de seis (6) vigas de concreto armado de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, sendo uma viga de referência e cinco com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Khalifa e Nanni mostra-se na Figura 3.25, as características das vigas aparecem na Tabela 3.29 e a descrição encontra-se na Tabela 3.30.

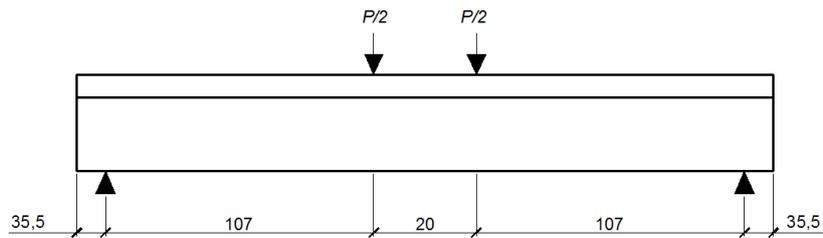


Figura 3.25: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (KHALIFA e NANNI, 2000)

Tabela 3.29: Características das vigas ensaiadas (KHALIFA e NANNI, 2000).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_v (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|--------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| BT1REF | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |
| BT2 | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |
| BT3 | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |
| BT4 | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |
| BT5 | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |
| BT6 | 35 | 350 | 530 | 150 | 366 | 380 | 405 | 2,923 | 2340 |

Tabela 3.30: Descrição das vigas ensaiadas (KHALIFA e NANNI, 2000).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|--------|----------------------|-----------|---|
| BT1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| BT2 | Em “U” | - | Contínuo vertical com uma camada de fibra |
| BT3 | Em “U” | | Contínuo com uma camada de fibra horizontal e outra camada vertical |
| BT4 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| BT5 | Somente nas laterais | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| BT6 | Em “U” | | Inserido na mesa fixado com barras horizontais de PRFV |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.26. As vigas não apresentam armadura ao cisalhamento.

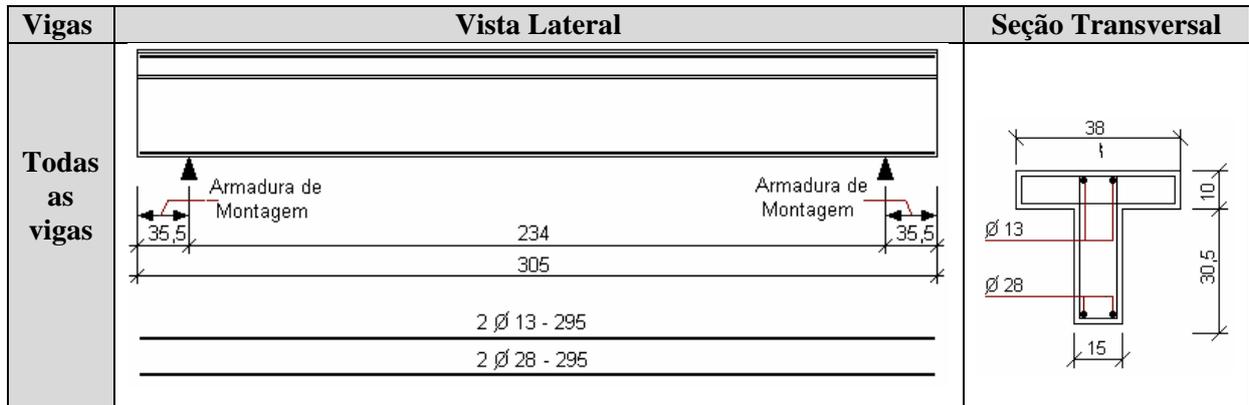
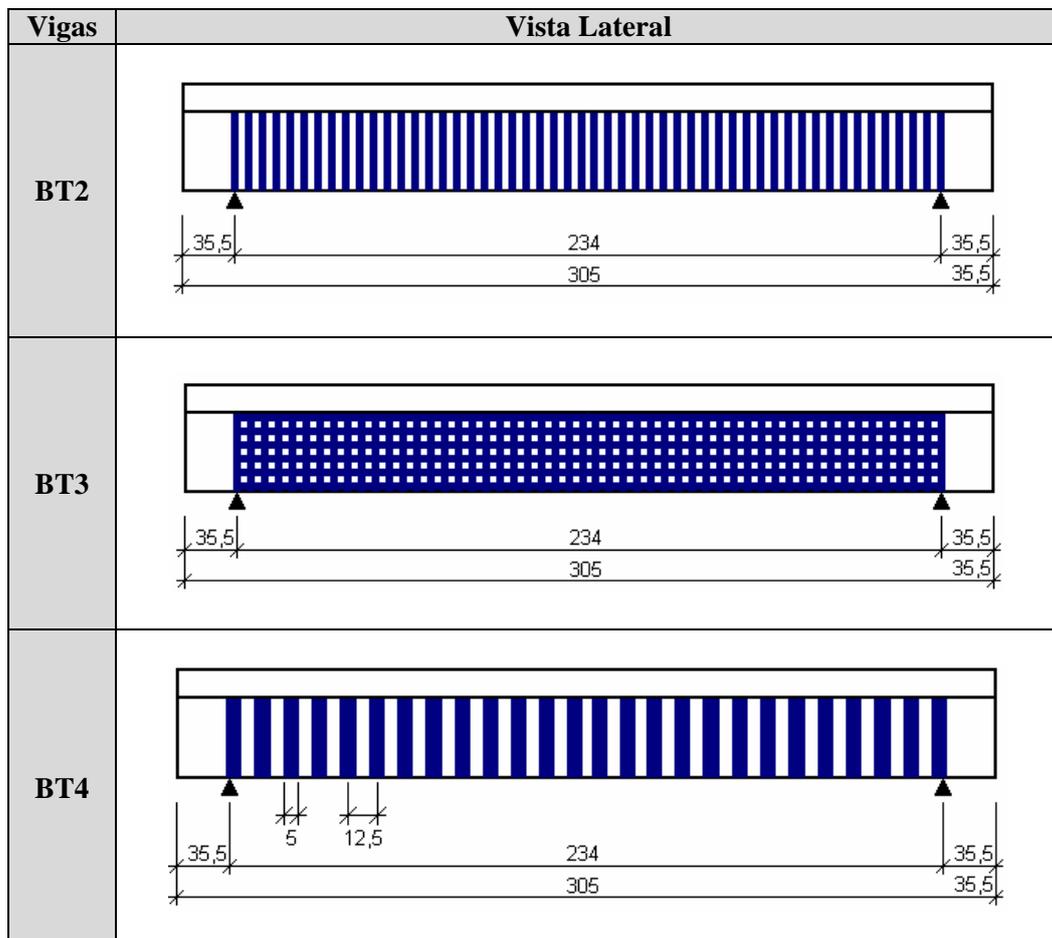


Figura 3.26: Detalhamento do armado das vigas (KHALIFA e NANNI, 2000).

As vigas experimentaram duas formas de reforço, a primeira consistiu em um reforço em forma de “U” contínuo na totalidade do seu comprimento, e o segundo reforço também foi contínuo na totalidade do seu comprimento alternando com reforço só nas laterais e em “U” segundo mostrado na Figura 3.27.



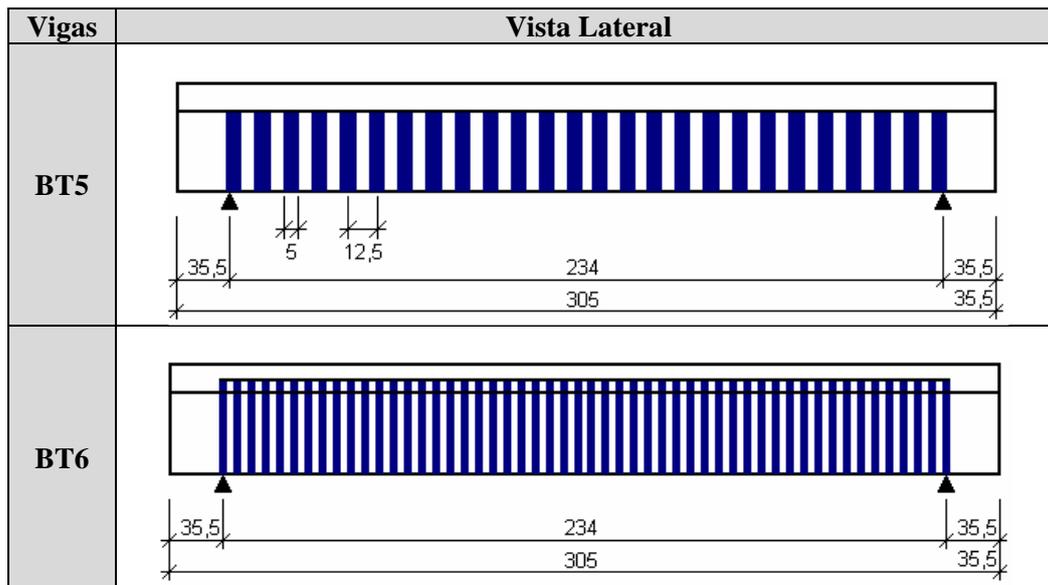


Figura 3.27: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas
(KHALIFA e NANNI, 2000).

A Tabela 3.31 apresenta a quantidade de camadas da fibra de carbono e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.31: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (KHALIFA e NANNI, (2000).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| BT2 | 1 | 0,165 | 1070 | 228000 | 912,00 | 90 | 1070 | 80,06 |
| BT3 | 1 | 0,165 | 1070 | 228000 | 912,00 | 90 | 1070 | 80,06 |
| BT4 | 1 | 0,165 | 50 | 228000 | 912,00 | 90 | 125 | 32,02 |
| BT5 | 1 | 0,165 | 50 | 228000 | 912,00 | 90 | 125 | 32,02 |
| BT6 | 1 | 0,165 | 1070 | 228000 | 912,00 | 90 | 1070 | 80,06 |

A Tabela 3.32 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.32: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (KHALIFA e NANNI, (2000)).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|---------------|---------------|-------------------------|--|--|
| BT1REF | Sem | Tração diagonal | 96,90 | 180 |
| BT2 | | Descolamento do reforço | 215,50 | 310 |
| BT3 | | Descolamento do reforço | 215,50 | 315 |
| BT4 | | Descolamento do reforço | 144 | 324 |
| BT5 | | Descolamento do reforço | 124,40 | 243 |
| BT6 | | Flexão | 240,90 | 442 |

3.3.2. Pellegrino e Modena (2002)

Pellegrino e Modena (2002) analisaram o comportamento de 11 vigas de concreto armado de seção transversal retangular, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, sendo duas vigas de referência e nove com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Pellegrino e Modena mostra-se na Figura 3.28, as características das vigas aparecem na Tabela 3.33 e a descrição encontra-se na Tabela 3.34.

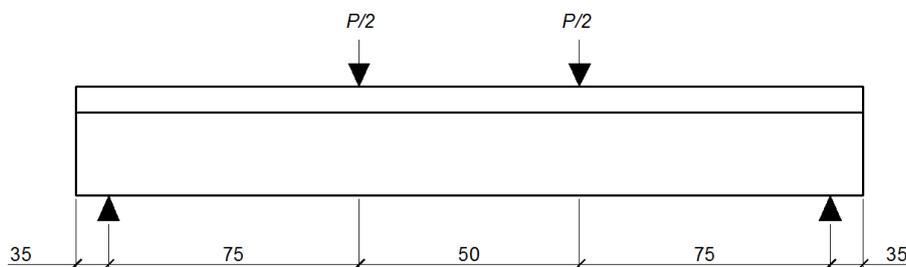


Figura 3.28: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (PELLEGRINO e MODENA, 2002)

Tabela 3.33: Características das vigas ensaiadas (PELLEGRINO e MODENA, 2002)

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-----|-------------|
| TR30C1REF | 27,5 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30C2 | 27,5 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30C3 | 27,5 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30C4 | 27,5 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D1REF | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D10 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D2 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D20 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D3 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D4 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |
| TR30D40 | 31,4 | 548 | 653 | 150 | 250 | 150 | 285 | 3 | 2000 |

Tabela 3.34: Descrição das vigas ensaiadas (PELLEGRINO e MODENA, 2002).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-----------|----------------------|-----------|--|
| TR30C1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| TR30C2 | Somente nas laterais | - | Faixas verticais contínuas com uma camada de fibra por faixa |
| TR30C3 | | | Faixas verticais contínuas com três camadas de fibra por faixa |
| TR30C4 | | | Faixas verticais contínuas com três camadas de fibra por faixa |
| TR30D1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| TR30D10 | Somente nas laterais | - | Faixas verticais contínuas com duas camadas de fibra por faixa |
| TR30D2 | | | Faixas verticais contínuas com três camadas de fibra por faixa |
| TR30D20 | | | Faixas verticais contínuas com três camadas de fibra por faixa |
| TR30D3 | | | Faixas verticais contínuas com uma camada de fibra por faixa |
| TR30D4 | | | Faixas verticais contínuas com duas camadas de fibra por faixa |
| TR30D40 | | | Faixas verticais contínuas com duas camadas de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.29; as vigas TR30C1REF, TR30C2, TR30C3 e TR30C4 não possuíam armadura de cisalhamento no vão de corte.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|---|---------------|-------------------|
| TR30D1REF TR30D10 TR30D2 TR30D20 TR30D3 TR30D4 TR30D40 | | |

Figura 3.29: Detalhamento do armado das vigas ensaiadas
(PELLEGRINO e MODENA, 2002).

O reforço empregado nas vigas foi contínuo composto por uma, duas ou três camadas de fibra, e colado no concreto nas laterais da viga ao longo do seu comprimento, como mostrado na Figura 3.30.

| Vigas | Vista Lateral |
|--------------------------------------|---------------|
| TR30C2 (1 camada) | |
| TR30C3 (3 camadas) | |
| TR30C4 (3 camadas) | |
| TR30D10 (2 camadas) | |
| TR30D2 (3 camadas) | |
| TR30D20 (3 camadas) | |
| TR30D3 (1 camada) | |
| TR30D4 (2 camadas) | |
| TR30D40 (2 camadas) | |

Figura 3.30: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas
(PELLEGRINO e MODENA, 2002).

A Tabela 3.35 apresenta a quantidade de camadas da fibra e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.35: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (PELLEGRINO e MODENA, 2002).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|---------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| TR30C2 | 1 | 0,165 | 750 | 233600 | 599,94 | 90 | 750 | 49,50 |
| TR30C3 | 3 | 0,165 | 750 | 233600 | 420,23 | 90 | 750 | 104,01 |
| TR30C4 | 3 | 0,165 | 750 | 233600 | 420,23 | 90 | 750 | 104,01 |
| TR30D10 | 2 | 0,165 | 750 | 233600 | 538,44 | 90 | 750 | 88,84 |
| TR30D2 | 3 | 0,165 | 750 | 233600 | 459,08 | 90 | 750 | 113,62 |
| TR30D20 | 3 | 0,165 | 750 | 233600 | 459,08 | 90 | 750 | 113,62 |
| TR30D3 | 1 | 0,165 | 750 | 233600 | 655,40 | 90 | 750 | 54,07 |
| TR30D4 | 2 | 0,165 | 750 | 233600 | 538,44 | 90 | 750 | 88,84 |
| TR30D40 | 2 | 0,165 | 750 | 233600 | 538,44 | 90 | 750 | 88,84 |

A Tabela 3.36 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.36: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (PELLEGRINO e MODENA, 2002).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-----------|---------------|-------------------------|---|--|
| TR30C1REF | Não | Tração diagonal | 131,80 | 149,40 |
| TR30C2 | | Ruptura do reforço | 216,00 | 240,00 |
| TR30C3 | | Ruptura do reforço | 300,56 | 225,60 |
| TR30C4 | | Ruptura do reforço | 300,56 | 280,40 |
| TR30D1REF | | Tração diagonal | 253,80 | 323,00 |
| TR30D10 | | Descolamento do reforço | 397,00 | 386,00 |
| TR30D2 | | Descolamento do reforço | 439,00 | 426,60 |
| TR30D20 | | Descolamento do reforço | 439,00 | 495,00 |
| TR30D3 | | Descolamento do reforço | 338,00 | 322,80 |
| TR30D4 | | Descolamento do reforço | 397,00 | 417,60 |
| TR30D40 | | Descolamento do reforço | 397,00 | 424,00 |

3.3.3. Täljsten Björn (2003)

Täljsten Björn (2003) analisou o comportamento de sete (7) vigas de concreto armado de seção transversal retangular, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC), sendo uma viga de referência e seis com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Täljsten Björn mostra-se na Figura 3.31, as características das vigas aparecem na Tabela 3.37 e a descrição encontra-se na Tabela 3.38.

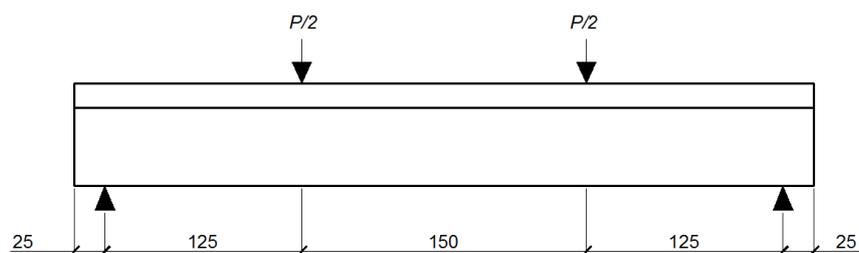


Figura 3.31: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003)

Tabela 3.37: Características das vigas ensaiadas (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003).

| Vigas | f_c' (MPa) | f_y' (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| R1 | 55,94 | 500 | * | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| RC1 | 55,94 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| C1 | 55,94 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| C2 | 59,26 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| C3 | 48,72 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| C4 | 48,72 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |
| C5 | 59,26 | 500 | | 180 | 439 | 180 | 500 | 2,847 | 4000 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.38: Descrição das vigas ensaiadas (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|----------------------|-----------|---|
| R1 | - | - | Viga de referência sem reforço |
| RC1 | Somente nas laterais | - | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa (200g/m ²) |
| C1 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa (125g/m ²) |
| C2 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa (200g/m ²) |
| C3 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa, distribuída ao longo de todo o vão faixa (200g/m ²) |
| C4 | | | Faixas horizontais com uma camada de fibra por faixa, distribuída ao longo de todo o vão faixa (200g/m ²) |
| C5 | | | Faixas inclinadas a 45° com uma camada de fibra por faixa (300g/m ²) |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.32.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|----------------|---------------|-------------------|
| Todas as vigas | | |

Figura 3.32: Armaduras das vigas ensaiadas (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003).

O reforço empregado foi em forma de laminas, coladas nas laterais das vigas, com faixas verticais, horizontais e inclinadas a 45°, os detalhes apresentam-se na Figura 3.33.

| Vigas | Vista Lateral |
|-------------------------------------|---------------|
| RC1 200g/m ² Φ=45° | |
| C1 125g/m ² Φ=45° | |
| C2 200g/m ² Φ=45° | |
| C3 200g/m ² Φ=90° | |
| C4 200g/m ² Φ=0° | |
| C5 300g/m ² Φ=45° | |

Figura 3.33: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas (TÄLJSTEN BJÖRN, (2003).

A Tabela 3.39 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.39: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_{fe} (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| RC1 | 1 | 0,11 | 2000 | 234000 | 936,00 | 45 | 2000 | 127,84 |
| C1 | 1 | 0,07 | 2000 | 234000 | 936,00 | 45 | 2000 | 81,35 |
| C2 | 1 | 0,11 | 2000 | 234000 | 936,00 | 45 | 2000 | 127,84 |
| C3 | 1 | 0,11 | 2000 | 234000 | 936,00 | 90 | 2000 | 90,40 |
| C4 | 1 | 0,11 | 2000 | 234000 | 936,00 | 0 | 2000 | 90,40 |
| C5 | 1 | 0,165 | 2000 | 234000 | 936,00 | 45 | 2000 | 191,76 |

A Tabela 3.40 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.40: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (TÄLJSTEN BJÖRN, 2003).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|------------------|---|---|
| R1 | Não | Tração diagonal | * | 248,10 |
| RC1 | Não | Tração diagonal | | 612,10 |
| C1 | Não | Ruptura da fibra | | 493,30 |
| C2 | Não | Tração diagonal | | 514,40 |
| C3 | Não | Tração diagonal | | 521,20 |
| C4 | Não | Flexão | | 308,10 |
| C5 | Não | Tração diagonal | | 668,60 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

3.3.4. Altin *et al.* (2010)

Altin. *et al.* (2010), analisaram o comportamento de 10 vigas de concreto armado de seção transversal “T”, (as vigas possuíam a metade da escala real), reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, sendo uma viga de referência e nove com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Altin mostra-se na Figura 3.34, as características das vigas aparecem na Tabela 3.41 e a descrição encontra-se na Tabela 3.42.

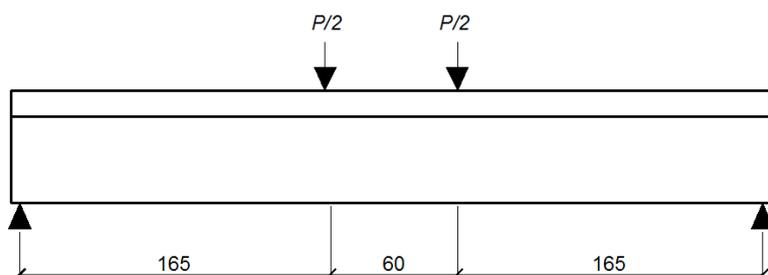


Figura 3.34: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (ALTIN *et al.*, 2010)

Tabela 3.41: Características das vigas ensaiadas (ALTIN *et al.*, 2010).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_v (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| V1REF | 25 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V2 | 25,2 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V3 | 24,9 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V4 | 24,8 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V5 | 24,8 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V6 | 25 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V7 | 24,9 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V8 | 25 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V9 | 25,1 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |
| V10 | 24,6 | 275 | 385,8 | 120 | 330 | 360 | 360 | 5 | 3900 |

Tabela 3.42: Descrição das vigas ensaiadas (ALTIN *et al.*, 2010).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-------|------------------|----------------------------|--|
| V1REF | - | - | Viga de referência sem reforço |
| V2 | Em "U" | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V3 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V4 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V5 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V6 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V7 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V8 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V9 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| V10 | | Inserido na mesa e na alma | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.35, sete das vigas foram dimensionadas com déficit de aço ao cisalhamento e as três restantes sem armadura alguma.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|---|---------------|-------------------|
| V1REF V2 V3 V4 V5 V6 V7 | | |
| V8 V9 V10 | | |

Figura 3.35: Armadura das vigas ensaiadas (ALTIN *et al.*, 2010).

O reforço nas vigas foi em faixas verticais coladas em forma de “U”, variando o espaçamento entre as faixas de reforço, e seis vigas com o reforço ancorado como mostrado na Figura 3.36 e Figura 3.37.

| Vigas | Vista Lateral |
|----------------------------|---------------|
| V2 $S_f = 125\text{mm}$ | |
| V3 $S_f = 150\text{mm}$ | |

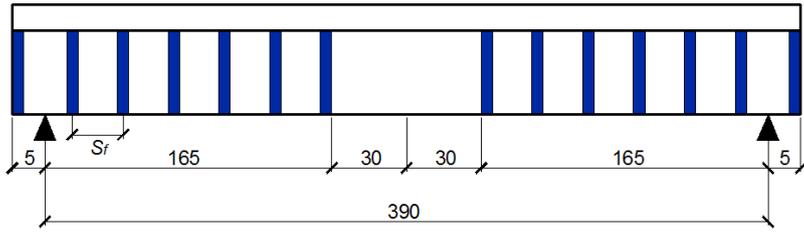
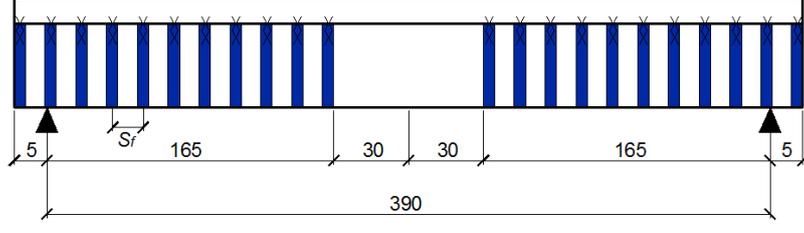
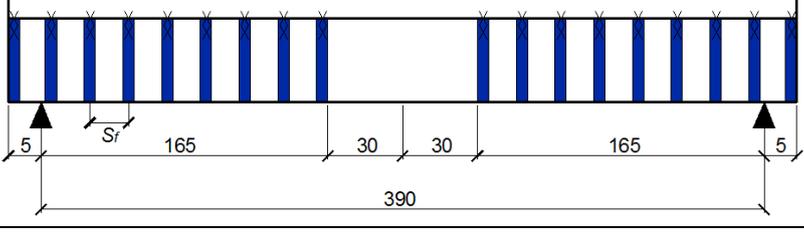
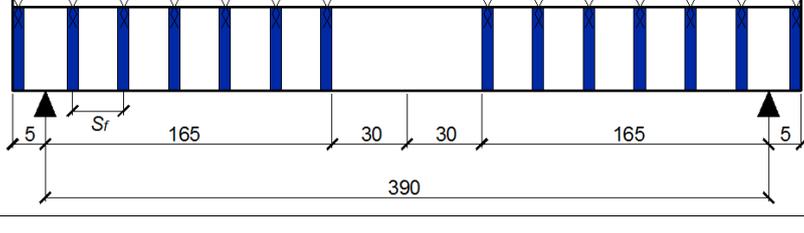
| Vigas | Vista Lateral |
|---------------------------------|--|
| V4 $S_f = 200\text{mm}$ |  |
| V5 e V8 $S_f = 125\text{mm}$ |  |
| V6 e V9 $S_f = 150\text{mm}$ |  |
| V10 $S_f = 200\text{mm}$ |  |

Figura 3.36: Detalhe de colocação do reforço das vigas ensaiadas (ALTIN *et al.*, 2010).

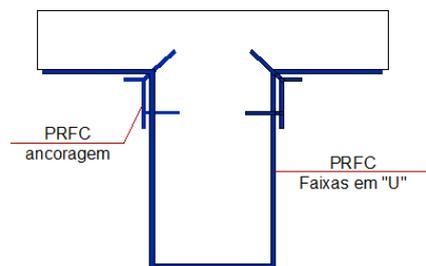


Figura 3.37: Detalhe das ancoragens das vigas ensaiadas (ALTIN *et al.*, 2010).

A Tabela 3.43 apresenta a quantidade de camadas de fibra utilizadas e o valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.43: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (ALTIN *et al.*, 2010).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| V2 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 867,44 | 90 | 125 | 21,23 |
| V3 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 860,54 | 90 | 150 | 17,55 |
| V4 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 858,23 | 90 | 200 | 13,13 |
| V5 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 858,23 | 90 | 125 | 21,01 |
| V6 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 862,84 | 90 | 150 | 17,60 |
| V7 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 860,54 | 90 | 200 | 13,17 |
| V8 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 862,84 | 90 | 125 | 21,12 |
| V9 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 865,14 | 90 | 150 | 17,65 |
| V10 | 1 | 0,12 | 50 | 231000 | 853,61 | 90 | 200 | 13,06 |

A tabela 3.44 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.44: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas.

(ALTIN *et al.*, 2010).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-------|---------------|-------------------------|---|--|
| V1REF | Não | Tração diagonal | 104,56 | 99,02 |
| V2 | Não | Descolamento do reforço | 150,06 | 165,10 |
| V3 | Não | Descolamento do reforço | 142,12 | 163,98 |
| V4 | Não | Descolamento do reforço | 130,14 | 138,08 |
| V5 | Não | Flexão | 149,54 | 175,36 |
| V6 | Não | Flexão | 142,26 | 172,62 |
| V7 | Não | Flexão | 132,70 | 171,26 |
| V8 | Não | Flexão | 111,24 | 172,72 |
| V9 | Não | Flexão | 103,84 | 170,42 |
| V10 | Não | Flexão | 93,74 | 170,00 |

3.3.5. Mofidi e Chaallal (2011)

Mofidi e Chaallal (2011) analisaram o comportamento de 14 vigas de concreto armado de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono sendo duas vigas de referência e 12 com diversas configurações de reforço ao cisalhamento. O esquema de ensaio empregado por Mofidi e Chaallal mostra-se na Figura 3.38, as características das vigas aparecem na Tabela 3.45 e a descrição encontra-se na Tabela 3.46.

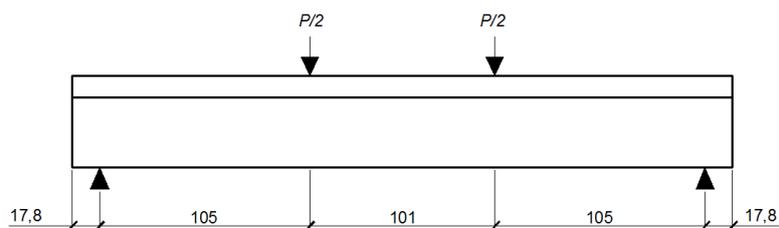


Figura 3.38: Esquema de ensaio, (dimensões em cm) (MOFIDI e CHAALLAL, 2011)

Tabela 3.45: Características das vigas ensaiadas (MOFIDI e CHAALLAL, 2011).

| Vigas | f'_c (MPa) | f'_y (MPa) | f_u (MPa) | b_w (mm) | d (mm) | b_f (mm) | h (mm) | a/d | Vão (mm) |
|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| Para todas as vigas | 31 | 540 | * | 160 | 350 | 508 | 406 | 3 | 3110 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

Tabela 3.46: Descrição das vigas ensaiadas (MOFIDI e CHAALLAL, 2011).

| Vigas | Forma do reforço | Ancoragem | Descrição do reforço com fibra de carbono |
|-----------|------------------|-----------|--|
| S0-0.0R | - | - | Viga de referência sem reforço |
| S0-0.12R | Em "U" | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S0-0.17R1 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S0-0.17R2 | | | Contínuo vertical com uma camada de fibra |
| S0-0.20R1 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S0-0.20R2 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S0-0.23R | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S0-0.33R | | | Contínuo vertical com uma camada de fibra |
| S0-0.66R | | | Contínuo vertical com uma camada de fibra |
| S1-0.0R | - | - | Viga de referência sem reforço |
| S1-0.17R1 | Em "U" | - | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S1-0.17R2 | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S1-0.23R | | | Faixas verticais com uma camada de fibra por faixa |
| S1-0.33R | | | Contínuo vertical com uma camada de fibra |

O detalhamento das armaduras das vigas apresenta-se na Figura 3.39. As vigas encontram-se divididas em dois grupos: grupo 1, vigas da série S0 sem armadura de cisalhamento e o grupo 2, vigas da série S1 com armadura de cisalhamento, ϕ 8 mm com espaçamento $d/2$.

| Vigas | Vista Lateral | Seção Transversal |
|----------------|---------------|-------------------|
| Todas as vigas | | |

Figura 3.39: Detalhamento do armado das vigas ensaiadas. [MOFIDI e CHAALLAL (2011)]

As vigas experimentam duas formas de reforço em forma de “U”, o primeiro consistiu-o em um reforço contínuo na totalidade do seu comprimento e o segundo reforço em faixas verticais na totalidade do seu comprimento, segundo mostrado na Figura 3.40.

| Vigas | w_f/s_f | Vista Lateral |
|-----------|-----------|---------------|
| S0-0.12R | 4/11,5 | |
| S0-0.17R1 | 8,75/17,5 | |
| S0-0.20R1 | 5,3/8,75 | |
| S0-0.20R2 | 3/5 | |
| S0-0.23R | 8,75/12,5 | |
| S0-0.17R2 | 1 | |
| S0-0.33R | | |
| S0-0.66R | | |
| S1-0.33R | | |
| S1-0.17R1 | 8,75/17,5 | |
| S1-0.17R2 | 8,75/17,5 | |
| S1-0,23R | 8,75/12,5 | |

Figura 3.40: Detalhes de colocação do reforço das vigas ensaiadas

(MOFIDI e CHAALLAL, 2011).

A Tabela 3.47 apresenta a quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra de carbono.

Tabela 3.47: Quantidade de camadas da fibra de carbono e valor da parcela que é resistida pela fibra “ V_f ” (MOFIDI e CHAALLAL, 2011).

| Vigas | n | t_f (mm) | w_f (mm) | E_f (MPa) | f_{fe} (MPa) | Ângulo de inclinação | S_f (mm) | V_f (kN) |
|-----------|---|---------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| S0-0.12R | 1 | 0,11 | 40 | 230000 | 920,00 | 90 | 115 | 17,46 |
| S0-0.17R1 | 1 | 0,11 | 87,5 | 230000 | 920,00 | 90 | 175 | 25,10 |
| S0-0.17R2 | 1 | 0,11 | 1000 | 230000 | 920,00 | 90 | 1000 | 50,20 |
| S0-0.20R1 | 1 | 0,11 | 53 | 230000 | 920,00 | 90 | 87,5 | 30,40 |
| S0-0.20R2 | 1 | 0,11 | 30 | 230000 | 920,00 | 90 | 50 | 30,12 |
| S0-0.23R | 1 | 0,11 | 87,5 | 230000 | 920,00 | 90 | 125 | 35,14 |
| S0-0.33R | 1 | 0,11 | 1000 | 230000 | 920,00 | 90 | 1000 | 50,20 |
| S0-0.66R | 1 | 0,11 | 1000 | 230000 | 920,00 | 90 | 1000 | 50,20 |
| S1-0.17R1 | 1 | 0,11 | 87,5 | 230000 | 920,00 | 90 | 175 | 25,10 |
| S1-0.17R2 | 1 | 0,11 | 87,5 | 230000 | 920,00 | 90 | 175 | 25,10 |
| S1-0.23R | 1 | 0,11 | 87,5 | 230000 | 920,00 | 90 | 125 | 35,14 |
| S1-0.33R | 1 | 0,11 | 1000 | 230000 | 920,00 | 90 | 1000 | 50,20 |

A Tabela 3.48 apresenta o modo de ruptura e a carga última experimental das vigas ensaiadas.

Tabela 3.48: Modo de ruptura e carga última experimental das vigas ensaiadas (MOFIDI e CHAALLAL, 2011).

| Vigas | Pré-fissurada | Modo de ruptura | Carga de serviço estimada ao cisalhamento após o reforço (P_{KR}) (kN) | Carga última Experimental (P_u) (kN) |
|-----------|---------------|-------------------------|---|--|
| S0-0.0R | Sem | Tração diagonal | * | 122,70 |
| S0-0.12R | Sem | Ruptura do reforço | | 182,60 |
| S0-0.17R1 | Sem | Descolamento do reforço | | 203,10 |
| S0-0.17R2 | Sem | Descolamento do reforço | | 154,70 |
| S0-0.20R1 | Sem | Ruptura do reforço | | 201,90 |
| S0-0.20R2 | Sem | Ruptura do reforço | | 197,90 |
| S0-0.23R | Sem | Ruptura do reforço | | 227,30 |
| S0-0.33R | Sem | Descolamento do reforço | | 181,20 |
| S0-0.66R | Sem | Descolamento do reforço | | 183,80 |
| S1-0.0R | Sem | Tração diagonal | | 350,60 |
| S1-0.17R1 | Sem | Descolamento do reforço | | 365,90 |
| S1-0.17R2 | Sem | Descolamento do reforço | | 372,50 |
| S1-0.23R | Sem | Descolamento do reforço | | 383,40 |
| S1-0.33R | Sem | Descolamento do reforço | | 378,30 |

(*) Valores não fornecidos pelo pesquisador.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS. RELAÇÃO TEÓRICA EXPERIMENTAL

4.1. PRELIMINARES

Com o conhecimento das vantagens da utilização dos compósitos de fibra de carbono no reforço de estruturas de concreto armado, vem se desenvolvendo modelos analíticos para melhorar o dimensionamento, detalhamento e colocação destes reforços. Porém o dimensionamento do reforço ao cisalhamento com PRF está longe de ser completamente entendido e a modelagem numérica exata do fenômeno encontra-se em andamento, sendo necessário seu contínuo estudo.

As normas e recomendações normativas que incluem especificações para o dimensionamento do reforço com PRFC ao cisalhamento abordam o tema como uma parcela que é resistida pela fibra adicionada às parcelas resistidas pelo concreto e aço.

Nesta parte do trabalho foram obtidas as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " por uma das normas ABNT NBR 6118:2014 ou ACI 318 (2011) ou pelas prescrições do pesquisador Zsutty (1968). A partir dessas são acrescentadas as parcelas do reforço " V_f " calculadas pelas normas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-Bulletin 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), que dentre as pesquisas analisadas propuseram formulações que levam em consideração os principais problemas de ruptura apresentados nas vigas reforçadas: a ruptura por descolamento da fibra e a ruptura da própria fibra.

O objetivo consiste em avaliar as normas e prescrições chegando a obter uma metodologia de cálculo que represente melhor o comportamento experimental das vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono.

Na avaliação da precisão dos modelos de previsão foram selecionadas vigas reforçadas com fibra de carbono coladas na superfície do concreto, seguindo os seguintes esquemas de reforço:

- 19 vigas de referência sem reforço ao cisalhamento;
- 29 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente nas laterais da alma;

- 35 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente na alma da viga em forma de “U” ou “L” e sem ancoragem de prevenção de descolamento;
- 20 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente na alma da viga em forma de “U” com ancoragem de prevenção de descolamento;
- 13 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC com envolvimento total da alma.

No total foram 120 vigas, três a menos, as quais não foram incluídas na análise, representando 2,44% do total de vigas avaliadas. Os resultados das vigas excluídas eram discrepantes ao padrão das outras vigas, sendo suficiente para gerar dúvidas sobre as propriedades e condições presentes nas pesquisas estudadas.

O estudo foca-se na previsão das cargas de ruptura com a finalidade de obter as formulações que melhor se adequem ao comportamento de vigas reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono.

Para a escolha do método mais preciso de previsão, observou-se tanto a razão teórico-experimental como também o coeficiente de variação da média que mostra o desvio dos valores da média calculada.

Apresenta-se na sequência as Tabelas com os resultados obtidos.

4.2. VIGAS DE REFERÊNCIA SEM REFORÇO AO CISALHAMENTO

Os estudos experimentais analisados incluíam no mínimo uma viga de referência, as mesmas não possuíam reforço ao cisalhamento e em muitos casos também não apresentavam armadura transversal, somente armadura longitudinal. O objetivo de se fazer estas vigas era poder quantificar e avaliar o aporte da fibra como mecanismo de reforço à carga última resistida pela viga.

Foram computadas 19 vigas com diversos parâmetros (apresentados na coleta dos estudos experimentais no Capítulo 3).

As vigas de referência desta pesquisa foram utilizadas para verificar os cálculos feitos empregando as normas ABNT NBR 6118:2014, ACI 318 (2011) e as prescrições do pesquisador Zsutty (1968) para o cisalhamento de vigas de concreto armado. As formulações aplicadas possuem parcelas obtidas a partir de estudos empíricos, sendo estes possíveis com

os dados experimentais, por obterem uma ideia do quanto as normas se aproximam da realidade.

A Tabela 4.1 mostra os resultados comparativos calculados pela ABNT NBR 6118:2014, ACI 318 (2011) e as prescrições do pesquisador Zsutty (1968).

Tabela 4.1: Comparação dos resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2011) e Zsutty (1968), para vigas sem reforço ao cisalhamento.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | NBR 6118 | | ACI 318 | | Zsutty | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | |
| 1 | V1REF | 251 | 168,85 | 1,49 | 131,32 | 1,91 | 184,96 | 1,36 |
| 2 | V4REF | 368,4 | 240,06 | 1,53 | 217,54 | 1,69 | 270,63 | 1,36 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | |
| 3 | V1REF | 360 | 244,57 | 1,47 | 219,59 | 1,64 | 272,93 | 1,32 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 4 | V1REF | 260 | 192,34 | 1,35 | 191,77 | 1,36 | 240,98 | 1,08 |
| 5 | V5REF | 372 | 251,19 | 1,48 | 230,09 | 1,62 | 301,03 | 1,24 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 6 | V1REF | 234,06 | 207,01 | 1,13 | 170,34 | 1,37 | 202,41 | 1,16 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 7 | V8A REF | 114,7 | 98,76 | 1,16 | 84,24 | 1,36 | 124,78 | 0,92 |
| 8 | V8B REF | 112,98 | 98,76 | 1,14 | 84,24 | 1,34 | 124,78 | 0,91 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 9 | VTG1 | 95 | 119,61 | 0,79 | 108,29 | 0,88 | 120,03 | 0,79 |
| 10 | VTG2 | 150 | 168,36 | 0,89 | 136,16 | 1,10 | 171,55 | 0,87 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | |
| 11 | V1REF | 407,22 | 332,60 | 1,22 | 306,00 | 1,33 | 359,12 | 1,13 |
| 12 | V2REF | 302,5 | 260,38 | 1,16 | 223,50 | 1,35 | 276,72 | 1,09 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | |
| 13 | BT1REF | 180 | 148,03 | 1,22 | 118,25 | 1,52 | 162,93 | 1,10 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | |
| 14 | TR30C1REF | 149,4 | 86,09 | 1,74 | 74,32 | 2,01 | 108,05 | 1,38 |
| 15 | TR30D1REF | 323 | 218,09 | 1,48 | 222,87 | 1,45 | 268,87 | 1,20 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | |
| 16 | R1 | 248,1 | 291,26 | 0,85 | 217,93 | 1,14 | 306,55 | 0,81 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | |
| 17 | V1REF | 99,02 | 116,11 | 0,85 | 103,98 | 0,95 | 123,81 | 0,80 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | |
| 18 | S0-0.0R | 122,7 | 105,14 | 1,17 | 92,13 | 1,33 | 138,65 | 0,88 |
| 19 | S1-0.0R | 350,6 | 252,70 | 1,39 | 256,08 | 1,37 | 302,60 | 1,16 |
| | | | Media | 1,24 | Media | 1,41 | Media | 1,08 |
| | | | Desvio padrão | 0,26 | Desvio padrão | 0,29 | Desvio padrão | 0,20 |
| | | | CV (%) | 21,35 | CV (%) | 20,46 | CV (%) | 18,61 |

No Gráfico 4.1 apresentasse a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2011) e Zsutty (1968), para vigas sem reforço ao cisalhamento.

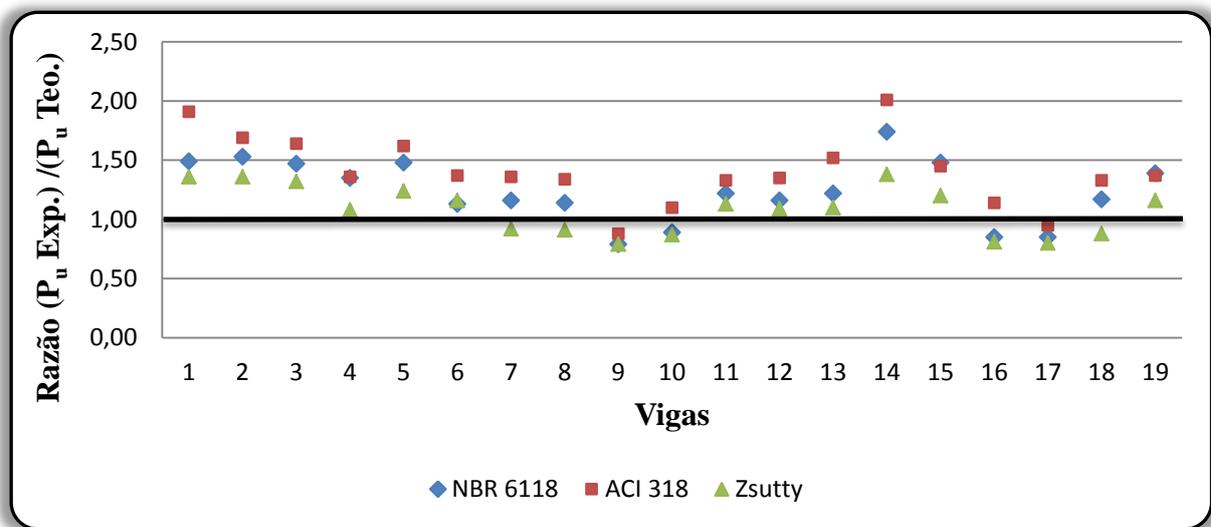


Gráfico 4.1: Variação da razão Exp./Teo. para as vigas sem reforço.

Resultados da análise:

- O método que apresenta menor variação é o proposto por Zsutty (1968), sendo o que mais se aproxima dos resultados experimentais. Os valores teóricos, em média, encontram-se 8% abaixo dos obtidos experimentalmente, com coeficiente de variação de 18,61%.
- Para as vigas de 7 a 10 e de 16 a 18 o método do Zsutty mostra-se não conservador, superestimando a resistência e o valor da carga última obtida nas vigas.
- No caso da norma ACI 318 (2011), 85% das vigas ensaiadas apresentaram resultados mais conservadores, em média 41% abaixo dos resultados experimentais. O coeficiente de variação obtido é de 20,46%.
- As maiores razões Exp./Teo. obtidas encontram-se nos trabalhos de Salles Neto (2000), Silva Filho (2001), Araújo (2002), Khalifa e Nanni (2000) e Pellegrino e Modena (2002). Destes 5 estudos, 4 são compostos por vigas de seção transversal “T”, o que sugere que as normas estimam cargas menores para este tipo de vigas se comparadas com os valores obtidos experimentalmente.

4.3. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC SOMENTE NAS LATERAIS DA ALMA

Foram analisadas 33 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente nas laterais da alma, sendo 29 vigas empregadas para realizar comparações, devido quatro (4) destas apresentarem ruptura à flexão. Portanto, fatores como os da última viga do estudo de Täljsten (2003) e as vigas do estudo de Galvez (2003) não foram especificadas nas Tabelas a seguir.

A comparação das cargas últimas no laboratório com as calculadas pelas normativas e as prescrições dos pesquisadores foram realizadas utilizando os valores totais de capacidade de carga ao cisalhamento.

4.3.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)

A Tabela 4.2 mostra os resultados comparativos calculados pela ABNT NBR 6118:2014, para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " com os valores da parcela do reforço " V_f " calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.2 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com a ABN NBR 6118:2014 combinados com o ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para as vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais

Tabela 4.2: Comparação dos resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | NBR 6118 | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 212,48 | 264,96 | 0,80 | 289,69 | 0,73 | 272,51 | 0,78 |
| 2 | V3 | 257,16 | 265,87 | 0,97 | 290,74 | 0,88 | 273,45 | 0,94 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 3 | V9A | 196,24 | 138,10 | 1,42 | 168,44 | 1,17 | 157,67 | 1,24 |
| 4 | V9B | 208,58 | 138,10 | 1,51 | 168,44 | 1,24 | 157,67 | 1,32 |
| 5 | V21A | 230,38 | 138,10 | 1,67 | 168,44 | 1,37 | 157,67 | 1,46 |
| 6 | V12B | 203,30 | 138,11 | 1,47 | 168,45 | 1,21 | 162,29 | 1,25 |
| 7 | V14B | 183,30 | 138,11 | 1,33 | 168,45 | 1,09 | 162,28 | 1,13 |
| 8 | V13A | 244,01 | 177,43 | 1,38 | 200,88 | 1,21 | 182,07 | 1,34 |
| 9 | V13B | 251,50 | 177,43 | 1,42 | 200,88 | 1,25 | 182,07 | 1,38 |
| 10 | V14A | 256,78 | 210,01 | 1,22 | 222,76 | 1,15 | 225,77 | 1,14 |
| 11 | V15A | 241,12 | 210,01 | 1,15 | 222,76 | 1,08 | 225,77 | 1,07 |
| 12 | V20B | 285,82 | 293,81 | 0,97 | 317,91 | 0,90 | 194,58 | 1,47 |
| 13 | V22B | 225,02 | 293,81 | 0,77 | 317,91 | 0,71 | 194,58 | 1,16 |
| 14 | V21B | 271,40 | 293,84 | 0,92 | 364,87 | 0,74 | 227,04 | 1,20 |
| 15 | V22A | 251,19 | 293,84 | 0,85 | 364,87 | 0,69 | 227,04 | 1,11 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | |
| 16 | TR30C2 | 240,00 | 185,09 | 1,30 | 198,91 | 1,21 | 174,44 | 1,38 |
| 17 | TR30C3 | 225,60 | 294,11 | 0,77 | 269,03 | 0,84 | 197,83 | 1,14 |
| 18 | TR30C4 | 280,40 | 294,11 | 0,95 | 269,03 | 1,04 | 197,83 | 1,42 |
| 19 | TR30D10 | 386,00 | 395,78 | 0,98 | 378,91 | 1,02 | 329,04 | 1,17 |
| 20 | TR30D2 | 426,60 | 445,34 | 0,96 | 410,32 | 1,04 | 336,50 | 1,27 |
| 21 | TR30D20 | 495,00 | 445,34 | 1,11 | 410,32 | 1,21 | 336,50 | 1,47 |
| 22 | TR30D3 | 322,80 | 326,24 | 0,99 | 336,64 | 0,96 | 310,55 | 1,04 |
| 23 | TR30D4 | 417,60 | 395,78 | 1,06 | 378,91 | 1,10 | 329,04 | 1,27 |
| 24 | TR30D40 | 424,00 | 395,78 | 1,07 | 378,91 | 1,12 | 329,04 | 1,29 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | |
| 25 | RC1 | 612,10 | 546,95 | 1,12 | 535,34 | 1,14 | 564,76 | 1,08 |
| 26 | C1 | 493,30 | 453,97 | 1,09 | 446,59 | 1,10 | 513,09 | 0,96 |
| 27 | C2 | 514,40 | 558,36 | 0,92 | 546,75 | 0,94 | 580,48 | 0,89 |
| 28 | C3 | 521,20 | 446,43 | 1,17 | 493,03 | 1,06 | 445,30 | 1,17 |
| 29 | C5 | 668,60 | 686,21 | 0,97 | 657,75 | 1,02 | 636,69 | 1,05 |
| 30 | C4 | 308,1 | - | - | - | - | - | - |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 31 | V1G1 | 134 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | V2G1 | 145 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | V1G2 | 241 | - | - | - | - | - | - |
| | | | Media | 1,11 | Media | 1,06 | Media | 1,19 |
| | | | Desvio padrão | 0,24 | Desvio padrão | 0,18 | Desvio padrão | 0,18 |
| | | | CV (%) | 21,28 | CV (%) | 16,70 | CV (%) | 14,90 |

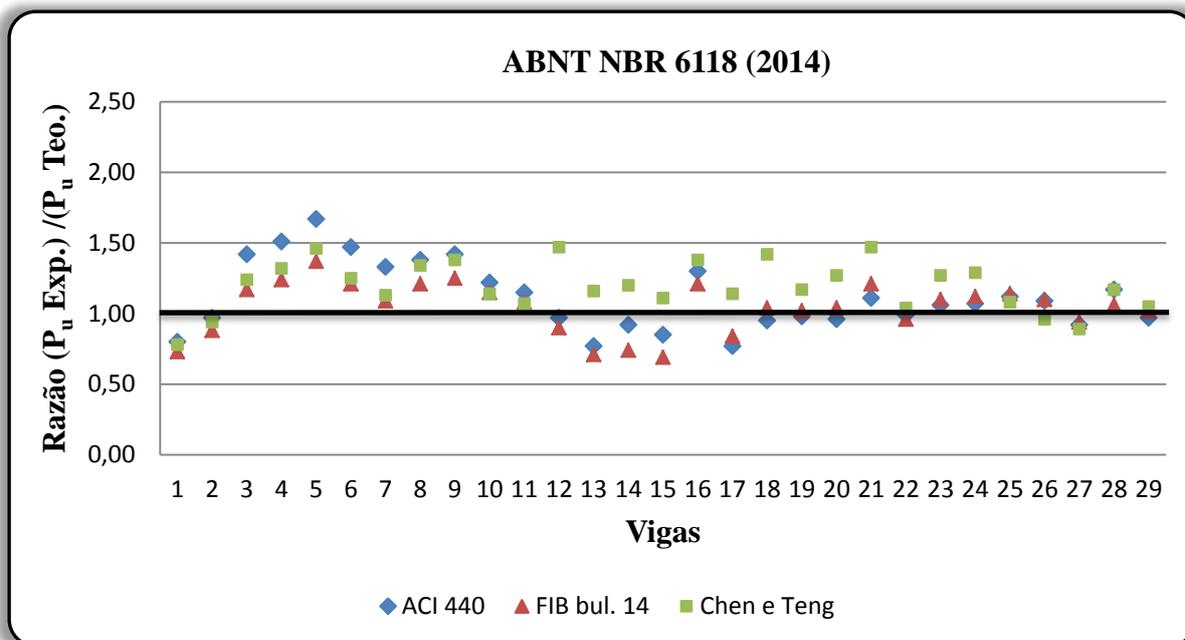


Gráfico 4.2: Variação da razão Exp./Teo. base com ABNT NBR 6118 (2014) para as vigas com reforço somente nas laterais.

Resultados da análise:

- Utilizando como base a ABNT NBR 6118:2014 para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento, em conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter menores variações, na ordem de 15% se comparada com as variações obtidas pelo ACI 440.2R (2008) e o CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001).
- O método de Chen e Teng (2003) considera em suas formulações a diferença do dimensionamento do reforço para aplicação em “U” e para aplicação somente nas laterais; o ACI 440.2R (2008) considera essa variabilidade também pelo coeficiente “ k_2 ”; da análise dos resultados evidenciou-se que o parâmetro do ACI 440.2R (2008) mostrou-se mais adequado do que os parâmetros de Chen e Teng (2003).
- No caso da norma CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) não possui uma parcela que leva em conta de forma direta o tipo de aplicação nas laterais da viga do reforço, ela está incluída na determinação da deformação efetiva da fibra e segue o mesmo estudo da aplicação para o formato em “U”.
- No estudo de Beber (2003), para as vigas de três 3 a 11, a variação nos resultados deve-se a utilização de diferentes tipos de compósitos com fibra de carbono. Para as

últimas quatro vigas utilizou-se reforço laminado CFK 200/2000 e as outras mantas Replark 20.

- Outra das diferenças das vigas ensaiadas por Beber, é que as primeiras têm espessuras de fibra menores e como a última tem espessura maior as normas superestimam a resistência uma vez que no ensaio a ruptura principalmente é ocasionada por descolagem do reforço.
- Para as vigas 17 a 29 também de seção retangular o emprego do ACI 440.2R (2008) e a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) para determinar a parcela de reforço mostra melhores aproximações do que as formulações de Chen e Teng (2003) que pode tanto superestimar como subestimar a capacidade resistente última das vigas.

4.3.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)

A Tabela 4.3 mostra os resultados comparativos calculados pelo ACI 318 (2011), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " com os valores da parcela do reforço " V_f " calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.3 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais.

Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | ACI 318 | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 212,48 | 227,70 | 0,93 | 252,43 | 0,84 | 235,25 | 0,90 |
| 2 | V3 | 257,16 | 228,16 | 1,13 | 253,03 | 1,02 | 235,74 | 1,09 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 3 | V9A | 196,24 | 123,58 | 1,59 | 153,92 | 1,27 | 143,15 | 1,37 |
| 4 | V9B | 208,58 | 123,58 | 1,69 | 153,92 | 1,36 | 143,15 | 1,46 |
| 5 | V21A | 230,38 | 123,58 | 1,86 | 153,92 | 1,50 | 143,15 | 1,61 |
| 6 | V12B | 203,30 | 123,58 | 1,65 | 153,93 | 1,32 | 147,75 | 1,38 |
| 7 | V14B | 183,30 | 123,58 | 1,48 | 153,93 | 1,19 | 147,75 | 1,24 |
| 8 | V13A | 244,01 | 162,91 | 1,50 | 186,36 | 1,31 | 167,54 | 1,46 |
| 9 | V13B | 251,50 | 162,91 | 1,54 | 186,36 | 1,35 | 167,54 | 1,50 |
| 10 | V14A | 256,78 | 195,49 | 1,31 | 208,23 | 1,23 | 211,25 | 1,22 |
| 11 | V15A | 241,12 | 195,49 | 1,23 | 208,23 | 1,16 | 211,25 | 1,14 |
| 12 | V20B | 285,82 | 279,29 | 1,02 | 303,39 | 0,94 | 180,06 | 1,59 |
| 13 | V22B | 225,02 | 279,29 | 0,81 | 303,39 | 0,74 | 180,06 | 1,25 |
| 14 | V21B | 271,40 | 279,32 | 0,97 | 350,35 | 0,77 | 212,52 | 1,28 |
| 15 | V22A | 251,19 | 279,32 | 0,90 | 350,35 | 0,72 | 212,52 | 1,18 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | |
| 16 | TR30C2 | 240,00 | 173,31 | 1,38 | 187,14 | 1,28 | 162,66 | 1,48 |
| 17 | TR30C3 | 225,60 | 282,34 | 0,80 | 257,26 | 0,88 | 186,06 | 1,21 |
| 18 | TR30C4 | 280,40 | 282,34 | 0,99 | 257,26 | 1,09 | 186,06 | 1,51 |
| 19 | TR30D10 | 386,00 | 400,55 | 0,96 | 383,68 | 1,01 | 333,81 | 1,16 |
| 20 | TR30D2 | 426,60 | 450,11 | 0,95 | 415,09 | 1,03 | 341,28 | 1,25 |
| 21 | TR30D20 | 495,00 | 450,11 | 1,10 | 415,09 | 1,19 | 341,28 | 1,45 |
| 22 | TR30D3 | 322,80 | 331,01 | 0,98 | 341,41 | 0,95 | 315,32 | 1,02 |
| 23 | TR30D4 | 417,60 | 400,55 | 1,04 | 383,68 | 1,09 | 333,81 | 1,25 |
| 24 | TR30D40 | 424,00 | 400,55 | 1,06 | 383,68 | 1,11 | 333,81 | 1,27 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | |
| 25 | RC1 | 612,10 | 473,62 | 1,29 | 462,01 | 1,32 | 491,44 | 1,25 |
| 26 | C1 | 493,30 | 380,64 | 1,30 | 373,26 | 1,32 | 439,76 | 1,12 |
| 27 | C2 | 514,40 | 479,15 | 1,07 | 467,54 | 1,10 | 501,27 | 1,03 |
| 28 | C3 | 521,20 | 386,11 | 1,35 | 432,71 | 1,20 | 384,98 | 1,35 |
| 29 | C5 | 668,60 | 607,00 | 1,10 | 578,54 | 1,16 | 557,48 | 1,20 |
| 30 | C4 | 308,1 | - | - | - | - | - | - |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 31 | V1G1 | 134 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | V2G1 | 145 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | V1G2 | 241 | - | - | - | - | - | - |
| | | | Media | 1,11 | Media | 1,12 | Media | 1,28 |
| | | | Desvio padrão | 0,24 | Desvio padrão | 0,20 | Desvio padrão | 0,17 |
| | | | CV (%) | 21,28 | CV (%) | 18,12 | CV (%) | 13,61 |

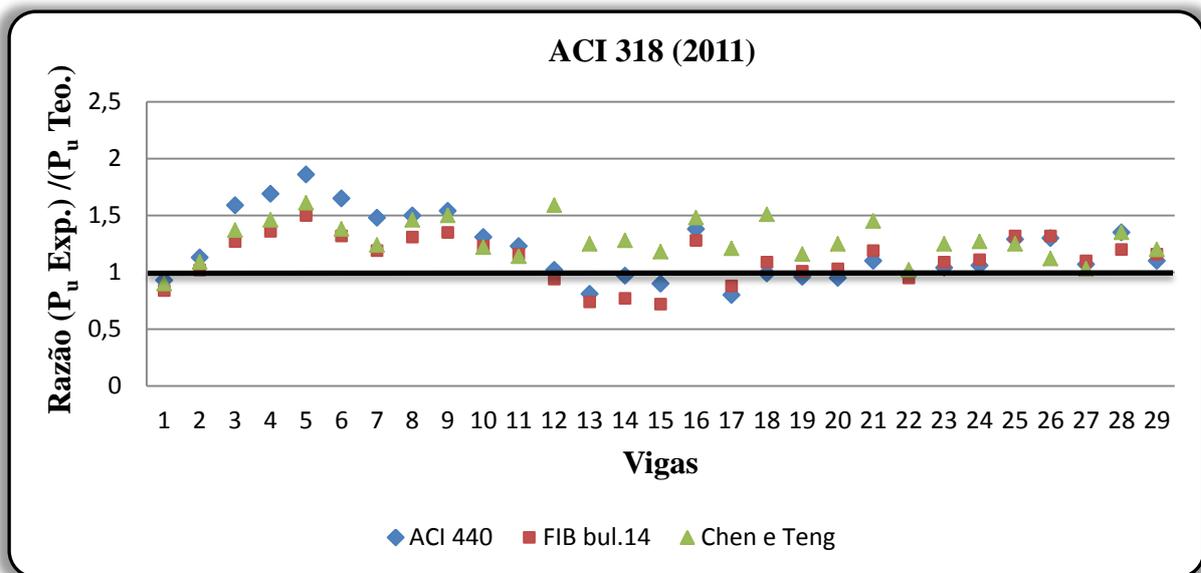


Gráfico 4.3: Variação da razão Exp./Teo. base com ACI 318 (2011) para as vigas com reforço somente nas laterais.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o ACI 318 (2011) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, obteve-se as menores variações da ordem de 14% se comparada com as variações obtidas pelo ACI 440.2R (2008) (21%) e a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) (18%) e menores que as obtidas com base na ABNT NBR 6118:2014
- Para as vigas de seção retangular três a 11 a tendência das normativas e recomendações é de subestimar a capacidade resistente das vigas, sendo o ACI 440.2R (2008) quem apresenta os maiores valores.
- Os resultados de Chen e Teng (2003) apresentaram tendências diferentes se comparado com os dois outros métodos, no caso específico da mudança do material no estudo de Beber (2003), o modelo não alterou seus fatores de previsão tão drasticamente como nos outros modelos.
- O modelo de Chen e Teng (2003) apresentou mais variação aplicado às vigas no estudo de Pellegrino e Modena (2002) que leva em conta a mudança no número de camadas da fibra. O método não acompanha tão bem os valores experimentais quando há duas o mais camadas.

4.3.3. Cálculo base com Zsutty (1968)

A Tabela 4.4 mostra os resultados comparativos calculados pelo Zsutty (1968), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " com os valores da parcela do reforço " V_f " calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-Bulletin 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.4 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-Bulletin 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais.

Tabela 4.4: Comparação dos resultados obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento somente nas laterais.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | Zsutty | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 212,48 | 259,73 | 0,82 | 284,45 | 0,75 | 267,27 | 0,79 |
| 2 | V3 | 257,16 | 260,16 | 0,99 | 285,02 | 0,90 | 267,73 | 0,96 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 3 | V9A | 196,24 | 164,12 | 1,20 | 194,46 | 1,01 | 183,69 | 1,07 |
| 4 | V9B | 208,58 | 164,12 | 1,27 | 194,46 | 1,07 | 183,69 | 1,14 |
| 5 | V21A | 230,38 | 164,12 | 1,40 | 194,46 | 1,18 | 183,69 | 1,25 |
| 6 | V12B | 203,30 | 164,12 | 1,24 | 194,47 | 1,05 | 188,29 | 1,08 |
| 7 | V14B | 183,30 | 164,12 | 1,12 | 194,47 | 0,94 | 188,29 | 0,97 |
| 8 | V13A | 244,01 | 203,45 | 1,20 | 226,90 | 1,08 | 208,09 | 1,17 |
| 9 | V13B | 251,50 | 203,45 | 1,24 | 226,90 | 1,11 | 208,09 | 1,21 |
| 10 | V14A | 256,78 | 236,03 | 1,09 | 248,77 | 1,03 | 251,79 | 1,02 |
| 11 | V15A | 241,12 | 236,03 | 1,02 | 248,77 | 0,97 | 251,79 | 0,96 |
| 12 | V20B | 285,82 | 319,83 | 0,89 | 343,93 | 0,83 | 220,60 | 1,30 |
| 13 | V22B | 225,02 | 319,83 | 0,70 | 343,93 | 0,65 | 220,60 | 1,02 |
| 14 | V21B | 271,40 | 319,86 | 0,85 | 390,89 | 0,69 | 253,06 | 1,07 |
| 15 | V22A | 251,19 | 319,86 | 0,79 | 390,89 | 0,64 | 253,06 | 0,99 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | |
| 16 | TR30C2 | 240,00 | 207,04 | 1,16 | 220,86 | 1,09 | 162,66 | 1,48 |
| 17 | TR30C3 | 225,60 | 316,06 | 0,71 | 290,98 | 0,78 | 186,06 | 1,21 |
| 18 | TR30C4 | 280,40 | 316,06 | 0,89 | 290,98 | 0,96 | 186,06 | 1,51 |
| 19 | TR30D10 | 386,00 | 446,55 | 0,86 | 429,68 | 0,90 | 379,81 | 1,02 |
| 20 | TR30D2 | 426,60 | 496,11 | 0,86 | 461,09 | 0,93 | 387,28 | 1,10 |
| 21 | TR30D20 | 495,00 | 496,11 | 1,00 | 461,09 | 1,07 | 387,28 | 1,28 |
| 22 | TR30D3 | 322,80 | 377,01 | 0,86 | 387,41 | 0,83 | 361,33 | 0,89 |
| 23 | TR30D4 | 417,60 | 446,55 | 0,94 | 429,68 | 0,97 | 379,81 | 1,10 |
| 24 | TR30D40 | 424,00 | 446,55 | 0,95 | 429,68 | 0,99 | 379,81 | 1,12 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | |
| 25 | RC1 | 612,10 | 562,24 | 1,09 | 550,63 | 1,11 | 580,06 | 1,06 |
| 26 | C1 | 493,30 | 469,27 | 1,05 | 461,88 | 1,07 | 528,38 | 0,93 |
| 27 | C2 | 514,40 | 568,19 | 0,91 | 556,58 | 0,92 | 590,31 | 0,87 |
| 28 | C3 | 521,20 | 473,55 | 1,10 | 520,16 | 1,00 | 472,42 | 1,10 |
| 29 | C5 | 668,60 | 696,04 | 0,96 | 667,58 | 1,00 | 646,52 | 1,03 |
| 30 | C4 | 308,1 | - | - | - | - | - | - |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 31 | V1G1 | 134 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | V2G1 | 145 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | V1G2 | 241 | - | - | - | - | - | - |
| | | | Media | 1,11 | Media | 0,95 | Media | 1,09 |
| | | | Desvio padrão | 0,24 | Desvio padrão | 0,14 | Desvio padrão | 0,16 |
| | | | CV (%) | 21,28 | CV (%) | 14,96 | CV (%) | 14,89 |

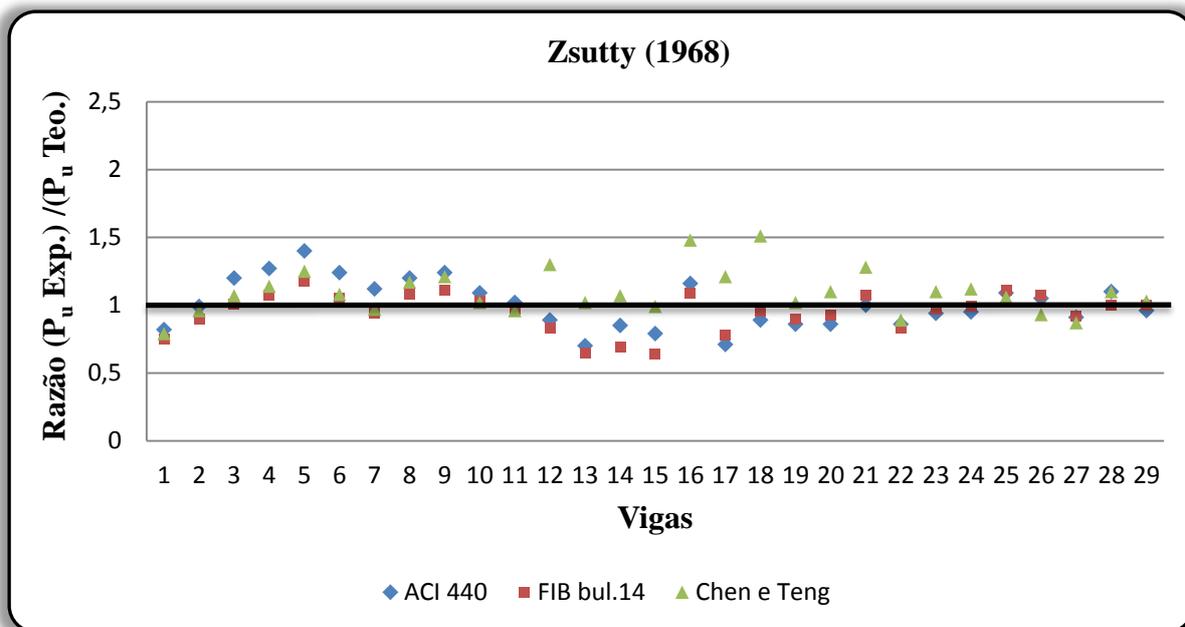


Gráfico 4.4: Variação da razão Exp./Teo. base com Zsutty (1968) para as vigas com reforço somente nas laterais.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o Zsutty (1968) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, obteve-se as menores variações da ordem de 15% se comparada com as variações obtidas pelo ACI 440.2R (2008) (21%) e a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) (15%).
- Apesar dos resultados obtidos na determinação da carga última de ruptura combinando o Zsutty (1968) com a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) apresentam a mesma variação da ordem do 15%, esta junção tende a superestimar a resistência das vigas, mostrando que não é conservador.
- Observam-se as mesmas variações nos resultados para as mudanças da fibra nos estudos de Beber (2003), sendo muito boa neste caso a utilização das formulações de Chen e Teng (2003).

4.4. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC EM “U” E EM “L” SEM ANCORAGEM

Foram computadas 35 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente na alma da viga em forma de “U” ou “L” e sem ancoragem de prevenção de descolamento.

A comparação das cargas últimas no laboratório com as calculadas pelas normativas e as prescrições dos pesquisadores foi realizada utilizando os valores totais de capacidade de carga ao cisalhamento.

4.4.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)

A Tabela 4.5 mostra os resultados comparativos calculados pela ABNT NBR 6118:2014, para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.5 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com a ABNT NBR 6118:2014 combinados com ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” e em “L” sem ancoragem.

Tabela 4.5: Comparação dos resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” e em “L” sem ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | NBR 6118 | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 275,60 | 269,04 | 1,02 | 326,25 | 0,84 | 265,89 | 1,04 |
| 2 | V3 | 320,50 | 310,53 | 1,03 | 391,44 | 0,82 | 287,33 | 1,12 |
| 3 | V5 | 403,00 | 340,25 | 1,18 | 391,19 | 1,03 | 334,12 | 1,21 |
| 4 | V6 | 402,80 | 428,19 | 0,94 | 458,08 | 0,88 | 374,53 | 1,08 |
| 5 | V7 | 402,60 | 381,74 | 1,10 | 453,79 | 0,93 | 355,06 | 1,18 |
| 6 | V8 | 395,30 | 421,10 | 0,94 | 478,13 | 0,83 | 360,57 | 1,10 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V4 | 277,00 | 267,20 | 1,03 | 292,27 | 0,94 | 282,18 | 0,98 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 8 | V2G2 | 175,00 | 201,25 | 0,87 | 210,09 | 0,83 | 219,81 | 0,80 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 9 | V10A | 214,97 | 150,38 | 1,43 | 168,44 | 1,28 | 165,52 | 1,30 |
| 10 | V10B | 211,98 | 150,38 | 1,41 | 168,44 | 1,26 | 165,52 | 1,28 |
| 11 | V17A | 205,57 | 150,38 | 1,37 | 168,44 | 1,22 | 165,52 | 1,24 |
| 12 | V11A | 196,85 | 150,38 | 1,31 | 168,44 | 1,17 | 165,52 | 1,19 |
| 13 | V11B | 249,60 | 150,38 | 1,66 | 168,44 | 1,48 | 165,52 | 1,51 |
| 14 | V17B | 185,86 | 150,38 | 1,24 | 168,44 | 1,10 | 165,52 | 1,12 |
| 15 | V19A | 236,83 | 138,11 | 1,71 | 168,45 | 1,41 | 167,83 | 1,41 |
| 16 | V19B | 230,26 | 138,11 | 1,67 | 168,45 | 1,37 | 167,83 | 1,37 |
| 17 | V15B | 276,74 | 201,99 | 1,37 | 200,88 | 1,38 | 193,17 | 1,43 |
| 18 | V16B | 224,85 | 201,99 | 1,11 | 200,88 | 1,12 | 193,17 | 1,16 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | |
| 19 | BT2 | 310,00 | 308,14 | 1,01 | 326,83 | 0,95 | 262,23 | 1,18 |
| 20 | BT3 | 315,00 | 308,14 | 1,02 | 326,83 | 0,96 | 262,23 | 1,20 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | |
| 21 | V2 | 165,10 | 159,04 | 1,04 | 190,09 | 0,87 | 169,69 | 0,97 |
| 22 | V3 | 163,98 | 150,99 | 1,09 | 181,75 | 0,90 | 162,03 | 1,01 |
| 23 | V4 | 138,08 | 141,92 | 0,97 | 165,05 | 0,84 | 152,24 | 0,91 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | |
| 24 | S0-0.12R | 182,60 | 131,51 | 1,39 | 155,37 | 1,18 | 140,28 | 1,30 |
| 25 | S0-0.17R1 | 203,10 | 143,04 | 1,42 | 177,35 | 1,15 | 150,76 | 1,35 |
| 26 | S0-0.17R2 | 154,70 | 180,94 | 0,85 | 212,57 | 0,73 | 169,65 | 0,91 |
| 27 | S0-0.20R1 | 204,90 | 151,05 | 1,36 | 191,30 | 1,07 | 156,64 | 1,31 |
| 28 | S0-0.20R2 | 197,90 | 150,62 | 1,31 | 190,94 | 1,04 | 156,35 | 1,27 |
| 29 | S0-0.23R | 227,30 | 158,20 | 1,44 | 196,97 | 1,15 | 160,99 | 1,41 |
| 30 | S0-0.33R | 181,20 | 180,94 | 1,00 | 212,57 | 0,85 | 169,65 | 1,07 |
| 31 | S0-0.66R | 183,80 | 180,94 | 1,02 | 212,57 | 0,86 | 169,65 | 1,08 |
| 32 | S1-0.17R1 | 365,90 | 290,60 | 1,26 | 324,91 | 1,13 | 298,32 | 1,23 |
| 33 | S1-0.17R2 | 372,50 | 290,60 | 1,28 | 324,91 | 1,15 | 298,32 | 1,25 |
| 34 | S1-0.23R | 383,40 | 305,76 | 1,25 | 344,53 | 1,11 | 308,55 | 1,24 |
| 35 | S1-0.33R | 378,30 | 328,50 | 1,15 | 360,13 | 1,05 | 317,22 | 1,19 |
| | | | Media | 1,21 | Media | 1,05 | Media | 1,18 |
| | | | Desvio padrão | 0,23 | Desvio padrão | 0,19 | Desvio padrão | 0,16 |
| | | | CV (%) | 18,80 | CV (%) | 18,30 | CV (%) | 13,71 |

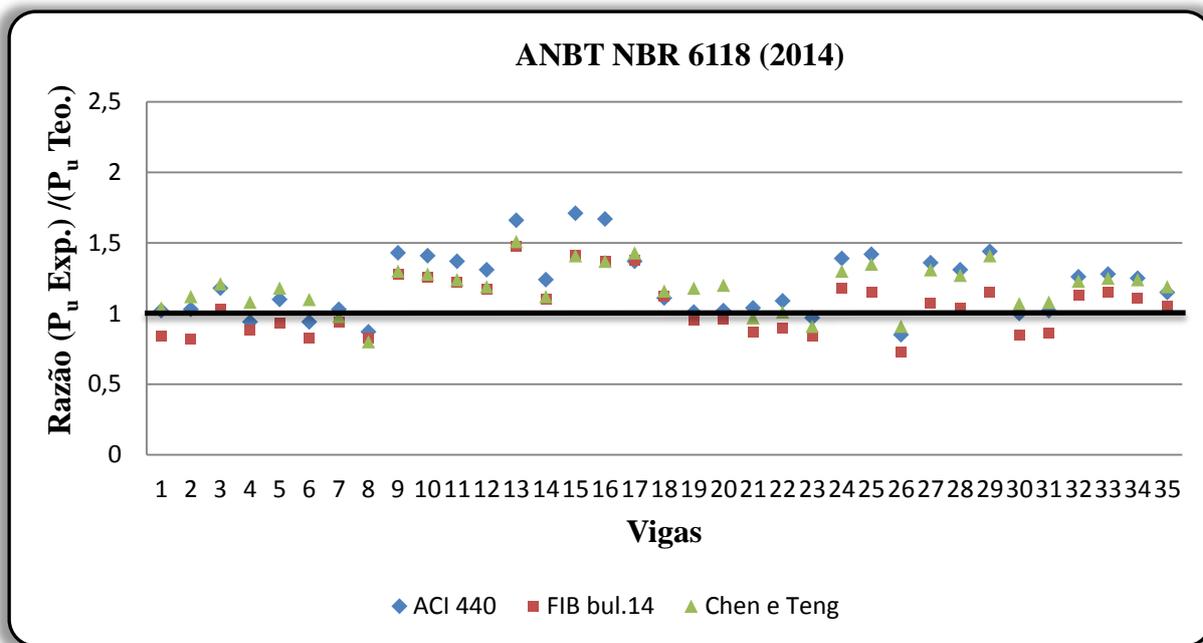


Gráfico 4.5: Variação da razão Exp./Teo. base com ABNT NBR 6118 (2014) para as vigas com reforço em “U” e em “L” sem ancoragem.

Resultados da análise:

- Utilizando como base a ABNT NBR 6118:2014 para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações da ordem de 14% se comparada com as variações obtidas pelo ACI 440.2R (2008) (19%) e a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) (18%).
- As maiores variações de subestimação das normativas com este tipo de reforço e com base na ABNT NBR 6118:2014 apresentam-se para as vigas de seção transversal retangular nove (9) a 18 correspondentes aos estudos de Galvez (2003) e Beber (2003). O comportamento dos resultados é similar tendendo a subestimar a capacidade resistente das vigas, se comparadas com os dados experimentais.
- O ACI 440.2R (2008) mostra a maior variação (19%) nos resultados obtidos, tendendo a subestimar a capacidade resistente das vigas ensaiadas.

4.4.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)

A Tabela 4.6 mostra os resultados comparativos calculados pelo ACI 318 (2011), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " com os valores da parcela do reforço " V_f " calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.6 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em "U" e em "L" sem ancoragem.

Tabela 4.6: Comparação dos resultados obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” e em “L” sem ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | ACI 318 | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 275,60 | 231,50 | 1,19 | 288,71 | 0,95 | 228,35 | 1,21 |
| 2 | V3 | 320,50 | 273,00 | 1,17 | 353,91 | 0,91 | 249,80 | 1,28 |
| 3 | V5 | 403,00 | 208,95 | 1,93 | 368,67 | 1,09 | 311,60 | 1,29 |
| 4 | V6 | 402,80 | 296,90 | 1,36 | 435,56 | 0,92 | 352,01 | 1,14 |
| 5 | V7 | 402,60 | 250,45 | 1,68 | 431,27 | 0,98 | 332,54 | 1,26 |
| 6 | V8 | 395,30 | 289,80 | 1,36 | 455,61 | 0,87 | 338,05 | 1,17 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V4 | 277,00 | 228,83 | 1,21 | 253,89 | 1,09 | 243,81 | 1,14 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 8 | V2G2 | 175,00 | 164,86 | 1,06 | 173,70 | 1,01 | 183,42 | 0,95 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 9 | V10A | 214,97 | 135,86 | 1,58 | 153,92 | 1,40 | 151,00 | 1,42 |
| 10 | V10B | 211,98 | 135,86 | 1,56 | 153,92 | 1,38 | 151,00 | 1,40 |
| 11 | V17A | 205,57 | 135,86 | 1,51 | 153,92 | 1,34 | 151,00 | 1,36 |
| 12 | V11A | 196,85 | 135,86 | 1,45 | 153,92 | 1,28 | 151,00 | 1,30 |
| 13 | V11B | 249,60 | 135,86 | 1,84 | 153,92 | 1,62 | 151,00 | 1,65 |
| 14 | V17B | 185,86 | 135,86 | 1,37 | 153,92 | 1,21 | 151,00 | 1,23 |
| 15 | V19A | 236,83 | 123,58 | 1,92 | 153,93 | 1,54 | 153,30 | 1,54 |
| 16 | V19B | 230,26 | 123,58 | 1,86 | 153,93 | 1,50 | 153,30 | 1,50 |
| 17 | V15B | 276,74 | 187,47 | 1,48 | 186,36 | 1,48 | 178,65 | 1,55 |
| 18 | V16B | 224,85 | 187,47 | 1,20 | 186,36 | 1,21 | 178,65 | 1,26 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | |
| 19 | BT2 | 310,00 | 278,37 | 1,11 | 297,06 | 1,04 | 232,45 | 1,33 |
| 20 | BT3 | 315,00 | 278,37 | 1,13 | 297,06 | 1,06 | 232,45 | 1,36 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | |
| 21 | V2 | 165,10 | 146,70 | 1,13 | 177,76 | 0,93 | 157,36 | 1,05 |
| 22 | V3 | 163,98 | 138,96 | 1,18 | 169,72 | 0,97 | 150,00 | 1,09 |
| 23 | V4 | 138,08 | 129,99 | 1,06 | 153,12 | 0,90 | 140,31 | 0,98 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | |
| 24 | S0-0.12R | 182,60 | 118,49 | 1,54 | 142,36 | 1,28 | 127,26 | 1,43 |
| 25 | S0-0.17R1 | 203,10 | 130,03 | 1,56 | 164,33 | 1,24 | 137,75 | 1,47 |
| 26 | S0-0.17R2 | 154,70 | 167,93 | 0,92 | 199,56 | 0,78 | 156,64 | 0,99 |
| 27 | S0-0.20R1 | 204,90 | 138,04 | 1,48 | 178,29 | 1,15 | 143,63 | 1,43 |
| 28 | S0-0.20R2 | 197,90 | 137,61 | 1,44 | 177,93 | 1,11 | 143,34 | 1,38 |
| 29 | S0-0.23R | 227,30 | 145,19 | 1,57 | 183,95 | 1,24 | 147,98 | 1,54 |
| 30 | S0-0.33R | 181,20 | 167,93 | 1,08 | 199,56 | 0,91 | 156,64 | 1,16 |
| 31 | S0-0.66R | 183,80 | 167,93 | 1,09 | 199,56 | 0,92 | 156,64 | 1,17 |
| 32 | S1-0.17R1 | 365,90 | 293,98 | 1,24 | 328,29 | 1,11 | 301,70 | 1,21 |
| 33 | S1-0.17R2 | 372,50 | 293,98 | 1,27 | 328,29 | 1,13 | 301,70 | 1,23 |
| 34 | S1-0.23R | 383,40 | 309,14 | 1,24 | 347,91 | 1,10 | 311,93 | 1,23 |
| 35 | S1-0.33R | 378,30 | 331,88 | 1,14 | 363,51 | 1,04 | 320,60 | 1,18 |
| | | | Media | 1,37 | Media | 1,13 | Media | 1,28 |
| | | | Desvio padrão | 0,27 | Desvio padrão | 0,21 | Desvio padrão | 0,17 |
| | | | CV (%) | 19,41 | CV (%) | 18,63 | CV (%) | 13,46 |

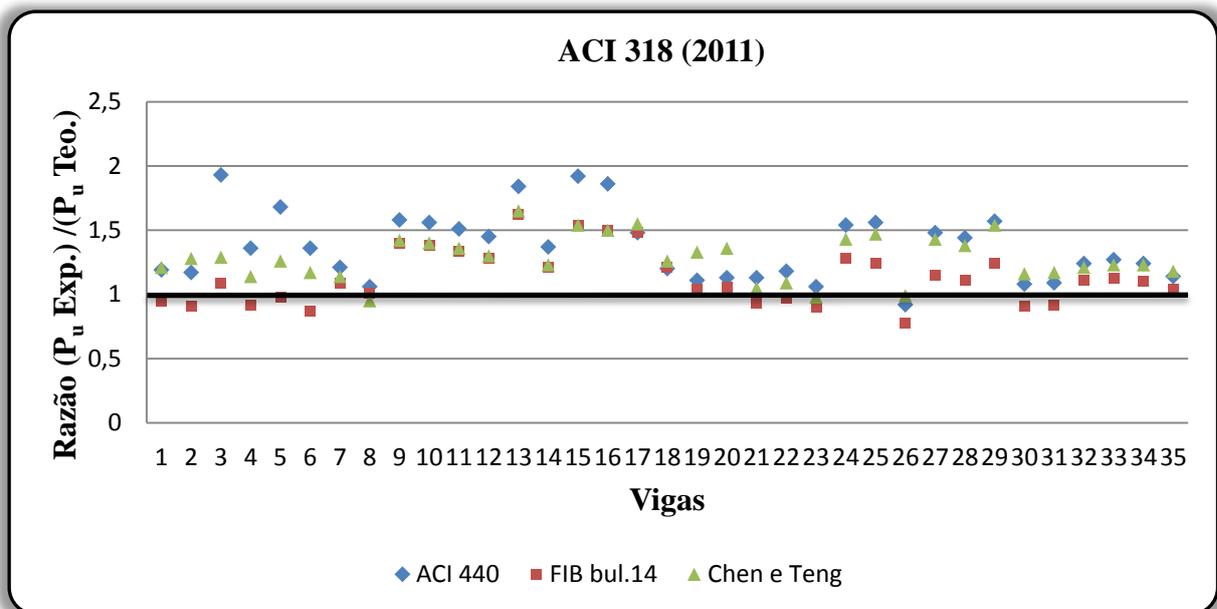


Gráfico 4.6: Variação da razão Exp./Teo. base com ACI 318 (2011) para as vigas com reforço em “U” e em “L” sem ancoragem.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o ACI 318 (2011) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, obteve-se as menores variações da ordem de 14%.
- O ACI 440.2R (2008) mostra a maior variação (19%) nos resultados obtidos, tendendo a subestimar a capacidade resistente das vigas ensaiadas.
- As maiores variações de subestimação das normativas com este tipo de reforço e com base no ACI 318 (2011) apresentam-se para as vigas de seção transversal retangular nove (9) a 18 correspondentes aos estudos de Galvez (2003) e Beber (2003). O comportamento dos resultados é similar tendendo a subestimar a capacidade resistente das vigas, se comparadas com os dados experimentais e evidencia o mesmo comportamento que com a obtenção dos resultados com base na ABNT NBR 6118:2014.
- Os resultados obtidos com a CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) mostram uma melhor aproximação dos valores calculados para as vigas com seção transversal “T”.

4.4.3. Cálculo base com Zsutty (1968)

A Tabela 4.7 mostra os resultados comparativos calculados pelo Zsutty (1968), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto " V_c " e o aço " V_s " com os valores da parcela do reforço " V_f " calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.4 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em "U" e em "L" sem ancoragem.

Tabela 4.7: Comparação dos resultados obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” e em “L” sem ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | Zsutty (1968) | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | |
| 1 | V2 | 275,60 | 285,15 | 0,97 | 342,36 | 0,81 | 281,99 | 0,98 |
| 2 | V3 | 320,50 | 326,64 | 0,98 | 407,55 | 0,79 | 303,44 | 1,06 |
| 3 | V5 | 403,00 | 370,82 | 1,09 | 421,75 | 0,96 | 364,69 | 1,11 |
| 4 | V6 | 402,80 | 458,76 | 0,88 | 488,65 | 0,82 | 405,09 | 0,99 |
| 5 | V7 | 402,60 | 412,31 | 1,02 | 484,35 | 0,87 | 385,62 | 1,09 |
| 6 | V8 | 395,30 | 451,66 | 0,88 | 508,69 | 0,78 | 391,13 | 1,01 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V4 | 277,00 | 260,77 | 1,06 | 285,84 | 0,97 | 275,75 | 1,00 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 8 | V2G2 | 175,00 | 200,52 | 0,87 | 209,36 | 0,84 | 219,08 | 0,80 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 9 | V10A | 214,97 | 176,40 | 1,22 | 194,46 | 1,11 | 191,54 | 1,12 |
| 10 | V10B | 211,98 | 176,40 | 1,20 | 194,46 | 1,09 | 191,54 | 1,11 |
| 11 | V17A | 205,57 | 176,40 | 1,17 | 194,46 | 1,06 | 191,54 | 1,07 |
| 12 | V11A | 196,85 | 176,40 | 1,12 | 194,46 | 1,01 | 191,54 | 1,03 |
| 13 | V11B | 249,60 | 176,40 | 1,41 | 194,46 | 1,28 | 191,54 | 1,30 |
| 14 | V17B | 185,86 | 176,40 | 1,05 | 194,46 | 0,96 | 191,54 | 0,97 |
| 15 | V19A | 236,83 | 164,12 | 1,44 | 194,47 | 1,22 | 193,85 | 1,22 |
| 16 | V19B | 230,26 | 164,12 | 1,40 | 194,47 | 1,18 | 193,85 | 1,19 |
| 17 | V15B | 276,74 | 228,01 | 1,21 | 226,90 | 1,22 | 219,19 | 1,26 |
| 18 | V16B | 224,85 | 228,01 | 0,99 | 226,90 | 0,99 | 219,19 | 1,03 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | |
| 19 | BT2 | 310,00 | 323,04 | 0,96 | 341,73 | 0,91 | 277,13 | 1,12 |
| 20 | BT3 | 315,00 | 323,04 | 0,98 | 341,73 | 0,92 | 277,13 | 1,14 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | |
| 21 | V2 | 165,10 | 166,52 | 0,99 | 197,57 | 0,84 | 177,18 | 0,93 |
| 22 | V3 | 163,98 | 158,80 | 1,03 | 189,55 | 0,87 | 169,83 | 0,97 |
| 23 | V4 | 138,08 | 149,83 | 0,92 | 172,97 | 0,80 | 160,16 | 0,86 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | |
| 24 | S0-0.12R | 182,60 | 165,01 | 1,11 | 188,88 | 0,97 | 173,78 | 1,05 |
| 25 | S0-0.17R1 | 203,10 | 176,55 | 1,15 | 210,85 | 0,96 | 184,27 | 1,10 |
| 26 | S0-0.17R2 | 154,70 | 214,44 | 0,72 | 246,08 | 0,63 | 203,16 | 0,76 |
| 27 | S0-0.20R1 | 204,90 | 184,56 | 1,11 | 224,81 | 0,91 | 190,15 | 1,08 |
| 28 | S0-0.20R2 | 197,90 | 184,13 | 1,07 | 224,45 | 0,88 | 189,86 | 1,04 |
| 29 | S0-0.23R | 227,30 | 191,71 | 1,19 | 230,47 | 0,99 | 194,50 | 1,17 |
| 30 | S0-0.33R | 181,20 | 214,44 | 0,84 | 246,08 | 0,74 | 203,16 | 0,89 |
| 31 | S0-0.66R | 183,80 | 214,44 | 0,86 | 246,08 | 0,75 | 203,16 | 0,90 |
| 32 | S1-0.17R1 | 365,90 | 340,50 | 1,07 | 374,81 | 0,98 | 348,22 | 1,05 |
| 33 | S1-0.17R2 | 372,50 | 340,50 | 1,09 | 374,81 | 0,99 | 348,22 | 1,07 |
| 34 | S1-0.23R | 383,40 | 355,66 | 1,08 | 394,43 | 0,97 | 358,45 | 1,07 |
| 35 | S1-0.33R | 378,30 | 378,40 | 1,00 | 410,03 | 0,92 | 367,12 | 1,03 |
| | | | Media | 1,06 | Media | 0,94 | Media | 1,04 |
| | | | Desvio padrão | 0,16 | Desvio padrão | 0,15 | Desvio padrão | 0,12 |
| | | | CV (%) | 15,13 | CV (%) | 15,57 | CV (%) | 11,25 |

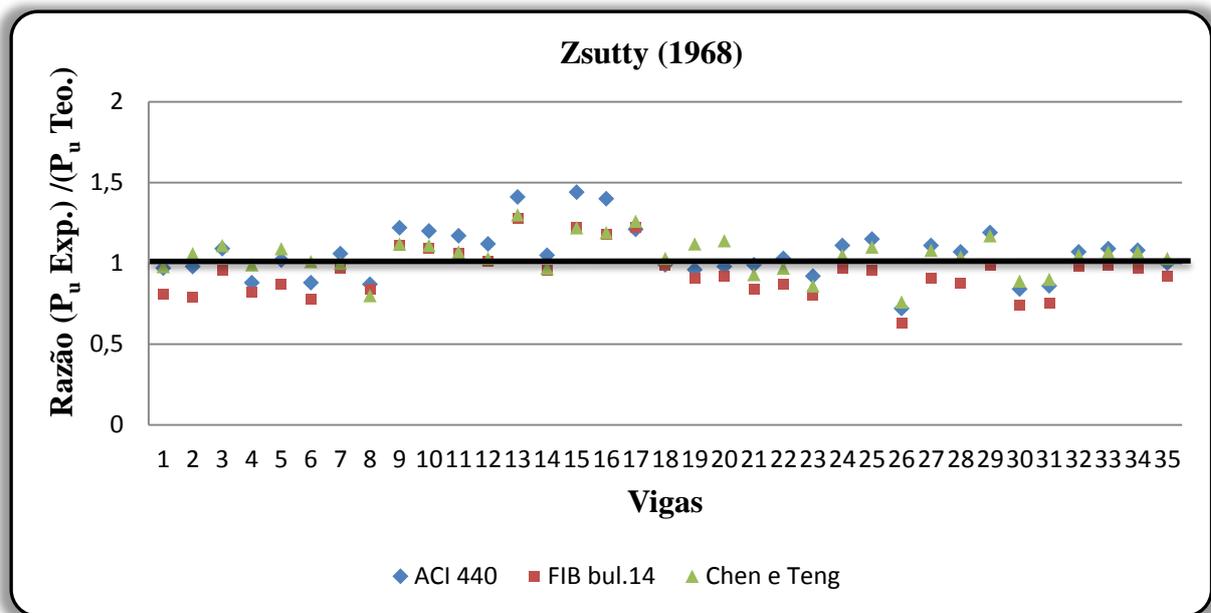


Gráfico 4.7: Variação da razão Exp./Teo. base com Zsutty (1968) para as vigas com reforço em “U” e em “L” sem ancoragem.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o Zsutty (1968) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações da ordem de 4%.
- O emprego da CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) apresentou uma previsão muito arriscada com valores da ordem de 6% e coeficiente de variação de 16%. Superestimando na maioria dos estudos a capacidade resistente das vigas.
- O ACI 440.2R (2008) é o modelo mais conservador com 6% em média e coeficiente de variação na ordem de 15% refletido nas vigas de seção retangular dos estudos analisados.

4.5. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC EM “U” COM ANCORAGEM

Conhecendo que um dos principais problemas que apresentam os reforços com a fibra e falha por descolagem, alguns dos estudos utilizaram técnicas específicas para garantir a ancoragem dos tecidos de fibra de carbono, principalmente na ligação alma/mesa para as vigas com seção transversal “T”.

Considera-se uma ancoragem efetiva sempre que garanta a colagem do reforço da superfície de concreto e possibilite um alcance maior de tensões nas fibras.

No prognóstico da influência da ancoragem nos reforços com fibra foram computadas 20 vigas de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC somente na alma da viga em forma de “U” com ancoragem de prevenção de descolamento. As seis (6) vigas correspondentes ao experimento de Altin et. al (2010) não foram empregadas nas comparações pelo fato de apresentar rupturas na flexão.

A comparação das cargas últimas no laboratório com as calculadas pelas normativas e as prescrições dos pesquisadores foi realizada utilizando os valores totais de capacidade de carga ao cisalhamento.

4.5.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)

A Tabela 4.8 mostra os resultados comparativos calculados pela ABNT NBR 6118:2014, para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.8 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. nos valores obtidos com a ABNT NBR 6118:2014 combinados com ACI 440.2R (2008), CEB-FIB-*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

Tabela 4.8: Comparação dos resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | NBR 6118 | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | |
| 1 | V4 | 420,00 | 494,19 | 0,85 | 519,01 | 0,81 | 410,58 | 1,02 |
| 2 | V7 | 491,00 | 353,40 | 1,39 | 411,53 | 1,19 | 350,68 | 1,40 |
| 3 | V8 | 510,00 | 457,62 | 1,11 | 481,60 | 1,06 | 392,87 | 1,30 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 4 | V2 | 295,00 | 266,68 | 1,11 | 311,73 | 0,95 | 269,43 | 1,09 |
| 5 | V3 | 315,00 | 266,68 | 1,18 | 311,73 | 1,01 | 269,43 | 1,17 |
| 6 | V4 | 300,00 | 318,02 | 0,94 | 365,69 | 0,82 | 302,381 | 0,99 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V5 | 323,00 | 315,89 | 1,02 | 338,46 | 0,95 | 308,37 | 1,05 |
| 8 | V6 | 298,46 | 314,74 | 0,95 | 337,61 | 0,88 | 307,49 | 0,97 |
| Spagnolo <i>et al.</i> (2013) | | | | | | | | |
| 9 | VI-1 | 552,79 | 402,65 | 1,37 | 448,22 | 1,23 | 422,72 | 1,31 |
| 10 | VI-2 | 586,65 | 464,59 | 1,26 | 518,42 | 1,13 | 451,48 | 1,30 |
| 11 | VI-3 | 590,13 | 507,11 | 1,16 | 555,38 | 1,06 | 473,29 | 1,25 |
| 12 | VII-1 | 433,34 | 324,83 | 1,33 | 370,40 | 1,17 | 344,55 | 1,26 |
| 13 | VII-2 | 466,57 | 388,70 | 1,20 | 442,53 | 1,05 | 375,59 | 1,24 |
| 14 | VII-3 | 416,3 | 431,22 | 0,97 | 479,49 | 0,87 | 397,39 | 1,05 |
| | | | Media | 1,13 | Media | 1,01 | Media | 1,17 |
| | | | Desvio padrão | 0,17 | Desvio padrão | 0,14 | Desvio padrão | 0,14 |
| | | | CV (%) | 15,10 | CV (%) | 13,68 | CV (%) | 11,90 |

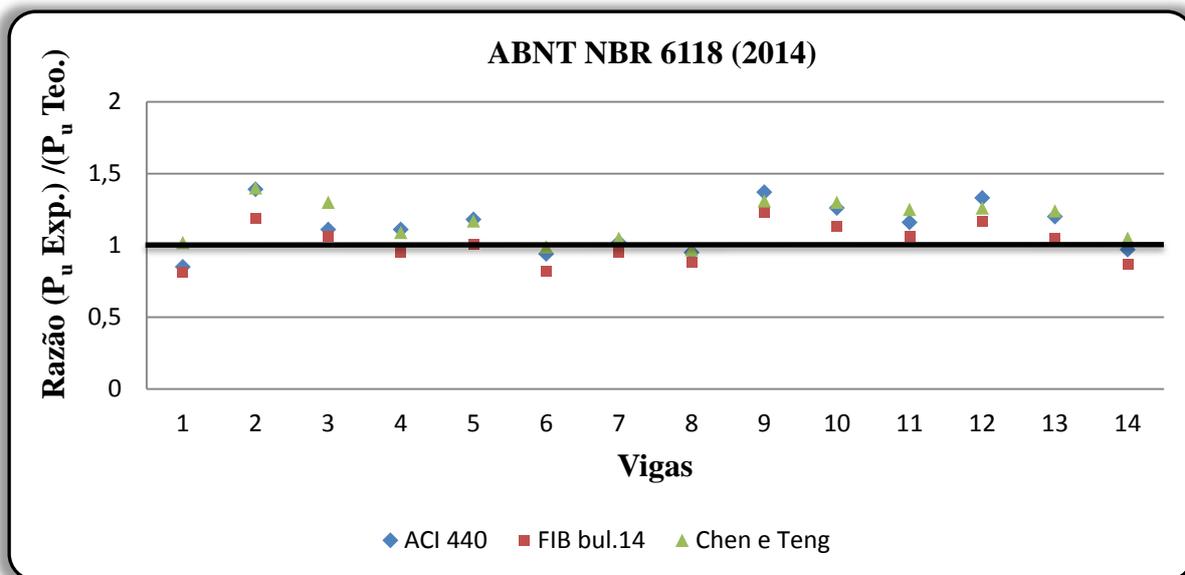


Gráfico 4.8: Variação da razão Exp./Teo. base com ABNT NBR 6118 (2014) para as vigas com reforço em “U” com ancoragem.

Resultados da análise:

- Devido as diferentes técnicas adotadas para ancoragem das vigas fez-se complexas a união dos estudos experimentais em um só; mesmo assim foi possível realizar as comparações e chegar às conclusões.
- Utilizando como base a ABNT NBR 6118:2014 para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações da CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações da ordem de 1% em média.
- Em quase todas as vigas evidenciou-se um aumento da capacidade resistente mostrando a efetividade da técnica de ancoragem, mas quando comparadas com os valores dos reforços sem ancoragem mostrados nos itens anteriores, os fatores de comparação não aumentaram, sendo que os métodos preveem capacidades de carga última mais aproximada com os resultados experimentais.

4.5.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)

A Tabela 4.9 mostra os resultados comparativos calculados pelo ACI 318 (2011), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do

reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.9 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

Tabela 4.9: Comparação dos resultados obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | ACI 318 | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | |
| 1 | V4 | 420,00 | 466,83 | 0,90 | 491,65 | 0,85 | 383,22 | 1,10 |
| 2 | V7 | 491,00 | 324,17 | 1,51 | 382,30 | 1,28 | 321,45 | 1,53 |
| 3 | V8 | 510,00 | 428,39 | 1,19 | 452,37 | 1,13 | 363,64 | 1,40 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 4 | V2 | 295,00 | 267,20 | 1,10 | 312,26 | 0,94 | 269,96 | 1,09 |
| 5 | V3 | 315,00 | 267,20 | 1,18 | 312,26 | 1,01 | 269,96 | 1,17 |
| 6 | V4 | 300,00 | 318,54 | 0,94 | 366,22 | 0,82 | 302,83 | 0,99 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V5 | 323,00 | 279,47 | 1,16 | 302,04 | 1,07 | 271,95 | 1,19 |
| 8 | V6 | 298,46 | 278,66 | 1,07 | 301,53 | 0,99 | 271,42 | 1,10 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | |
| 9 | VI-1 | 552,79 | 371,96 | 1,49 | 417,53 | 1,32 | 392,04 | 1,41 |
| 10 | VI-2 | 586,65 | 433,91 | 1,35 | 487,73 | 1,20 | 420,79 | 1,39 |
| 11 | VI-3 | 590,13 | 475,72 | 1,24 | 523,99 | 1,13 | 441,90 | 1,34 |
| 12 | VII-1 | 433,34 | 286,69 | 1,51 | 332,26 | 1,30 | 306,41 | 1,41 |
| 13 | VII-2 | 466,57 | 349,58 | 1,33 | 403,41 | 1,16 | 336,47 | 1,39 |
| 14 | VII-3 | 416,3 | 391,40 | 1,06 | 439,67 | 0,95 | 357,58 | 1,16 |
| | | | Media | 1,22 | Media | 1,08 | Media | 1,26 |
| | | | Desvio padrão | 0,20 | Desvio padrão | 0,16 | Desvio padrão | 0,17 |
| | | | CV (%) | 16,43 | CV (%) | 15,05 | CV (%) | 13,08 |

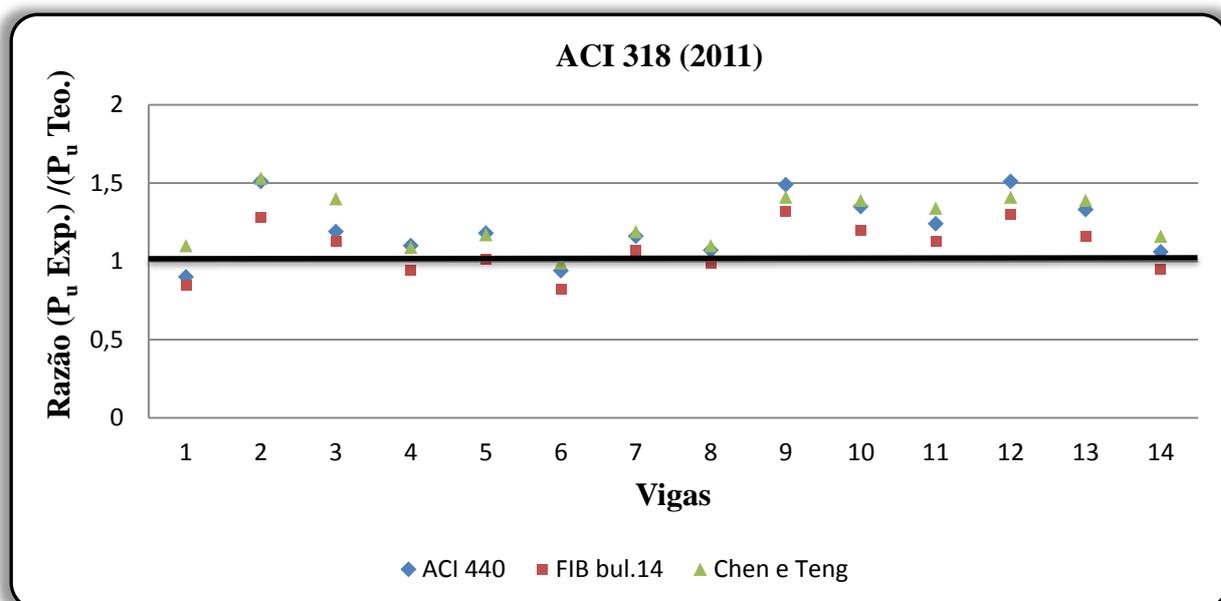


Gráfico 4.9: Variação da razão Exp./Teo. base com ACI 318 (2011) para as vigas com reforço em “U” com ancoragem.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o ACI 318 (2011) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e aço ao cisalhamento, de conjunto com as formulações da CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações da ordem de 8% em média.
- Os valores obtidos aplicando o ACI 318 (2011) como base, mostram-se mais distantes dos resultados experimentais se comparados com os obtidos quando aplicada a ABNT NBR 6118:2014, o que comprova que a formulação do ACI subestima a capacidade resistente última das vigas.
- O emprego das formulações de Chen e Teng (2003) apesar de apresentarem as menores variações, na ordem de 13%, encontra-se subestimado de igual maneira a capacidade resistente última das vigas.

4.5.3. Cálculo base com Zsutty (1968)

A Tabela 4.10 mostra os resultados comparativos calculados pelo Zsutty (1968), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.10 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

Tabela 4.10: Comparação dos resultados obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento em “U” com ancoragem.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | Zsutty | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | |
| 1 | V4 | 420,00 | 520,39 | 0,81 | 545,21 | 0,77 | 436,78 | 0,96 |
| 2 | V7 | 491,00 | 377,89 | 1,30 | 436,02 | 1,13 | 375,17 | 1,31 |
| 3 | V8 | 510,00 | 482,11 | 1,06 | 506,09 | 1,01 | 417,36 | 1,22 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 4 | V2 | 295,00 | 316,11 | 0,93 | 361,17 | 0,82 | 318,87 | 0,93 |
| 5 | V3 | 315,00 | 316,11 | 1,00 | 361,17 | 0,87 | 318,87 | 0,99 |
| 6 | V4 | 300,00 | 367,46 | 0,82 | 415,14 | 0,72 | 351,75 | 0,85 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | |
| 7 | V5 | 323,00 | 311,56 | 1,04 | 334,13 | 0,97 | 304,04 | 1,06 |
| 8 | V6 | 298,46 | 310,77 | 0,96 | 333,63 | 0,89 | 303,53 | 0,98 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | |
| 9 | VI-1 | 552,79 | 425,28 | 1,30 | 470,86 | 1,17 | 445,34 | 1,24 |
| 10 | VI-2 | 586,65 | 487,23 | 1,20 | 541,05 | 1,08 | 474,11 | 1,24 |
| 11 | VI-3 | 590,13 | 529,07 | 1,12 | 577,34 | 1,02 | 495,25 | 1,19 |
| 12 | VII-1 | 433,34 | 339,96 | 1,27 | 385,54 | 1,12 | 359,69 | 1,20 |
| 13 | VII-2 | 466,57 | 402,90 | 1,16 | 456,73 | 1,02 | 389,79 | 1,20 |
| 14 | VII-3 | 416,3 | 444,75 | 0,94 | 493,02 | 0,84 | 410,93 | 1,01 |
| | | | Media | 1,06 | Media | 0,96 | Media | 1,10 |
| | | | Desvio padrão | 0,17 | Desvio padrão | 0,14 | Desvio padrão | 0,14 |
| | | | CV (%) | 15,71 | CV (%) | 14,83 | CV (%) | 13,16 |

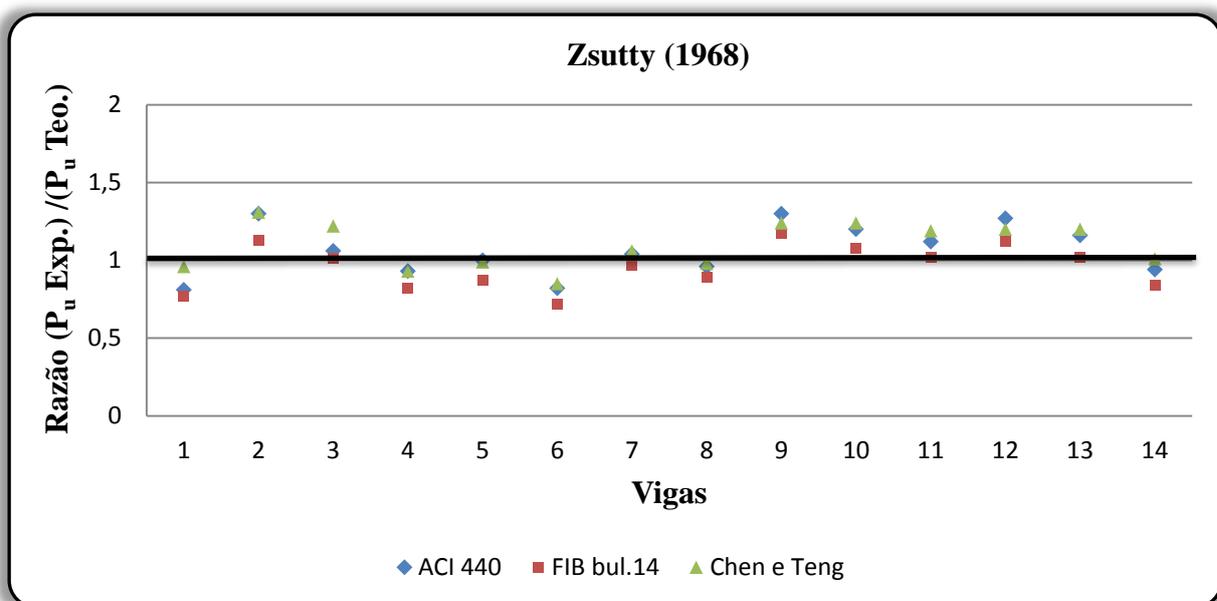


Gráfico 4.10: Variação da razão Exp./Teo. base com Zsutty (1968) para as vigas com reforço em “U” com ancoragem.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o Zsutty (1968) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento, do conjunto com as formulações do ACI 440.2R (2008), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações, na ordem de 13% em média.
- As previsões obtidas pela CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) apresentam uma tendência maior de superestimar a capacidade resistente última das vigas, com valores em média na ordem de 4%.

4.6. VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM FAIXAS DE PRFC COM ENVOLVIMENTO TOTAL DA ALMA

O reforço com envolvimento completo da alma é considerado o mais complexo e trabalhoso de executar em obra, pelo fato que na realidade as vigas não se encontram isoladas, sendo que formam parte do conjunto laje-viga, necessitando-se furar as lajes para poder fazer o reforço de maneira correta.

Foram analisadas 13 vigas reforçadas ao cisalhamento com faixas de PRFC com envolvimento total da alma da viga, sendo que os resultados de seis (6) delas correspondem

com os estudos de Silva Filho (2001) e Beber (2003), estas não puderam ser comparados pelo fato que a ruptura ocorrida foi por flexão.

A comparação das cargas últimas no laboratório com as calculadas pelas normativas e as prescrições dos pesquisadores foi realizada utilizando os valores totais de capacidade de carga ao cisalhamento.

4.6.1. Cálculo base com ABNT NBR 6118 (2014)

A Tabela 4.11 mostra os resultados comparativos calculados pela ABNT NBR 6118:2014, para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.11 apresenta-se a variação da razão Exp./Teó. dos valores obtidos com a ABNT NBR 6118:2014 combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

Tabela 4.11: Comparação dos resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2014) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | NBR 6118 | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V6 | 650 | 387,33 | 1,68 | 435,32 | 1,49 | 588,51 | 1,10 |
| 2 | V7 | 788 | 565,83 | 1,39 | 676,22 | 1,17 | 998,19 | 0,79 |
| 3 | V8 | 612 | 389,65 | 1,57 | 437,69 | 1,40 | 600,47 | 1,02 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 4 | V3G2 | 232 | 209,25 | 1,11 | 218,09 | 1,06 | 228,93 | 1,01 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 5 | V12A | 232,71 | 150,38 | 1,55 | 168,44 | 1,38 | 221,65 | 1,05 |
| 6 | V18A | 254,57 | 150,38 | 1,69 | 168,44 | 1,51 | 221,65 | 1,15 |
| 7 | V20A | 280,24 | 150,38 | 1,86 | 168,44 | 1,66 | 221,65 | 1,26 |
| | | | Media | 1,63 | Media | 1,44 | Media | 1,07 |
| | | | Desvio padrão | 0,27 | Desvio padrão | 0,21 | Desvio padrão | 0,13 |
| | | | CV (%) | 16,45 | CV (%) | 14,75 | CV (%) | 12,41 |

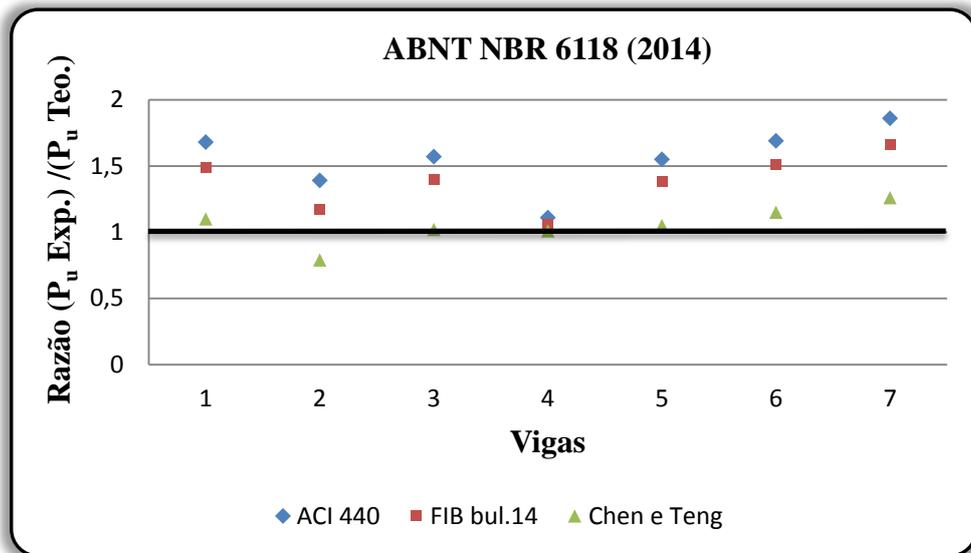


Gráfico 4.11: Variação da razão Exp./Teo. base com ABNT NBR 6118 (2014) para as vigas com envolvimento total do reforço.

Resultados da análise:

- O reforço com envolvimento completo da alma aumenta a capacidade resistente das vigas modificando em ocasiões o modo de ruptura, passando de experimentar uma ruptura frágil a experimentar uma ruptura de tipo dúctil, que é sempre o desejado.
- Utilizando como base a ABNT NBR 6118:2014 para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento, em conjunto com as formulações do Chen e Teng (2003), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter menores variações, na ordem de 12%.
- No caso de envolvimento completo da alma das vigas os resultados obtidos pela aplicação do ACI 440.2R (2008) e CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), apresentam em média variações na ordem de 63% e 44% respectivamente. Os métodos tendem a subestimar a capacidade resistente última das vigas, sendo o ACI o método que mais subestima a capacidade.
- Mesmo que este tipo de reforço aumente a capacidade resistente última das vigas, a relação entre quantidade de fibra e resistência não é proporcional, demonstrando que existe uma longitude ótima de ancoragem. Maiores quantidades de fibra só aumentam o custo da obra.

4.6.2. Cálculo base com ACI 318 (2011)

A Tabela 4.12 mostra os resultados comparativos calculados pelo ACI 318 (2011), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.12 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

Tabela 4.12: Comparação dos resultados obtidos com o ACI 318 (2011) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | ACI 318 | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V6 | 650,00 | 366,72 | 1,77 | 414,71 | 1,57 | 567,89 | 1,14 |
| 2 | V7 | 788,00 | 545,09 | 1,45 | 655,48 | 1,20 | 977,45 | 0,81 |
| 3 | V8 | 612,00 | 367,94 | 1,66 | 415,97 | 1,47 | 578,75 | 1,06 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 4 | V3G2 | 232,00 | 168,41 | 1,38 | 177,25 | 1,31 | 188,10 | 1,23 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 5 | V12A | 232,71 | 135,86 | 1,71 | 153,92 | 1,51 | 207,13 | 1,12 |
| 6 | V18A | 254,57 | 135,86 | 1,87 | 153,92 | 1,65 | 207,13 | 1,23 |
| 7 | V20A | 280,24 | 135,86 | 2,06 | 153,92 | 1,82 | 207,13 | 1,35 |
| | | | Media | 1,78 | Media | 1,55 | Media | 1,14 |
| | | | Desvio padrão | 0,26 | Desvio padrão | 0,21 | Desvio padrão | 0,15 |
| | | | CV (%) | 14,83 | CV (%) | 13,41 | CV (%) | 13,43 |

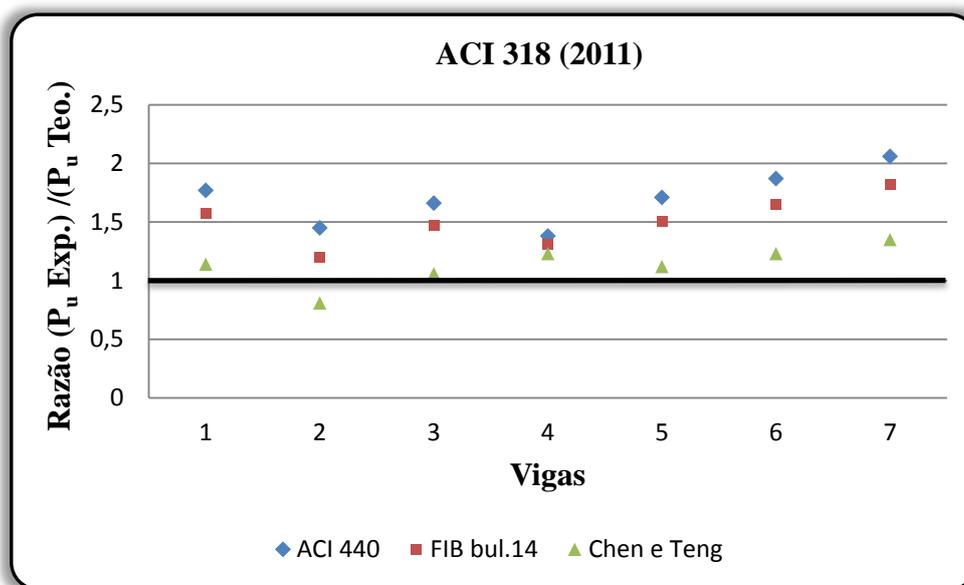


Gráfico 4.12: Variação da razão Exp./Teo. base com ACI 318 (2011) para as vigas com envolvimento total do reforço.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o ACI 318 (2011) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento, em conjunto com as formulações do Chen e Teng (2003), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter menores variações, na ordem de 14% em média
- Os resultados obtidos aplicando como base o ACI 318 (2011) evidenciam o incremento da subestimação dos métodos na determinação da resistência última das vigas se comparados com os resultados obtidos pela ABNT NBR 6118:2014.
- A maior subestimação é obtida pelo método do ACI 440.2R (2008) com média de 78%.

4.6.3. Cálculo base com Zsutty (1968)

A Tabela 4.13 mostra os resultados comparativos calculados pelo Zsutty (1968), para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto “ V_c ” e o aço “ V_s ” com os valores da parcela do reforço “ V_f ” calculadas pelas normativas ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003).

No Gráfico 4.13 apresenta-se a variação da razão Exp./Teo. dos valores obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001), e os

estudos dos pesquisadores Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

Tabela 4.13: Comparação dos resultados obtidos com o Zsutty (1968) combinados com ACI 440.2R (2008), CEB–FIB–*Bulletin* 14 (2001) e Chen e Teng (2003), para vigas com reforço ao cisalhamento com envolvimento total da alma.

| Viga | Viga segundo o experim. | Carga experim. de ruptura (P_u) (kN) | Zsutty | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | | | ACI 440 | | FIB bul. 14 | | Chen e Teng | |
| | | | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. | Teór. | Exp/Teór. |
| Araújo (2002) | | | | | | | | |
| 1 | V6 | 650,00 | 437,55 | 1,49 | 485,54 | 1,34 | 638,73 | 1,02 |
| 2 | V7 | 788,00 | 615,96 | 1,28 | 726,34 | 1,08 | 1048,32 | 0,75 |
| 3 | V8 | 612,00 | 439,03 | 1,39 | 487,06 | 1,26 | 649,85 | 0,94 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | |
| 4 | V3G2 | 232,00 | 204,29 | 1,14 | 213,13 | 1,09 | 223,98 | 1,04 |
| Beber (2003) | | | | | | | | |
| 5 | V12A | 232,71 | 176,40 | 1,32 | 194,46 | 1,20 | 247,67 | 0,94 |
| 6 | V18A | 254,57 | 176,40 | 1,44 | 194,46 | 1,31 | 247,67 | 1,03 |
| 7 | V20A | 280,24 | 176,40 | 1,59 | 194,46 | 1,44 | 247,67 | 1,13 |
| | | | Media | 1,37 | Media | 1,21 | Media | 0,99 |
| | | | Desvio padrão | 0,22 | Desvio padrão | 0,20 | Desvio padrão | 0,11 |
| | | | CV (%) | 16,43 | CV (%) | 16,66 | CV (%) | 11,06 |

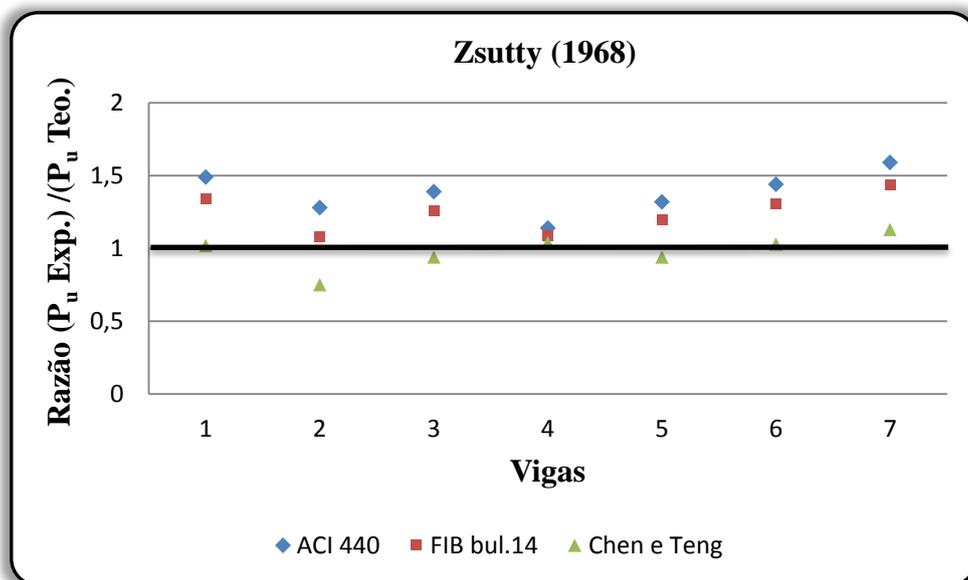


Gráfico 4.13: Variação da razão Exp./Teo. base com Zsutty (1968) para as vigas com envolvimento total do reforço.

Resultados da análise:

- Utilizando como base o Zsutty (1968) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento, do conjunto com as formulações do Chen e Teng (2003), no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço, pode-se obter as menores variações na ordem de 11%. Os resultados obtidos encontram-se 1% abaixo.
- Para este tipo de reforço com envolvimento completo da alma das vigas a amostragem foi baixa, mas serviu para verificar a tendência dos métodos ao calcular a resistência da parcela que é resistida pelo reforço.
- O método do ACI 440.2R (2008) continua sendo o que mais subestima a capacidade resistente última das vigas analisadas.

4.7. MODO DE RUPTURA DAS VIGAS

A previsão do modo de ruptura de uma peça estrutural é fundamental, principalmente se a ruptura for a flexão ou ao cisalhamento. Na análise de uma viga que precisa ser reforçada, já pela mudança na funcionalidade como por deterioração, é importante levar a peça à ruptura por flexão, evitando a ruptura abrupta por cisalhamento, mediante o reforço da mesma que eleva a capacidade resistente.

Foram selecionados os métodos de previsão que mais se adequaram para cada tipo de reforço, obtido nas análises feitas anteriormente, sendo que para o dimensionamento das parcelas de concreto e aço o Zsutty (1968) foi o mais aproximado com o experimental; obteve-se a carga de ruptura a flexão de cada viga e comparou-se com a carga de ruptura ao cisalhamento previsto, verificando se a previsão do modo de ruptura corresponde com as ocorridas nas vigas no laboratório.

Caso exista diferença entre o modo de ruptura previsto e o experimental deve-se analisar as seguintes condições:

- O caso em que a previsão é de ruptura ao cisalhamento e ocorre ruptura a flexão é bem melhor que o caso contrário de ocorrência de ruptura por cisalhamento.
- A diferença de cargas de ruptura entre cisalhamento e flexão pode ser tão pequena que se enquadre dentro do coeficiente de variação dos métodos.

- Fazer uma análise de qual seria o método menos conservador empregando o estudo dos fatores de previsão.

Na Tabela 4.14 mostra-se os resultados das previsões do modo de ruptura teórico obtido pelo Zsutty (1968) (método mais aproximado com o experimental) e experimental das vigas estudadas.

Tabela 4.14: Comparação da previsão do modo de ruptura teórico e experimental, para vigas sem reforço.

| Viga | Vigas segundo o experim. | Carga exper. de ruptura (kN) | Carga teórica por Zsutty (kN) | Carga teórica de resistência a flexão (kN) | Modo de ruptura teórico | Modo de ruptura experimental | Razão Exp./Teór (fator de previsão) |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | |
| 1 | V1REF | 251 | 184,97 | 566,74 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,36 |
| 2 | V4REF | 368,4 | 270,63 | 562,49 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,36 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | |
| 3 | V1REF | 360 | 272,93 | 582,17 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,32 |
| Araújo (2002) | | | | | | | |
| 4 | V1REF | 260 | 240,99 | 634,91 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,08 |
| 5 | V5REF | 372 | 301,04 | 945,89 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,24 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | |
| 6 | V1REF | 234,06 | 202,41 | 355,79 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,16 |
| Beber (2003) | | | | | | | |
| 7 | V8AREF | 114,7 | 124,79 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,92 |
| 8 | V8BREF | 112,98 | 124,78 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,90 |
| Galvez (2003) | | | | | | | |
| 9 | VTG1 | 95 | 120,03 | 121,70 | - | Cisalhamento | 0,79 |
| 10 | VTG2 | 240,1 | 171,56 | 311,69 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,87 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | |
| 11 | V1REF | 407,22 | 359,12 | 566,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,13 |
| 12 | V2REF | 302,5 | 276,72 | 567,46 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,09 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | |
| 13 | BT1REF | 180 | 162,93 | 368,27 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,10 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | |
| 14 | TR30C1REF | 149,4 | 108,05 | 308,09 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,38 |
| 15 | TR30D1REF | 323 | 268,87 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,20 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | |
| 16 | R1 | 248,1 | 306,56 | 711,32 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,81 |
| Altın et. al (2010) | | | | | | | |
| 17 | V1REF | 99,02 | 123,81 | 163,19 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,79 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | |
| 18 | S0-0.0R | 122,7 | 138,65 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,88 |
| 19 | S1-0.0R | 350,6 | 302,61 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,16 |
| | | | | | | Media | 1,08 |
| | | | | | | Desvio padrão | 0,20 |
| | | | | | | CV (%) | 18,61 |

Para a variante de colocação do reforço somente nas laterais a combinação de formulações que melhor se adequam aos resultados obtidos experimentalmente é Zsutty/Chen e Teng. A comparação mostra-se na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Comparação da previsão do modo de ruptura teórico e experimental, para vigas com reforço somente nas laterais.

| Vigas. | Carga exper.l de ruptura (kN) | Carga Teór para Zsutty / Chen e Teng (kN) | Carga teor. de resistência a flexão (kN) | Modo de ruptura teórico | Modo de ruptura experimental | Razão exp./teor. (fator de previsão) |
|---------------------------------------|-------------------------------|---|--|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Beber (2003) | | | | | | |
| V9A | 196,24 | 183,69 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,07 |
| V9B | 208,58 | 183,69 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,14 |
| V21A | 230,38 | 183,69 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,25 |
| V12B | 203,30 | 188,29 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,08 |
| V14B | 183,30 | 188,29 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,97 |
| V13A | 244,01 | 208,09 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,17 |
| V13B | 251,50 | 208,09 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,21 |
| V14A | 256,78 | 251,79 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,02 |
| V15A | 241,12 | 251,79 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,96 |
| V20B | 285,82 | 220,60 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,30 |
| V22B | 225,02 | 220,60 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,02 |
| V21B | 271,40 | 253,06 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,07 |
| V22A | 251,19 | 253,06 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,99 |
| Galvez (2003) | | | | | | |
| V1G1 | 134,00 | 161,30 | 117,96 | Flexão | Flexão | 1,14 |
| V2G1 | 145,00 | 194,31 | 120,15 | Flexão | Flexão | 1,21 |
| V1G2 | 241,00 | 240,27 | 311,69 | Flexão | Flexão | 0,77 |
| Täljsten (2003) | | | | | | |
| RC1 | 612,10 | 580,06 | 711,32 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,06 |
| C1 | 493,30 | 528,38 | 711,32 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,93 |
| C2 | 514,40 | 590,31 | 718,95 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,87 |
| C3 | 521,20 | 472,42 | 691,17 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,10 |
| C4 | 308,10 | - | 691,17 | Cisalhamento | Flexão | - |
| C5 | 668,60 | 646,52 | 718,95 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,03 |
| Gallardo (2002) | | | | | | |
| V2 | 212,48 | 267,27 | 356,14 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,79 |
| V3 | 257,16 | 267,73 | 356,41 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,96 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | |
| TR30C2 | 240,00 | 162,66 | 308,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,48 |
| TR30C3 | 225,60 | 186,06 | 308,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,21 |
| TR30C4 | 280,40 | 186,06 | 308,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,51 |
| TR30D10 | 386,00 | 379,81 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,02 |
| TR30D2 | 426,60 | 387,28 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,10 |
| TR30D20 | 495,00 | 387,28 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,28 |
| TR30D3 | 322,80 | 361,33 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,89 |
| TR30D4 | 417,60 | 379,81 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,10 |
| TR30D40 | 424,00 | 379,81 | 510,65 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,12 |
| | | | | | Media | 1,09 |
| | | | | | Desvio padrão | 0,17 |
| | | | | | CV (%) | 15,29 |

Para a variante de colocação do reforço em “U” e em “L” sem ancoragem a combinação de formulações que melhor se adequam aos resultados obtidos experimentalmente continua sendo Zsutty/Chen e Teng. A comparação pode ser vista na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Comparação da previsão do modo de ruptura teórico e experimental, para vigas com reforço em “U” e em “L” sem ancoragem.

| Viga segundo o experim. | Carga exper. de ruptura (kN) | Carga teor por Zsutty / Chen e Teng (kN) | Carga teor. resistência a flexão (kN) | Modo de ruptura teórico | Modo de ruptura experimental | Razão exp./teor. (fator de previsão) |
|-----------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | |
| V2 | 275,60 | 282,00 | 566,75 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,98 |
| V3 | 320,50 | 303,44 | 566,75 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,06 |
| V5 | 403,00 | 364,69 | 562,49 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,11 |
| V6 | 402,80 | 405,10 | 562,49 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,99 |
| V7 | 420,60 | 385,62 | 562,49 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,09 |
| V8 | 395,30 | 391,13 | 562,49 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,01 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | |
| V2 | 165,10 | 177,18 | 163,32 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,93 |
| V3 | 163,98 | 169,84 | 163,13 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,97 |
| V4 | 138,08 | 160,16 | 163,07 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,86 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | |
| S0-0.12R | 182,60 | 173,78 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,05 |
| S0-0.17R1 | 203,10 | 184,27 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,10 |
| S0-0.17R2 | 154,70 | 203,16 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,76 |
| S0-0.20R1 | 204,90 | 190,15 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,08 |
| S0-0.20R2 | 197,90 | 189,86 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,04 |
| S0-0.23R | 227,30 | 194,50 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,17 |
| S0-0.33R | 181,20 | 203,16 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,89 |
| S0-0.66R | 183,80 | 203,16 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,90 |
| S1-0.17R1 | 365,90 | 348,22 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,05 |
| S1-0.17R2 | 372,50 | 348,22 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,07 |
| S1-0.23R | 383,40 | 358,45 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,07 |
| S1-0.33R | 378,30 | 367,12 | 442,37 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,03 |
| Beber (2003) | | | | | | |
| V10A | 214,97 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,12 |
| V10B | 211,98 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,11 |
| V17A | 205,57 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,07 |
| V11A | 196,85 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,03 |
| V11B | 249,60 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,30 |
| V17B | 185,86 | 191,54 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,97 |
| V19A | 236,83 | 193,85 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,22 |
| V19B | 230,26 | 193,85 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,19 |
| V15B | 276,74 | 219,19 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,26 |
| V16B | 224,85 | 219,19 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,03 |
| Galvez (2003) | | | | | | |
| V2G2 | 175,00 | 219,08 | 316,33 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,80 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | |
| BT2 | 310,00 | 277,13 | 368,27 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,12 |
| BT3 | 315,00 | 277,13 | 368,27 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,14 |
| Gallardo (2002) | | | | | | |
| V4 | 276,10 | 275,75 | 356,79 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,00 |
| | | | | | Media | 1,04 |
| | | | | | Desvio padrão | 0,12 |
| | | | | | CV (%) | 11,25 |

Para a variante de colocação do reforço em “U” com ancoragem, a combinação de formulações que melhor se adequam aos resultados obtidos experimentais passa a ser Zsutty/CEB–FIB–*Bulletin* 14. A comparação é vista na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Comparação da previsão do modo de ruptura teórico e experimental, para vigas com reforço em “U” com ancoragem.

| Viga segundo o experim. | Carga exper. de ruptura (kN) | Carga teor. por Zsutty / Chen e Teng (kN) | Carga teor. de resistência a flexão (kN) | Modo de ruptura teórico | Modo de ruptura experimental | Razão exp./teor. (fator de previsão) |
|-------------------------------|------------------------------|---|--|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Silva Filho (2001) | | | | | | |
| V4 | 420 | 545,21 | 583,99 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,77 |
| V7 | 491 | 436,016 | 585,33 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,13 |
| V8 | 510 | 506,09 | 585,33 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,01 |
| Araújo (2002) | | | | | | |
| V2 | 295 | 361,17 | 631,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,82 |
| V3 | 315 | 361,17 | 631,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,87 |
| V4 | 300 | 415,13 | 631,10 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,72 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | |
| V5 | 175,36 | 196,66 | 163,06 | Flexão | Flexão | 0,89 |
| V6 | 172,62 | 189,67 | 163,19 | Flexão | Flexão | 0,91 |
| V7 | 171,26 | 173,09 | 163,13 | Flexão | Flexão | 0,99 |
| V8 | 172,72 | 162,90 | 163,19 | - | Flexão | 1,06 |
| V9 | 170,42 | 155,58 | 163,26 | Cisalhamento | Flexão | 1,10 |
| V10 | 170 | 138,52 | 162,94 | Cisalhamento | Flexão | 1,23 |
| Gallardo (2002) | | | | | | |
| V5 | 323 | 334,13 | 355,64 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,97 |
| V6 | 298,46 | 333,63 | 355,43 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,89 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | |
| VI-1 | 552,79 | 470,86 | 568,71 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,17 |
| VI-2 | 586,65 | 541,05 | 568,71 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,08 |
| VI-3 | 590,13 | 577,34 | 569,08 | - | Cisalhamento | 1,02 |
| VII-1 | 433,34 | 385,54 | 568,17 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,12 |
| VII-2 | 466,57 | 456,73 | 568,71 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,02 |
| VII-3 | 416,3 | 493,02 | 569,08 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,84 |
| | | | | | Media | 0,98 |
| | | | | | Desvio padrão | 0,14 |
| | | | | | CV (%) | 14,09 |

Para a variante de colocação do reforço envolvendo completamente a alma da viga, a combinação de formulações que melhor se adequam aos resultados obtidos experimentalmente volta a ser Zsutty/Chen e Teng. A comparação mostra-se na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Comparação da previsão do modo de ruptura teórico e experimental, para vigas com envolvimento completo da fibra.

| Viga segundo o experim. | Carga exper. de ruptura (kN) | Carga teor. por Zsutty / Chen e Teng (kN) | Carga teor. de resistência a flexão (kN) | Modo de ruptura teórico | Modo de ruptura experimental | Razão exp./teor. (fator de previsão) |
|---------------------------|------------------------------|---|--|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Silva Filho (2001) | | | | | | |
| V2 | 589,00 | 616,79 | 582,17 | Flexão | Flexão | 1,01 |
| V3 | 570,00 | 1033,34 | 582,47 | Flexão | Flexão | 0,98 |
| V5 | 579,00 | 853,20 | 585,34 | Flexão | Flexão | 0,99 |
| V6 | 573,00 | 779,82 | 586,26 | Flexão | Flexão | 0,98 |
| Araújo (2002) | | | | | | |
| V6 | 650,00 | 638,73 | 944,90 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,02 |
| V7 | 788,00 | 1048,32 | 945,15 | Flexão | Cisalhamento | 0,75 |
| V8 | 612,00 | 649,85 | 947,13 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,94 |
| Beber (2003) | | | | | | |
| V12A | 232,71 | 247,67 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 0,94 |
| V18A | 254,57 | 247,67 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,03 |
| V20A | 280,24 | 247,67 | 410,30 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,13 |
| V16A | 367,92 | 370,55 | 410,30 | Cisalhamento | Esmagamento do concreto (flexão) | 0,99 |
| V18B | 404,82 | 370,55 | 410,30 | Cisalhamento | Esmagamento do concreto (flexão) | 1,09 |
| Galvez (2003) | | | | | | |
| V3G2 | 232,00 | 223,97 | 320,53 | Cisalhamento | Cisalhamento | 1,04 |
| | | | | | Media | 0,99 |
| | | | | | Desvio padrão | 0,09 |
| | | | | | CV (%) | 9,08 |

Nas comparações feitas verificou-se que as previsões foram aceitáveis em relação ao modo de ruptura, sendo que, nos casos de não coincidência experimental e teórico, as cargas à flexão e ao cisalhamento eram bem próximas.

As principais causas das rupturas das vigas foram por cisalhamento induzidas pelo descolamento da fibra da superfície do concreto, fator que pode ser prevenido pela ancoragem da fibra sendo que nem sempre é fácil de controlar, o que comprova que o modo de previsão da ruptura das vigas reforçadas de forma matemática e muito mais complexa de determinar.

4.8. ANCORAGEM DO REFORÇO

Na aplicação do reforço ao cisalhamento com fibra em vigas, o aspecto que influencia melhor no aumento da resistência da peça é a ancoragem. A ancoragem para o reforço com fibra consiste em colocar suporte extra nos pontos onde a ligação entre o reforço e a viga seja mais fraca, sendo esta zona nas extremidades da fibra.

O fator que mais influenciou e limitou a efetividade das fibras nas vigas reforçadas foi o descolamento da fibra da superfície do concreto das vigas. O descolamento da fibra evita que o reforço atinja níveis de tensão maiores, interrompendo a efetividade do reforço. Neste caso a maioria dos descolamentos da fibra não é por causa de uma colagem defeituosa da fibra, e sim pelo fato que o concreto não suporta o acúmulo de tensões que o reforço traz para aqueles pontos de fragilidade.

As soluções adotadas fundamentalmente para evitar o descolamento do reforço nos estudos experimentais analisados foi a aplicação dos compósitos envolvendo completamente a alma das vigas, mas este tipo de reforço demonstrou que não existe uma relação direta entre a quantidade de fibra empregada no reforço e o aumento da resistência das vigas, demonstrando que existe uma longitude efetiva de ancoragem do reforço, mas garantiu que a ruptura nessas vigas não fosse por descolagem do reforço; a aplicação é complexa, sendo necessário furar a laje para a colocação do reforço.

Outra técnica adotada é a utilização de ancoragem para o reforço, mostrado nos estudos experimentais do Capítulo 3. Elas englobam desde a abertura de fissuras no extremo superior e posterior, posicionamento de barras de aço preenchidas com resina epóxi; ganchos adentrando tanto a alma como a mesa das vigas mediante furos pré-realizados, aplicando resina epóxi dentro dos furos; outra forma de ancoragem foi colocar faixas horizontais na superfície superior do reforço. Para os tipos de ancoragem, o objetivo foi descobrir qual é a técnica mais efetiva. Os resultados do incremento de cada reforço com sua ancoragem aparecem na Tabela 4. 19.

Tabela 4.19: Porcentagem de incremento da resistência última produto a ancoragem das vigas.

| Vigas | Carga máxima de ruptura (kN) | Modo de ruptura | Porcentagem de incremento (%) |
|-------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|
| Silva Filho (2001) | | | |
| V1REF | 360,00 | Cisalhamento | - |
| V4* | 420,00 | Descolamento do reforço | 16,67 |
| V7 | 491,00 | Descolamento do reforço | 36,39 |
| V8 | 510,00 | Descolamento do reforço | 41,67 |
| Araújo (2002) | | | |
| V1REF | 260,00 | Cisalhamento | - |
| V2 | 295,00 | Descolamento do reforço | 13,46 |
| V3 | 315,00 | Descolamento do reforço | 21,15 |
| V4 | 300,00 | Descolamento do reforço | 15,38 |
| Altin et. al (2010) | | | |
| V4 | 138,08 | Descolamento do reforço | - |
| V5 | 175,36 | Flexão | 27,00 |
| V6 | 172,62 | Flexão | 25,01 |
| V7 | 171,26 | Flexão | 24,03 |
| V8 | 172,72 | Flexão | 25,09 |
| V9 | 170,42 | Flexão | 23,42 |
| V10 | 170,00 | Flexão | 23,12 |
| Gallardo (2002) | | | |
| V1REF | 234,06 | Cisalhamento | - |
| V5 | 323,00 | Descolamento do reforço | 37,99 |
| V6 | 298,46 | Descolamento do reforço | 27,51 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | |
| V1REF | 407,22 | Cisalhamento | - |
| VI-1 | 552,79 | Tração diagonal com descolamento do reforço | 35,75 |
| VI-2 | 586,65 | Tração diagonal com descolamento do reforço | 44,06 |
| VI-3 | 590,13 | Tração diagonal com descolamento do reforço | 44,92 |

Tomando como base a Tabela anterior, pode-se concluir que para os tipos de reforço empregados o que possui mais incremento na resistência das vigas foi o método de Spagnolo *et al.* (2013), com aumentos de até 45%; mas para saber com maior precisão os níveis dos incrementos e poder fazer comparações com maior precisão, necessita-se fazer um estudo experimental focado na ancoragem, mantendo as mesmas especificações físicas e mecânicas nas vigas a serem ensaiadas.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de dimensionamento do reforço com fibra em vigas ao cisalhamento ainda tem que amadurecer, pois apesar de que seja uma técnica eficiente de reforço, existem poucas normativas que contemplam o dimensionamento em suas formulações, deixando aos comerciantes dos polímeros reforçados com fibra a escolha de como proceder. A norma brasileira também não apresenta formulações para dar resposta ao problema; mas são muitos os pesquisadores do Brasil que mediante pesquisas experimentais e numéricas tentam compreender melhor o fenômeno e propor formulações que se adequem ao comportamento da fibra colada na superfície do concreto submetida ao carregamento.

Os estudos encontrados apresentam muita diferença nos experimentos, as variações englobam desde o comprimento, seção transversal, materiais das vigas, até a forma de colocação do reforço e ancoragem.

Nesta pesquisa a análise foi feita em função da colocação do reforço, sendo apresentadas neste capítulo as principais conclusões obtidas da análise dos resultados de 12 trabalhos experimentais nacionais e estrangeiros, com 123 vigas com seção transversal retangular e “T” reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC).

Encontram-se também algumas sugestões para pesquisas futuras, relacionadas ao tema.

5.1. CONCLUSÕES

Da análise dos estudos apresentados nos capítulos anteriores e atingindo os objetivos da pesquisa pode-se concluir:

O emprego dos polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) no reforço de vigas ao cisalhamento aumenta a capacidade resistente das vigas, alcançando mudanças na forma de ruptura das vigas, passando de uma ruptura abrupta para uma ruptura dúctil. Isto acontece principalmente quando o reforço é colocado envolvendo completamente a alma da peça ou se é garantida uma boa ancoragem do reforço.

Métodos de cálculo empregados na previsão da carga de ruptura ao cisalhamento para vigas reforçadas:

- A ABNT NBR 6118:2014 não conta com formulações que possibilitem o dimensionamento do reforço com fibra, já para vigas de concreto armado os resultados teóricos se comparados com os experimentais encontram-se abaixo, em torno de 21%, sendo que a norma subestima a capacidade resistente das vigas.
- No caso do ACI 318 (2011) e ACI 440.2R (2008) as duas normas tanto para o cálculo da armadura transversal como para o dimensionamento do reforço, são as que apresentam a relação experimental/teórica mais elevadas e as maiores variações.
- O método proposto por Zsutty (1968) é o mais aproximado dos resultados experimentais. Os valores teóricos, em média, encontram-se 8% abaixo dos obtidos experimentalmente com coeficiente de variação de 18,61%.
- No caso da aplicação para o dimensionamento da fibra o emprego das formulações da CEB-FIB-Bulletin 14 (2001) é ousado pelo fato que a norma tende a superestimar a capacidade resistente das vigas, superando a carga de ruptura experimental.
- Para o caso dos modelos de Chen e Teng (2003), são os que apresentam as menores variações pelo fato de que suas formulações levam em consideração um maior número de parâmetros, mas sempre tendendo a subestimar a capacidade resistente das vigas.
- Para o caso de vigas de seção transversal “T” é recomendado fazer o dimensionamento utilizando as formulações de Chen e Teng (2003), que levam em consideração a forma da seção transversal da viga, a altura efetiva do reforço, da altura útil da viga, além de aproveitar o aporte da mesa da viga.

Forma de colocação do reforço na previsão da carga de ruptura ao cisalhamento para vigas reforçadas:

- De maneira geral as formulações que melhor aproximam os resultados experimentais dos teóricos é a junção do método de Zsutty (1968) para obter as parcelas que são resistidas pelo concreto e o aço ao cisalhamento e as formulações de Chen e Teng (2003) no dimensionamento da parcela resistida pelo reforço.
- Comprovou-se que o reforço por envolvimento completo da alma é a forma de colocação que mais aumenta a capacidade resistente das vigas, mas a relação entre quantidade de fibra e a capacidade de carga não é diretamente proporcional,

demonstrando que existe um comprimento de ancoragem máximo; este método de colocação é o mais complexo de realizar em obra.

- Quando tem presença de armadura ao cisalhamento (estribos) o melhor é colocar a fibra no meio dos estribos e não coincidindo com eles, pelo fato que a coincidência faz que o reforço fique limitado no seu aporte à capacidade resistente ao cisalhamento.
- Em quanto à quantidade de camadas de fibra a serem colocadas, é melhor colocar uma camada só que muitas camadas, sendo que as normas superestimam a capacidade resistente dos elementos reforçados com muitas camadas de fibra.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A norma brasileira ainda não conta com formulações para o dimensionamento ao cisalhamento do reforço empregando fibra de carbono, existe a necessidade de muitos outros estudos que contribuam na criação de uma metodologia de cálculo. Desta forma são apresentadas algumas sugestões que podem ser consideradas para pesquisas futuras.

- Dar continuidade neste trabalho com o acréscimo do banco de dados com um maior número de ensaios experimentais de referências nacionais e internacionais.
- Desenvolver pesquisas experimentais onde se variem os parâmetros das vigas de forma controlada, na procura de conhecer melhor o comportamento e quantificar com maior precisão o aporte das fibras no reforço ao cisalhamento.
- Desenvolver pesquisas experimentais que variem somente a forma de ancoragem, para uma melhor avaliação dos métodos de ancoragem.
- Desenvolver estudos com modelos numéricos com base nas pesquisas experimentais já realizadas com o objetivo de avaliar e fazer melhorias nas formulações existentes. A Figura 5.1 mostra um modelo numérico desenvolvido pela autora, o qual se encontra em fase de andamento.

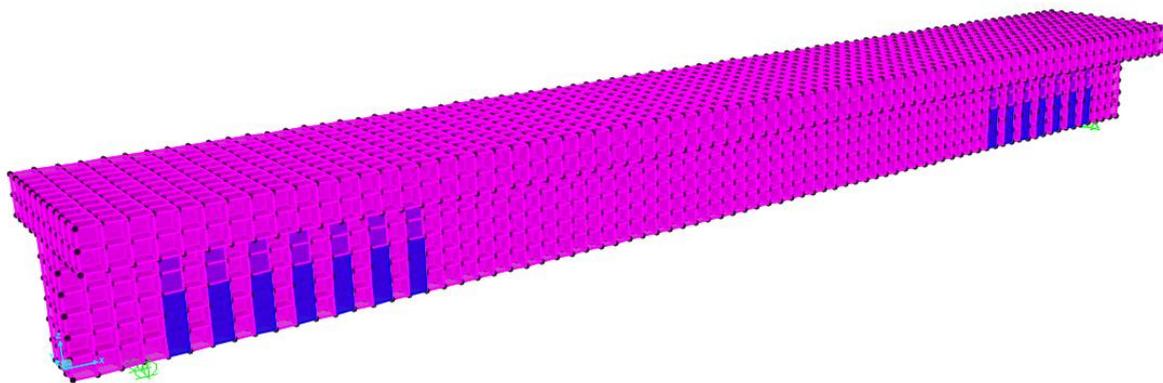


Figura 5.1: Modelo numérico de uma viga “T” reforçada com compósitos de fibra de carbono no SAP2000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 440R-2000. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Detroit, revised 24 January 2000.

ACI 440.2R-2008. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Michigan, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318RM-1995 – *Building code requirements for reinforced concrete*. Detroy, USA, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318RM-2008 – *Building code requirements for reinforced concrete*. Detroy, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318-2011 – *Building code requirements for reinforced concrete*. Farmington Hills, Michigan, 2011.

ALTIN, S.; ANIL, O.; KOPRAMAN, Y. MERTOGLU, C.; EMIN KARA, M. *Improving Shear Capacity and Ductility of Shear-deficient RC Beams using CFRP Strips*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, n. 19. 2010.

ARAÚJO, A. S. *Reforço ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado com fibra de carbono com dois tipos de ancoragem*. 2002. 201 f. Tese (Mestre em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília – Brasília, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6118:1978 – *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado, NB-1/78*. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6118:2101 – *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado, NB-1/2001*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6118:2014 – *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

BAKIS, C. E.; BANK, L. C.; BROWN, V. L.; COSENZA, E.; DAVALOS, J. F.; LESKO, J. J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S. H.; TRIANTAFILLOU, T. C. *Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction State-of-the-art Review*. Journal of competisse for construction, May 2002.

BEBER, A. J. *Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*. Tese de Doutorado em Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2003.

CEB – FIB. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Bulletin 14. Technical Report. Julho, 2001.

CHEN, J.F.; TENG, J.G. *Shear Capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding*. *Construction and Building Materials* 17: 27-41. 2003.

CHEN, J.F.; TENG, J.G. *Shear Capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP rupture*. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 129(5): 615-25. 2003.

DIAS, S.; BARROS, J. *Verificação experimental de uma nova técnica de reforço ao corte com CFRP para vigas de betão armado*. *Revista IBRACON de Estruturas* Vol.1, Número 2, 2005.

EUROCODE 2. *Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for buildings*. December 1991.

EUROCODE 2. *Design of Concrete Structures – Part 1 - 1: General Rules and Rules for buildings*. December 2004.

GALLARDO, G. O. *Reforço ao Esforço Cortante em Vigas de Concreto Aplicando-se Folhas Flexíveis de Fibra de Carbono Pré-impregnadas*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2002.

GALVEZ, L. E. M. *Reforço Estrutural à Força Cortante em Vigas de Concreto Armado por Meio de Colagem Externa de Mantas Flexíveis de Fibra de Carbono*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2003.

JAYAKAPRASH, J.; SAMAD, A. A. A.; ABBASVOCH, A. A.; ALI, A. A. A. *Shear Capacity of precracked and Non-precracked Reinforced Concrete Shear Beams with Externally Bonded Bi-Directional CFRP Strips*. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008.

JAYAKAPRASH, J.; SAMAD, A. A. A.; ABBASVOCH, A. A. *Investigation on Effects of Variables on Shear Capacity of precracked RC T-Beams with Externally Bonded Bi-directional CFRP Discrete Strips*. Journal of Composites Materials, Vol. 44, n.2. 2010.

KHALIFA, A; GOLD, W. J.; NANNI, A. ; AZIZ, M. I. A. *Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members*. ASCE- Journal of Composites for Construction, Vol. 2, n. 4. Nov 1998, p. 195-203.

KHALIFA, A.; NANNI, A. *Improving Shear Capacity of Existing RC T-section Beams Using CFRP Composites*. Cement and Concrete Composites, Vol. 22, n.2, July 2000, p. 165-174.

KHALIFA, A.; NANNI, A. *Rehabilitation of Rectangular Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies using CFRC Composites*. Construction and Building Materials, Vol. 16, Apr. 2002.

KRAUS, E. *Notas de aula: Patologia das estruturas*. Departamento de Engenharia Civil - UNB, 2014.

LEUNG, C.; CHEN, Z.; LEE, S.; NG, M.; XU, M.; TANG, J. *Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips*. Journal of Composites for Construction, 2007.

LI, A.; DIAGANA, C.; DELMAS, Y. *CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams*. Engineering Structures, Vol. 23, 2001.

MacGREGOR, J. G. *Reinforced concrete – Mechanics & Design*. 6 Edition. 2012.

MASTER BUILDERS, INC. *MBrace Composite Strengthening System – Engineering Design Guidelines*. Cleveland, OH 44122, USA, 1998.

MENDOÇA, PAULO DE TARSO R. *Materiais Compostos e Estruturas – Sanduíche: projeto e análise*. Barueri, São Paulo, Manole, 2005.

MOFIDI, A.; CHAALLAL, M. *Shear Strengthening of RC beams with Externally Bonded FRP Composites: Effect of Strip-Width-to-Strip-Spacing Ratio*. American Society of Civil Engineers ASCE. Journal of Composites for Construction. Sep. 2011.

MOFIDI, A.; CHAALLAL, M. *Tests and Design Provisions for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips*. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2014.

MOLINA, J. L. *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*. 2012. Trabajo fin de Máster (Máster en Edificación. Especialidad Tecnología de la Edificación) – Valencia, Diciembre 2002.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. *Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement*. Journal of Composites for Construction. 2002.

PELLEGRINO, C.; VASIC, M. *Assessment of design procedures for the use of externally bonded FRP composites in shear strengthening of reinforced concrete beams*. Composites: Part B 45. 2013

SALLES NETO, M. *Reforço ao Cisalhamento de Vigas “T” com compósitos de Fibra de Carbono*. Tese (Mestre em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília – Brasília, 2000.

SILVA FILHO, J.N. *Vigas “T” em Concreto Armado Reforçadas ao Cisalhamento com Compósito de Fibra de Carbono*. Tese (Mestre em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília – Brasília, 2001.

SILVA, R de C. *Contribuição da Armadura de Pele na Resistência ao Cisalhamento na Flexão em Vigas de Concreto Armado com Seção “T”*. Tese (Mestre em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília – Brasília, 1999.

SPAGNOLO JR., L. A. *Vigas T de concreto armado reforçadas à força cortante com compósito de fibras de carbono*. Revista IBRACON de Estruturas Vol.6. 2013 Sussekind, José Carlos. *Curso de Concreto: concreto armado*. 7. ed. São Paulo: Globo, vol.1, 1993.

TALJSTEN, B. *Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets*. Construction and Building Materials, Vol. 17. 2003.

TANARSLAN, H. M. *The effects of NSM CFRP reinforcements for improving the shear capacity of RC beams*. Construction and Building Materials Vol.25, 2011.

ZSUTTY, T. C. *Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data*. ACI – Journal, Proceedings, Vol. 65, November, 1968.

ZSUTTY, T. C. *Shear strength prediction for separate categories of simple beam tests*. ACI Journal Proceedings, Detroit, vol. 68, n.2, p.138-143, Feb. 1971.

<http://www.zaldigain.com>. Tipos de reforços utilizados 2016

ANEXOS

Tabela A.1: Cálculo da capacidade de carga a flexão das vigas.

| Vigas | Bitola (mm) 1ª camada | nº de barras | As (mm²) 1ª camada | Bitola (mm) 2ª camada | nº de barras | As (mm²) 2ª camada | fy (MPa) 1ª camada | fy (MPa) 2ª camada | x (mm) | x/d | Mu (kNm) | Pu (kN) |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------|-------------|------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 54,48 | 0,153 | 302,97 | 566,7 |
| V2 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 54,48 | 0,153 | 302,97 | 566,7 |
| V3 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 54,48 | 0,153 | 302,97 | 566,7 |
| V4REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 60,74 | 0,171 | 300,69 | 562,4 |
| V5 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 60,74 | 0,171 | 300,69 | 562,4 |
| V6 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 60,74 | 0,171 | 300,69 | 562,4 |
| V7 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 60,74 | 0,171 | 300,69 | 562,4 |
| V8 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 568,00 | 619,00 | 60,74 | 0,171 | 300,69 | 562,4 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 59,96 | 0,169 | 311,21 | 582,1 |
| V2 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 59,96 | 0,169 | 311,21 | 582,1 |
| V3 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 59,53 | 0,168 | 311,37 | 582,4 |
| V5 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 55,46 | 0,156 | 312,91 | 585,3 |
| V6 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 54,15 | 0,152 | 313,40 | 586,2 |
| V4* | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 57,36 | 0,161 | 312,19 | 584,0 |
| V7 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 55,46 | 0,156 | 312,91 | 585,3 |
| V8 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 620,00 | 589,00 | 55,46 | 0,156 | 312,91 | 585,3 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 765,00 | 656,00 | 128,1 | 0,361 | 339,41 | 634,9 |
| V2 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 765,00 | 656,00 | 132,7 | 0,374 | 337,37 | 631,1 |
| V3 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 765,00 | 656,00 | 132,7 | 0,374 | 337,37 | 631,1 |
| V4 | 20,0 | 3 | 314,16 | 16,0 | 3 | 201,06 | 765,00 | 656,00 | 132,7 | 0,374 | 337,37 | 631,1 |
| V5REF | 22,0 | 3 | 380,13 | 22,0 | 3 | 380,13 | 712,00 | 712,00 | 94,19 | 0,270 | 506,06 | 945,9 |
| V6 | 22,0 | 3 | 380,13 | 22,0 | 3 | 380,13 | 712,00 | 712,00 | 95,01 | 0,272 | 505,52 | 944,9 |
| V7 | 22,0 | 3 | 380,13 | 22,0 | 3 | 380,13 | 712,00 | 712,00 | 94,80 | 0,271 | 505,66 | 945,1 |
| V8 | 22,0 | 3 | 380,13 | 22,0 | 3 | 380,13 | 712,00 | 712,00 | 93,18 | 0,267 | 506,71 | 947,1 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,15 | 0,222 | 134,63 | 163,1 |
| V2 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 72,57 | 0,220 | 134,74 | 163,3 |
| V3 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,44 | 0,223 | 134,58 | 163,1 |
| V4 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,74 | 0,223 | 134,53 | 163,0 |
| V5 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,74 | 0,223 | 134,53 | 163,0 |
| V6 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,15 | 0,222 | 134,63 | 163,1 |
| V7 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,44 | 0,223 | 134,58 | 163,1 |
| V8 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 73,15 | 0,222 | 134,63 | 163,1 |
| V9 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 72,86 | 0,221 | 134,69 | 163,2 |
| V10 | 20,0 | 3 | 314,16 | 0,0 | 0 | 0,00 | 475,00 | 0,00 | 74,34 | 0,225 | 134,42 | 162,9 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | | |
| S0-0.0R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.12R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.17R1 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.17R2 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.20R1 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.20R2 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.23R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.33R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S0-0.66R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S1-0.0R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S1-0.17R1 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S1-0.17R2 | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S1-0.23R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |
| S1-0.33R | 25,0 | 2 | 490,87 | 25,0 | 2 | 490,87 | 500,00 | 500,00 | 91,68 | 0,262 | 307,61 | 442,3 |

| Vigas | Bitola (mm) 1ª camada | nº de barras | As (mm²) 1ª camada | Bitola (mm) 2ª camada | nº de barras | As (mm²) 2ª camada | fy (MPa) 1ª camada | fy (MPa) 2ª camada | x (mm) | x/d | Mu (kNm) | Pu (kN) |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------|-------------|------------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | | |
| V8A REF | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V8B REF | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V9A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V9B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V21A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V10A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V10B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V17A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V11A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V11B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V17B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V12A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V18A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V20A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V12B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V14B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V19A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V19B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V13A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V13B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V15B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V16B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V16A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V18B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V14A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V15A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V20B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V22B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V21B | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| V22A | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 630,00 | 630,00 | 151,4 | 0,594 | 151,71 | 410,3 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | | |
| VTG1 | 12,5 | 3 | 122,72 | 0,0 | 0 | 0,00 | 602,80 | 602,80 | 57,26 | 0,358 | 30,43 | 121,7 |
| VIG1 | 12,5 | 3 | 122,72 | 0,0 | 0 | 0,00 | 602,80 | 602,80 | 67,78 | 0,424 | 29,49 | 117,9 |
| V2G1 | 12,5 | 3 | 122,72 | 0,0 | 0 | 0,00 | 602,80 | 602,80 | 61,64 | 0,385 | 30,04 | 120,1 |
| VTG2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 539,20 | 539,20 | 62,37 | 0,370 | 77,92 | 311,6 |
| VIG2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 539,20 | 539,20 | 62,37 | 0,370 | 77,92 | 311,6 |
| V2G2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 539,20 | 539,20 | 57,02 | 0,338 | 79,08 | 316,3 |
| V3G2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 539,20 | 539,20 | 52,17 | 0,309 | 80,13 | 320,5 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | | |
| R1 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 176,1 | 0,401 | 444,58 | 711,3 |
| RC1 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 176,1 | 0,401 | 444,58 | 711,3 |
| C1 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 176,1 | 0,401 | 444,58 | 711,3 |
| C2 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 166,3 | 0,379 | 449,34 | 718,9 |
| C3 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 202,3 | 0,461 | 431,98 | 691,1 |
| C4 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 202,3 | 0,461 | 431,98 | 691,1 |
| C5 | 16,0 | 4 | 201,06 | 16,0 | 4 | 201,06 | 500,00 | 500,00 | 166,3 | 0,379 | 449,34 | 718,9 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | | |
| BT1REF | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| BT2 | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| BT3 | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| BT4 | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| BT5 | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| BT6 | 28,0 | 2 | 615,75 | 0,0 | 0 | 0,00 | 470,00 | 0,00 | 64,00 | 0,175 | 197,03 | 368,2 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 85,72 | 0,206 | 302,42 | 355,7 |
| V2 | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 84,77 | 0,204 | 302,72 | 356,1 |
| V3 | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 84,05 | 0,202 | 302,95 | 356,4 |
| V4 | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 83,03 | 0,200 | 303,27 | 356,7 |
| V5 | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 86,12 | 0,207 | 302,29 | 355,6 |
| V6 | 20,0 | 2 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,80 | 630,80 | 86,68 | 0,208 | 302,12 | 355,4 |

| Vigas | Bitola (mm) 1ª camada | nº de barras | As (mm²) 1ª camada | Bitola (mm) 2ª camada | nº de barras | As (mm²) 2ª camada | fy (MPa) 1ª camada | fy (MPa) 2ª camada | x (mm) | x/d | Mu (kNm) | Pu (kN) |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------|-------------|------------|
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | | |
| TR30C1REF | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 548,00 | 548,00 | 117,8 | 0,471 | 115,54 | 308,1 |
| TR30C2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 548,00 | 548,00 | 117,8 | 0,471 | 115,54 | 308,1 |
| TR30C3 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 548,00 | 548,00 | 117,8 | 0,471 | 115,54 | 308,1 |
| TR30C4 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 2 | 201,06 | 548,00 | 548,00 | 117,8 | 0,471 | 115,54 | 308,1 |
| TR30D1REF | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D10 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D2 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D20 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D3 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D4 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| TR30D40 | 20,0 | 3 | 314,16 | 20,0 | 2 | 314,16 | 630,00 | 630,00 | 185,3 | 0,742 | 191,49 | 510,6 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 54,94 | 0,153 | 244,67 | 566,3 |
| VI-1 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 51,44 | 0,143 | 245,68 | 568,7 |
| VI-2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 51,44 | 0,143 | 245,68 | 568,7 |
| VI-3 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 50,88 | 0,141 | 245,84 | 569,0 |
| V2REF | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 53,31 | 0,148 | 245,14 | 567,4 |
| VII-1 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 52,24 | 0,145 | 245,45 | 568,1 |
| VII-2 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 51,44 | 0,143 | 245,68 | 568,7 |
| VII-3 | 16,0 | 3 | 201,06 | 16,0 | 3 | 201,06 | 600,00 | 600,00 | 50,88 | 0,141 | 245,84 | 569,0 |

Tabela A.2: Cálculo do cisalhamento pela ABNT NBR 6118 (2014)

| Vigas | αv_2 | θ (graus) | α (graus) | Vrd2 (kN) | Vc0 (kN) | Asw/s (cm ² /m) | Vsw (kN) | Vrd3(kN) | Vu(kN) | Pu(kN) |
|---------------------------------|--------------|------------------|------------------|-----------|----------|----------------------------|----------|----------|--------|--------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 527,14 | 84,43 | 0,00 | 0,00 | 84,43 | 84,43 | 168,86 |
| V2 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 527,14 | 84,43 | 0,00 | 0,00 | 84,43 | 84,43 | 168,86 |
| V3 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 527,14 | 84,43 | 0,00 | 0,00 | 84,43 | 84,43 | 168,86 |
| V4REF | 0,84 | 45,00 | 90,00 | 483,36 | 78,52 | 1,68 | 41,51 | 120,03 | 120,03 | 240,07 |
| V5 | 0,84 | 45,00 | 90,00 | 483,36 | 78,52 | 1,68 | 41,51 | 120,03 | 120,03 | 240,07 |
| V6 | 0,84 | 45,00 | 90,00 | 483,36 | 78,52 | 1,68 | 41,51 | 120,03 | 120,03 | 240,07 |
| V7 | 0,84 | 45,00 | 90,00 | 483,36 | 78,52 | 1,68 | 41,51 | 120,03 | 120,03 | 240,07 |
| V8 | 0,84 | 45,00 | 90,00 | 483,36 | 78,52 | 1,68 | 41,51 | 120,03 | 120,03 | 240,07 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,83 | 45,00 | 90,00 | 358,38 | 80,99 | 1,68 | 41,30 | 122,29 | 122,29 | 244,57 |
| V2 | 0,83 | 45,00 | 90,00 | 358,38 | 80,99 | 1,68 | 41,30 | 122,29 | 122,29 | 244,57 |
| V3 | 0,83 | 45,00 | 90,00 | 360,43 | 81,37 | 1,68 | 41,30 | 122,67 | 122,67 | 245,34 |
| V5 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 381,13 | 85,31 | 1,68 | 41,30 | 126,61 | 126,61 | 253,22 |
| V6 | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 388,29 | 86,69 | 1,68 | 41,30 | 127,99 | 127,99 | 255,97 |
| V4* | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 371,21 | 83,42 | 1,68 | 41,30 | 124,72 | 124,72 | 249,43 |
| V7 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 381,13 | 85,31 | 1,68 | 41,30 | 126,61 | 126,61 | 253,22 |
| V8 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 381,13 | 85,31 | 1,68 | 41,30 | 126,61 | 126,61 | 253,22 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,91 | 45,00 | 90,00 | 217,10 | 54,77 | 1,68 | 41,41 | 96,17 | 96,17 | 192,35 |
| V2 | 0,91 | 45,00 | 90,00 | 210,39 | 53,50 | 1,68 | 41,41 | 94,91 | 94,91 | 189,82 |
| V3 | 0,91 | 45,00 | 90,00 | 210,39 | 53,50 | 1,68 | 41,41 | 94,91 | 94,91 | 189,82 |
| V4 | 0,91 | 45,00 | 90,00 | 210,39 | 53,50 | 1,68 | 41,41 | 94,91 | 94,91 | 189,82 |
| V5REF | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 379,93 | 84,88 | 1,68 | 40,72 | 125,60 | 125,60 | 251,20 |
| V6 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 377,37 | 84,39 | 1,68 | 40,72 | 125,11 | 125,11 | 250,21 |
| V7 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 378,01 | 84,51 | 1,68 | 40,72 | 125,23 | 125,23 | 250,46 |
| V8 | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 383,11 | 85,49 | 1,68 | 40,72 | 126,21 | 126,21 | 252,42 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 171,84 | 42,66 | 1,89 | 15,40 | 58,06 | 58,06 | 116,11 |
| V2 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 173,06 | 42,89 | 1,89 | 15,40 | 58,28 | 58,28 | 116,57 |
| V3 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 171,22 | 42,55 | 1,89 | 15,40 | 57,94 | 57,94 | 115,88 |
| V4 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 170,61 | 42,43 | 1,89 | 15,40 | 57,83 | 57,83 | 115,66 |
| V5 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 170,61 | 42,43 | 1,89 | 15,40 | 57,83 | 57,83 | 115,66 |
| V6 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 171,84 | 42,66 | 1,89 | 15,40 | 58,06 | 58,06 | 116,11 |
| V7 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 171,22 | 42,55 | 1,89 | 15,40 | 57,94 | 57,94 | 115,88 |
| V8 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 171,84 | 42,66 | 0,00 | 0,00 | 42,66 | 42,66 | 85,32 |
| V9 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 172,45 | 42,77 | 0,00 | 0,00 | 42,77 | 42,77 | 85,55 |
| V10 | 0,90 | 45,00 | 90,00 | 169,39 | 42,20 | 0,00 | 0,00 | 42,20 | 42,20 | 84,41 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | |
| S0-0.0R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.12R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.17R1 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.17R2 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.20R1 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.20R2 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.23R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.33R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S0-0.66R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 0,00 | 0,00 | 69,63 | 69,63 | 105,14 |
| S1-0.0R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 5,75 | 97,72 | 167,35 | 167,35 | 252,70 |
| S1-0.17R1 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 5,75 | 97,72 | 167,35 | 167,35 | 252,70 |
| S1-0.17R2 | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 5,75 | 97,72 | 167,35 | 167,35 | 252,70 |
| S1-0.23R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 5,75 | 97,72 | 167,35 | 167,35 | 252,70 |
| S1-0.33R | 0,88 | 45,00 | 90,00 | 293,28 | 69,63 | 5,75 | 97,72 | 167,35 | 167,35 | 252,70 |

| Vigas | $\alpha v2$ | $\theta(\text{graus})$ | $\alpha(\text{graus})$ | Vrd2 (kN) | Vc0 (kN) | Asw/s (cm ² /m) | Vsw (kN) | Vrd3(kN) | Vu(kN) | Pu(kN) |
|-----------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------|----------|----------------------------|----------|----------|--------|--------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | |
| V8A REF | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V8B REF | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V9A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V9B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V21A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V10A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V10B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V17A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V11A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V11B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V17B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V12A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V18A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V20A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V12B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V14B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V19A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V19B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V13A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V13B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V15B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V16B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V16A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V18B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V14A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V15A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V20B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V22B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V21B | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| V22A | 0,87 | 45,00 | - | 210,21 | 49,38 | 0,00 | 0,00 | 49,38 | 49,38 | 98,77 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | |
| VTG1 | 0,85 | 45,00 | 90,00 | 149,15 | 34,18 | 2,30 | 25,63 | 59,81 | 59,81 | 119,62 |
| V1G1 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 129,50 | 30,54 | 2,30 | 25,63 | 56,17 | 56,17 | 112,34 |
| V2G1 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 140,32 | 32,54 | 2,30 | 25,63 | 58,17 | 58,17 | 116,34 |
| VTG2 | 0,66 | 45,00 | 90,00 | 274,09 | 61,74 | 1,85 | 22,45 | 84,18 | 84,18 | 168,37 |
| V1G2 | 0,66 | 45,00 | 90,00 | 274,09 | 61,74 | 1,85 | 22,45 | 84,18 | 84,18 | 168,37 |
| V2G2 | 0,63 | 45,00 | 90,00 | 285,28 | 65,54 | 1,85 | 22,45 | 87,99 | 87,99 | 175,98 |
| V3G2 | 0,59 | 45,00 | 90,00 | 294,56 | 69,54 | 1,85 | 22,45 | 91,99 | 91,99 | 183,98 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | |
| R1 | 0,78 | 45,00 | 90,00 | 661,75 | 145,63 | 0,00 | 0,00 | 145,63 | 145,63 | 291,26 |
| RC1 | 0,78 | 45,00 | 90,00 | 661,75 | 145,63 | 0,00 | 0,00 | 145,63 | 145,63 | 291,26 |
| C1 | 0,78 | 45,00 | 90,00 | 661,75 | 145,63 | 0,00 | 0,00 | 145,63 | 145,63 | 291,26 |
| C2 | 0,76 | 45,00 | 90,00 | 689,03 | 151,34 | 0,00 | 0,00 | 151,34 | 151,34 | 302,68 |
| C3 | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 597,78 | 132,81 | 0,00 | 0,00 | 132,81 | 132,81 | 265,63 |
| C4 | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 597,78 | 132,81 | 0,00 | 0,00 | 132,81 | 132,81 | 265,63 |
| C5 | 0,76 | 45,00 | 90,00 | 689,03 | 151,34 | 0,00 | 0,00 | 151,34 | 151,34 | 302,68 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | |
| BT1REF | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| BT2 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| BT3 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| BT4 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| BT5 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| BT6 | 0,86 | 45,00 | 90,00 | 318,69 | 74,02 | 0,00 | 0,00 | 74,02 | 74,02 | 148,03 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 357,11 | 79,93 | 0,92 | 23,58 | 103,51 | 103,51 | 207,01 |
| V2 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 360,23 | 80,53 | 0,92 | 23,58 | 104,10 | 104,10 | 208,21 |
| V3 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 362,60 | 80,98 | 0,92 | 23,58 | 104,56 | 104,56 | 209,12 |
| V4 | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 366,04 | 81,65 | 0,92 | 23,58 | 105,22 | 105,22 | 210,45 |
| V5 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 355,82 | 79,68 | 0,92 | 23,58 | 103,26 | 103,26 | 206,52 |
| V6 | 0,82 | 45,00 | 90,00 | 354,03 | 79,34 | 0,92 | 23,58 | 102,92 | 102,92 | 205,83 |

| Vigas | αv_2 | $\theta(\text{graus})$ | $\alpha(\text{graus})$ | Vrd2 (kN) | Vc0 (kN) | Asw/s (cm ² /m) | Vsw (kN) | Vrd3(kN) | Vu(kN) | Pu(kN) |
|---------------------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-----------|----------|-------------------------------|----------|----------|--------|--------|
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | |
| TR30C1REF | 0,89 | 45,00 | 90,00 | 177,01 | 43,05 | 0,00 | 0,00 | 43,05 | 43,05 | 86,10 |
| TR30C2 | 0,89 | 45,00 | 90,00 | 177,01 | 43,05 | 0,00 | 0,00 | 43,05 | 43,05 | 86,10 |
| TR30C3 | 0,89 | 45,00 | 90,00 | 177,01 | 43,05 | 0,00 | 0,00 | 43,05 | 43,05 | 86,10 |
| TR30C4 | 0,89 | 45,00 | 90,00 | 177,01 | 43,05 | 0,00 | 0,00 | 43,05 | 43,05 | 86,10 |
| TR30D1REF | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D10 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D2 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D20 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D3 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D4 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| TR30D40 | 0,87 | 45,00 | 90,00 | 198,57 | 47,03 | 5,03 | 62,02 | 109,05 | 109,05 | 218,10 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | |
| V1REF | 0,81 | 45,00 | 90,00 | 406,72 | 90,41 | 3,93 | 75,89 | 166,30 | 166,30 | 332,61 |
| VI-1 | 0,79 | 45,00 | 90,00 | 427,26 | 94,46 | 3,93 | 75,89 | 170,35 | 170,35 | 340,70 |
| VI-2 | 0,79 | 45,00 | 90,00 | 427,26 | 94,46 | 3,93 | 75,89 | 170,35 | 170,35 | 340,70 |
| VI-3 | 0,79 | 45,00 | 90,00 | 430,72 | 95,16 | 3,93 | 75,89 | 171,04 | 171,04 | 342,09 |
| V2REF | 0,80 | 45,00 | 90,00 | 416,07 | 92,25 | 1,97 | 37,94 | 130,19 | 130,19 | 260,38 |
| VII-1 | 0,80 | 45,00 | 90,00 | 422,41 | 93,50 | 1,97 | 37,94 | 131,44 | 131,44 | 262,89 |
| VII-2 | 0,79 | 45,00 | 90,00 | 427,26 | 94,46 | 1,97 | 37,94 | 132,41 | 132,41 | 264,81 |
| VII-3 | 0,79 | 45,00 | 90,00 | 430,72 | 95,16 | 1,97 | 37,94 | 133,10 | 133,10 | 266,20 |

Tabela A.3: Cálculo do cisalhamento pelo ACI 318 (2011).

| Vigas | fc' (Mpa) | d (mm) | bw (mm) | As long. (mm ²) | p | Vc (kN) | Asw/s (cm ² /m) | f _{yd} (MPa) | V _s (kN) | V _u (kN) | P _u (kN) |
|---------------------------------|-----------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 44,6 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 65,66 | 0 | 773 | 0,00 | 65,66 | 131,322 |
| V2 | 44,6 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 65,66 | 0 | 773 | 0,00 | 65,66 | 131,322 |
| V3 | 44,6 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 65,66 | 0 | 773 | 0,00 | 65,66 | 131,322 |
| V4REF | 40 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 62,65 | 1,68 | 773 | 46,13 | 108,77 | 217,546 |
| V5 | 40 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 62,65 | 1,68 | 773 | 46,13 | 108,77 | 217,546 |
| V6 | 40 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 62,65 | 1,68 | 773 | 46,13 | 108,77 | 217,546 |
| V7 | 40 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 62,65 | 1,68 | 773 | 46,13 | 108,77 | 217,546 |
| V8 | 40 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 62,65 | 1,68 | 773 | 46,13 | 108,77 | 217,546 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 41,9 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 63,91 | 1,68 | 769 | 45,89 | 109,80 | 219,6 |
| V2 | 41,9 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 63,91 | 1,68 | 769 | 45,89 | 109,80 | 219,6 |
| V3 | 42,2 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 64,11 | 1,68 | 769 | 45,89 | 110,00 | 219,994 |
| V5 | 45,3 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 66,11 | 1,68 | 769 | 45,89 | 112,00 | 223,99 |
| V6 | 46,4 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 66,80 | 1,68 | 769 | 45,89 | 112,69 | 225,375 |
| V4* | 43,8 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 65,15 | 1,68 | 769 | 45,89 | 111,04 | 222,074 |
| V7 | 45,3 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 66,11 | 1,68 | 769 | 45,89 | 112,00 | 223,99 |
| V8 | 45,3 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 66,11 | 1,68 | 769 | 45,89 | 112,00 | 223,99 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 23,3 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 49,88 | 1,68 | 771 | 46,01 | 95,89 | 191,775 |
| V2 | 22,5 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 49,17 | 1,68 | 771 | 46,01 | 95,17 | 190,349 |
| V3 | 22,5 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 49,17 | 1,68 | 771 | 46,01 | 95,17 | 190,349 |
| V4 | 22,5 | 355,2 | 150 | 1545,66 | 0,0290 | 49,17 | 1,68 | 771 | 46,01 | 95,17 | 190,349 |
| V5REF | 46,1 | 349,3 | 150 | 2280,80 | 0,0435 | 69,80 | 1,68 | 771 | 45,24 | 115,05 | 230,09 |
| V6 | 45,7 | 349,3 | 150 | 2280,80 | 0,0435 | 69,55 | 1,68 | 771 | 45,24 | 114,80 | 229,595 |
| V7 | 45,8 | 349,3 | 150 | 2280,80 | 0,0435 | 69,62 | 1,68 | 771 | 45,24 | 114,86 | 229,719 |
| V8 | 46,6 | 349,3 | 150 | 2280,80 | 0,0435 | 70,11 | 1,68 | 771 | 45,24 | 115,35 | 230,706 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 25 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,88 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,99 | 103,982 |
| V2 | 25,2 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 35,01 | 1,885 | 275 | 17,11 | 52,12 | 104,235 |
| V3 | 24,9 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,82 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,93 | 103,855 |
| V4 | 24,8 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,76 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,86 | 103,728 |
| V5 | 24,8 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,76 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,86 | 103,728 |
| V6 | 25 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,88 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,99 | 103,982 |
| V7 | 24,9 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,82 | 1,885 | 275 | 17,11 | 51,93 | 103,855 |
| V8 | 25 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,88 | 0 | 275 | 0,00 | 34,88 | 69,7688 |
| V9 | 25,1 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,95 | 0 | 275 | 0,00 | 34,95 | 69,8954 |
| V10 | 24,6 | 330 | 120 | 942,48 | 0,0238 | 34,63 | 0 | 275 | 0,00 | 34,63 | 69,2599 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | |
| S0-0.0R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.12R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.17R1 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.17R2 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.20R1 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.20R2 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.23R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.33R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S0-0.66R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 0 | 540 | 0,00 | 61,01 | 92,1306 |
| S1-0.0R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 5,745 | 540 | 108,58 | 169,59 | 256,087 |
| S1-0.17R1 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 5,745 | 540 | 108,58 | 169,59 | 256,087 |
| S1-0.17R2 | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 5,745 | 540 | 108,58 | 169,59 | 256,087 |
| S1-0.23R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 5,745 | 540 | 108,58 | 169,59 | 256,087 |
| S1-0.33R | 31 | 350 | 160 | 1963,50 | 0,0351 | 61,01 | 5,745 | 540 | 108,58 | 169,59 | 256,087 |

| Vigas | fc' (Mpa) | d (mm) | bw (mm) | As long. (mm ²) | p | Vc (kN) | Asw/s (cm ² /m) | f _{yd} (MPa) | Vs (kN) | Vu (kN) | Pu(kN) |
|-----------------------------------|-----------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | |
| V8A REF | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V8B REF | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V9A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V9B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V21A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V10A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V10B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V17A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V11A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V11B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V17B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V12A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V18A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V20A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V12B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V14B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V19A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V19B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V13A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V13B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V15B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V16B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V16A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V18B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V14A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V15A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V20B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V22B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V21B | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| V22A | 32,80 | 255 | 150 | 1206,37 | 0,0315 | 42,12 | 0 | 747 | 0 | 42,12 | 84,2437 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | |
| VTG1 | 38,00 | 160 | 150 | 368,16 | 0,0153 | 25,67 | 2,3 | 773,8 | 28,48 | 54,15 | 108,3 |
| V1G1 | 32,10 | 160 | 150 | 368,16 | 0,0153 | 23,76 | 2,3 | 773,8 | 28,48 | 52,23 | 104,47 |
| V2G1 | 35,30 | 160 | 150 | 368,16 | 0,0153 | 24,82 | 2,3 | 773,8 | 28,48 | 53,29 | 106,587 |
| VTG2 | 85,20 | 168,7 | 150 | 1005,31 | 0,0397 | 43,14 | 1,85 | 799,2 | 24,94 | 68,08 | 136,162 |
| V1G2 | 85,20 | 168,7 | 150 | 1005,31 | 0,0397 | 43,14 | 1,85 | 799,2 | 24,94 | 68,08 | 136,162 |
| V2G2 | 93,20 | 168,7 | 150 | 1005,31 | 0,0397 | 44,85 | 1,85 | 799,2 | 24,94 | 69,80 | 139,592 |
| V3G2 | 101,86 | 168,7 | 150 | 1005,31 | 0,0397 | 46,63 | 1,85 | 799,2 | 24,94 | 71,57 | 143,143 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | |
| R1 | 55,94 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 108,97 | 0 | 500 | 0,00 | 108,97 | 217,935 |
| RC1 | 55,94 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 108,97 | 0 | 500 | 0,00 | 108,97 | 217,935 |
| C1 | 55,94 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 108,97 | 0 | 500 | 0,00 | 108,97 | 217,935 |
| C2 | 59,26 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 111,73 | 0 | 500 | 0,00 | 111,73 | 223,466 |
| C3 | 48,72 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 102,65 | 0 | 500 | 0,00 | 102,65 | 205,308 |
| C4 | 48,72 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 102,65 | 0 | 500 | 0,00 | 102,65 | 205,308 |
| C5 | 59,26 | 439 | 180 | 2412,74 | 0,0305 | 111,73 | 0 | 500 | 0,00 | 111,73 | 223,466 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | |
| BTIREF | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| BT2 | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| BT3 | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| BT4 | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| BT5 | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| BT6 | 35,00 | 366 | 150 | 1231,50 | 0,0224 | 59,13 | 0 | 530 | 0,00 | 59,13 | 118,256 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 45,33 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 58,98 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 85,17 | 170,347 |
| V2 | 45,84 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 59,28 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 85,48 | 170,95 |
| V3 | 46,23 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 59,51 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 85,70 | 171,409 |
| V4 | 46,80 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 59,84 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 86,04 | 172,076 |
| V5 | 45,12 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 58,85 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 85,05 | 170,098 |
| V6 | 44,83 | 415,8 | 120 | 1256,64 | 0,0252 | 58,68 | 0,924 | 681,9 | 26,20 | 84,88 | 169,753 |

| Vigas | fc' (Mpa) | d (mm) | bw (mm) | As long. (mm ²) | ρ | Vc (kN) | Asw/s (cm ² /m) | f _{yd} (MPa) | Vs (kN) | Vu (kN) | Pu(kN) |
|---------------------------------------|-----------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | |
| TR30C1REF | 27,50 | 250 | 150 | 1005,31 | 0,0268 | 37,16 | 0 | 548 | 0,00 | 37,16 | 74,322 |
| TR30C2 | 27,50 | 250 | 150 | 1005,31 | 0,0268 | 37,16 | 0 | 548 | 0,00 | 37,16 | 74,322 |
| TR30C3 | 27,50 | 250 | 150 | 1005,31 | 0,0268 | 37,16 | 0 | 548 | 0,00 | 37,16 | 74,322 |
| TR30C4 | 27,50 | 250 | 150 | 1005,31 | 0,0268 | 37,16 | 0 | 548 | 0,00 | 37,16 | 74,322 |
| TR30D1REF | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D10 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D2 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D20 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D3 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D4 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| TR30D40 | 31,40 | 250 | 150 | 1570,80 | 0,0419 | 42,52 | 5,03 | 548 | 68,91 | 111,43 | 222,867 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 48,44 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 68,68 | 3,93 | 596 | 84,32 | 153,00 | 306,001 |
| VI-1 | 51,73 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 70,69 | 3,93 | 596 | 84,32 | 155,01 | 310,018 |
| VI-2 | 51,73 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 70,69 | 3,93 | 596 | 84,32 | 155,01 | 310,018 |
| VI-3 | 52,30 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 71,03 | 3,93 | 596 | 84,32 | 155,35 | 310,701 |
| V2REF | 49,92 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 69,59 | 1,965 | 596 | 42,16 | 111,75 | 223,503 |
| VII-1 | 50,94 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 70,21 | 1,965 | 596 | 42,16 | 112,37 | 224,744 |
| VII-2 | 51,73 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 70,69 | 1,965 | 596 | 42,16 | 112,85 | 225,696 |
| VII-3 | 52,30 | 360 | 150 | 1206,37 | 0,0223 | 71,03 | 1,965 | 596 | 42,16 | 113,19 | 226,379 |

Tabela A.4: Cálculo do cisalhamento pelo Zsutty (1968).

| Vigas | bw (mm) | d (mm) | f_c' (MPa) | As long. (mm ²) | ρ | a/d | Vc (kN) | fyw (MPa) | Asw/s (cm ² /m) | Vs(kN) | Vu (kN) | Pu (kN) |
|---------------------------------|---------|--------|--------------|-----------------------------|--------|------|---------|-----------|----------------------------|--------|---------|---------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 150 | 355,2 | 44,6 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,48 | 773,00 | 0,00 | 0,00 | 92,48 | 184,97 |
| V2 | 150 | 355,2 | 44,6 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,48 | 773,00 | 0,00 | 0,00 | 92,48 | 184,97 |
| V3 | 150 | 355,2 | 44,6 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,48 | 773,00 | 0,00 | 0,00 | 92,48 | 184,97 |
| V4REF | 150 | 355,2 | 40 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 89,19 | 773,00 | 1,68 | 46,13 | 135,32 | 270,63 |
| V5 | 150 | 355,2 | 40 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 89,19 | 773,00 | 1,68 | 46,13 | 135,32 | 270,63 |
| V6 | 150 | 355,2 | 40 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 89,19 | 773,00 | 1,68 | 46,13 | 135,32 | 270,63 |
| V7 | 150 | 355,2 | 40 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 89,19 | 773,00 | 1,68 | 46,13 | 135,32 | 270,63 |
| V8 | 150 | 355,2 | 40 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 89,19 | 773,00 | 1,68 | 46,13 | 135,32 | 270,63 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 150 | 355,2 | 41,9 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 90,58 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 136,47 | 272,93 |
| V2 | 150 | 355,2 | 41,9 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 90,58 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 136,47 | 272,93 |
| V3 | 150 | 355,2 | 42,2 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 90,79 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 136,68 | 273,37 |
| V5 | 150 | 355,2 | 45,3 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,97 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 138,85 | 277,71 |
| V6 | 150 | 355,2 | 46,4 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 93,71 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 139,60 | 279,20 |
| V4* | 150 | 355,2 | 43,8 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 91,93 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 137,82 | 275,63 |
| V7 | 150 | 355,2 | 45,3 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,97 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 138,85 | 277,71 |
| V8 | 150 | 355,2 | 45,3 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 92,97 | 769,00 | 1,68 | 45,89 | 138,85 | 277,71 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 150 | 355,2 | 23,3 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 74,49 | 771,00 | 1,68 | 46,01 | 120,49 | 240,99 |
| V2 | 150 | 355,2 | 22,5 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 73,62 | 771,00 | 1,68 | 46,01 | 119,63 | 239,26 |
| V3 | 150 | 355,2 | 22,5 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 73,62 | 771,00 | 1,68 | 46,01 | 119,63 | 239,26 |
| V4 | 150 | 355,2 | 22,5 | 1545,66 | 0,0290 | 3,01 | 73,62 | 771,00 | 1,68 | 46,01 | 119,63 | 239,26 |
| V5REF | 150 | 349,3 | 46,1 | 2280,80 | 0,0435 | 3,01 | 105,28 | 771,00 | 1,68 | 45,24 | 150,52 | 301,04 |
| V6 | 150 | 349,3 | 45,7 | 2280,80 | 0,0435 | 3,01 | 104,97 | 771,00 | 1,68 | 45,24 | 150,21 | 300,43 |
| V7 | 150 | 349,3 | 45,8 | 2280,80 | 0,0435 | 3,01 | 105,05 | 771,00 | 1,68 | 45,24 | 150,29 | 300,58 |
| V8 | 150 | 349,3 | 46,6 | 2280,80 | 0,0435 | 3,01 | 105,65 | 771,00 | 1,68 | 45,24 | 150,90 | 301,80 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 120 | 330 | 25 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,80 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,91 | 123,81 |
| V2 | 120 | 330 | 25,2 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,92 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 62,02 | 124,05 |
| V3 | 120 | 330 | 24,9 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,74 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,85 | 123,69 |
| V4 | 120 | 330 | 24,8 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,68 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,79 | 123,57 |
| V5 | 120 | 330 | 24,8 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,68 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,79 | 123,57 |
| V6 | 120 | 330 | 25 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,80 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,91 | 123,81 |
| V7 | 120 | 330 | 24,9 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,74 | 275,00 | 1,885 | 17,11 | 61,85 | 123,69 |
| V8 | 120 | 330 | 25 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,80 | 275,00 | 0,00 | 0,00 | 44,80 | 89,60 |
| V9 | 120 | 330 | 25,1 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,86 | 275,00 | 0,00 | 0,00 | 44,86 | 89,72 |
| V10 | 120 | 330 | 24,6 | 942,48 | 0,0238 | 5 | 44,56 | 275,00 | 0,00 | 0,00 | 44,56 | 89,12 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | | |
| S0-0.0R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.12R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.17R1 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.17R2 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.20R1 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.20R2 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.23R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.33R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S0-0.66R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 0,00 | 0,00 | 91,82 | 138,65 |
| S1-0.0R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 5,75 | 108,58 | 200,40 | 302,61 |
| S1-0.17R1 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 5,75 | 108,58 | 200,40 | 302,61 |
| S1-0.17R2 | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 5,75 | 108,58 | 200,40 | 302,61 |
| S1-0.23R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 5,75 | 108,58 | 200,40 | 302,61 |
| S1-0.33R | 160 | 350 | 31 | 1963,50 | 0,0351 | 3 | 91,82 | 540,00 | 5,75 | 108,58 | 200,40 | 302,61 |

| Vigas | bw (mm) | d (mm) | f_c' (MPa) | As long. (mm ²) | ρ | a/d | Vc (kN) | f _{yw} (MPa) | Asw/s (cm ² /m) | Vs(kN) | Vu (kN) | Pu (kN) |
|-----------------------------------|---------|--------|--------------|-----------------------------|--------|-------|---------|-----------------------|----------------------------|--------|---------|---------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | | |
| V8A REF | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V8B REF | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V9A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V9B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V21A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V10A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V10B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V17A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V11A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V11B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V17B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V12A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V18A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V20A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V12B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V14B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V19A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V19B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V13A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V13B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V15B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V16B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V16A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V18B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V14A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V15A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V20B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V22B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V21B | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| V22A | 150 | 255 | 32,8 | 1206,37 | 0,0315 | 2,9 | 62,39 | 747,00 | 0,00 | 0,00 | 62,39 | 124,79 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | | |
| VTG1 | 150 | 160 | 38 | 368,16 | 0,0153 | 3,125 | 31,54 | 773,80 | 2,30 | 28,48 | 60,02 | 120,03 |
| V1G1 | 150 | 160 | 32,1 | 368,16 | 0,0153 | 3,125 | 29,81 | 773,80 | 2,30 | 28,48 | 58,29 | 116,58 |
| V2G1 | 150 | 160 | 35,3 | 368,16 | 0,0153 | 3,125 | 30,77 | 773,80 | 2,30 | 28,48 | 59,25 | 118,50 |
| VTG2 | 150 | 168,7 | 85,2 | 1005,31 | 0,0397 | 2,964 | 60,84 | 799,20 | 1,85 | 24,94 | 85,78 | 171,56 |
| V1G2 | 150 | 168,7 | 85,2 | 1005,31 | 0,0397 | 2,964 | 60,84 | 799,20 | 1,85 | 24,94 | 85,78 | 171,56 |
| V2G2 | 150 | 168,7 | 93,2 | 1005,31 | 0,0397 | 2,964 | 62,68 | 799,20 | 1,85 | 24,94 | 87,63 | 175,25 |
| V3G2 | 150 | 168,7 | 101,86 | 1005,31 | 0,0397 | 2,964 | 64,57 | 799,20 | 1,85 | 24,94 | 89,51 | 179,02 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | | |
| R1 | 180 | 439 | 55,94 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 153,28 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 153,28 | 306,56 |
| RC1 | 180 | 439 | 55,94 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 153,28 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 153,28 | 306,56 |
| C1 | 180 | 439 | 55,94 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 153,28 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 153,28 | 306,56 |
| C2 | 180 | 439 | 59,26 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 156,25 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 156,25 | 312,51 |
| C3 | 180 | 439 | 48,72 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 146,38 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 146,38 | 292,76 |
| C4 | 180 | 439 | 48,72 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 146,38 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 146,38 | 292,76 |
| C5 | 180 | 439 | 59,26 | 2412,74 | 0,0305 | 2,847 | 156,25 | 500,00 | 0,00 | 0,00 | 156,25 | 312,51 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | | |
| BT1REF | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| BT2 | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| BT3 | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| BT4 | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| BT5 | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| BT6 | 150 | 366 | 35 | 1231,50 | 0,0224 | 2,923 | 81,47 | 530,00 | 0,00 | 0,00 | 81,47 | 162,93 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 120 | 415,8 | 45,33 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 75,01 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 101,21 | 202,42 |
| V2 | 120 | 415,8 | 45,84 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 75,29 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 101,49 | 202,98 |
| V3 | 120 | 415,8 | 46,23 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 75,50 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 101,70 | 203,40 |
| V4 | 120 | 415,8 | 46,8 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 75,81 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 102,01 | 204,02 |
| V5 | 120 | 415,8 | 45,12 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 74,89 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 101,09 | 202,18 |
| V6 | 120 | 415,8 | 44,83 | 1256,64 | 0,0252 | 4,089 | 74,73 | 681,90 | 0,92 | 26,20 | 100,93 | 201,86 |

| Vigas | bw (mm) | d (mm) | f_c' (MPa) | As long. (mm ²) | p | a/d | Vc (kN) | f_y w (MPa) | Asw/s (cm ² /m) | Vs(kN) | Vu (kN) | Pu (kN) |
|---------------------------------------|---------|--------|--------------|-----------------------------|--------|-----|-----------|---------------|----------------------------|----------|---------|---------|
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | | |
| TR30C1REF | 150 | 250 | 27,5 | 1005,31 | 0,0268 | 3 | 54,02 | 548,00 | 0,00 | 0,00 | 54,02 | 108,05 |
| TR30C2 | 150 | 250 | 27,5 | 1005,31 | 0,0268 | 3 | 54,02 | 548,00 | 0,00 | 0,00 | 54,02 | 108,05 |
| TR30C3 | 150 | 250 | 27,5 | 1005,31 | 0,0268 | 3 | 54,02 | 548,00 | 0,00 | 0,00 | 54,02 | 108,05 |
| TR30C4 | 150 | 250 | 27,5 | 1005,31 | 0,0268 | 3 | 54,02 | 548,00 | 0,00 | 0,00 | 54,02 | 108,05 |
| TR30D1REF | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D10 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D2 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D20 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D3 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D4 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| TR30D40 | 150 | 250 | 31,4 | 1570,80 | 0,0419 | 3 | 65,52 | 548,00 | 5,03 | 68,91 | 134,43 | 268,87 |
| Spagnolo <i>et al.</i> (2013) | | | | | | | | | | | | |
| V1REF | 150 | 360 | 48,44 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 95,24 | 596,00 | 3,93 | 84,32 | 179,56 | 359,12 |
| VI-1 | 150 | 360 | 51,73 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 97,35 | 596,00 | 3,93 | 84,32 | 181,67 | 363,34 |
| VI-2 | 150 | 360 | 51,73 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 97,35 | 596,00 | 3,93 | 84,32 | 181,67 | 363,34 |
| VI-3 | 150 | 360 | 52,30 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 97,70 | 596,00 | 3,93 | 84,32 | 182,03 | 364,05 |
| V2REF | 150 | 360 | 49,92 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 96,20 | 596,00 | 1,97 | 42,16 | 138,36 | 276,72 |
| VII-1 | 150 | 360 | 50,94 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 96,85 | 596,00 | 1,97 | 42,16 | 139,01 | 278,02 |
| VII-2 | 150 | 360 | 51,73 | 1206,37 | 0,0223 | 2,4 | 97,35 | 596,00 | 1,97 | 42,16 | 139,51 | 279,02 |
| VII-3 | 150 | 360 | 52,3 | 1206,3716 | 0,0223 | 2,4 | 97,704415 | 596 | 1,965 | 42,16104 | 139,86 | 279,73 |

Tabela A.5: Cálculo do cisalhamento com fibra pelo ACI 440.2R (2008).

| Vigas | n | tf (mm) | wf (mm) | Afv (mm ²) | Ef (MPa) | efu | ffe (MPa) | kv | Le (mm) | k1 | k2 | α | dfv (mm) | sf (mm) | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------|------|---------|---------|------------------------|-----------|------|-----------|------|---------|------|------|----------|----------|---------|---------|----------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,28 | 51,71 | 1,40 | 0,80 | 90 | 255,2 | 230 | 50,09 | 100,18 |
| V3 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,28 | 51,71 | 1,40 | 0,80 | 45 | 255,2 | 230 | 70,84 | 141,68 |
| V5 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,26 | 51,71 | 1,30 | 0,80 | 90 | 255,2 | 230 | 50,09 | 100,18 |
| V6 | 2,00 | 0,17 | 150,00 | 99,00 | 228000,00 | 0,02 | 744,62 | 0,19 | 34,60 | 1,30 | 0,86 | 90 | 255,2 | 200 | 94,06 | 188,13 |
| V7 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,26 | 51,71 | 1,30 | 0,80 | 45 | 255,2 | 230 | 70,84 | 141,68 |
| V8 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,26 | 51,71 | 1,30 | 0,80 | 45 | 255,2 | 180 | 90,52 | 181,03 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,29 | 51,71 | 1,34 | 0,85 | 90 | 355,2 | 230 | 69,72 | 139,44 |
| V3 | 2,00 | 0,17 | 150,00 | 99,00 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,21 | 34,60 | 1,35 | 0,90 | 90 | 355,2 | 200 | 160,3 | 320,70 |
| V5 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,31 | 51,71 | 1,41 | 0,85 | 45 | 355,2 | 200 | 113,4 | 226,77 |
| V6 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,31 | 51,71 | 1,43 | 0,85 | 45 | 355,2 | 230 | 98,60 | 197,19 |
| V4* | 3,00 | 0,17 | 150,00 | 148,5 | 228000,00 | 0,02 | 645,83 | 0,17 | 27,35 | 1,38 | 0,89 | 90 | 255,2 | 200 | 122,4 | 244,75 |
| V7 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,29 | 51,71 | 1,41 | 0,80 | 90 | 255,2 | 230 | 50,09 | 100,18 |
| V8 | 2,00 | 0,17 | 150,00 | 99,00 | 228000,00 | 0,02 | 809,02 | 0,21 | 34,60 | 1,41 | 0,86 | 90 | 255,2 | 200 | 102,2 | 204,40 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 699,63 | 0,18 | 51,71 | 0,89 | 0,80 | 90 | 255,2 | 230 | 38,43 | 76,85 |
| V3 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 699,63 | 0,18 | 51,71 | 0,89 | 0,80 | 90 | 255,2 | 230 | 38,43 | 76,85 |
| V4 | 2,00 | 0,17 | 150,00 | 99,00 | 228000,00 | 0,02 | 507,40 | 0,13 | 34,60 | 0,89 | 0,86 | 90 | 255,2 | 200 | 64,10 | 128,19 |
| V6 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,31 | 51,71 | 1,42 | 0,85 | 90 | 349,3 | 230 | 68,56 | 137,12 |
| V7 | 2,00 | 0,17 | 150,00 | 99,00 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,22 | 34,60 | 1,42 | 0,90 | 90 | 349,3 | 200 | 157,6 | 315,38 |
| V8 | 1,00 | 0,17 | 150,00 | 49,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,31 | 51,71 | 1,44 | 0,85 | 45 | 349,3 | 325 | 68,62 | 137,23 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 867,44 | 0,22 | 61,74 | 0,96 | 0,76 | 90 | 255,0 | 125 | 21,23 | 42,47 |
| V3 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 860,54 | 0,22 | 61,74 | 0,95 | 0,76 | 90 | 255,0 | 150 | 17,55 | 35,11 |
| V4 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 858,23 | 0,22 | 61,74 | 0,94 | 0,76 | 90 | 255,0 | 200 | 13,13 | 26,26 |
| V5 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 858,23 | 0,22 | 61,74 | 0,94 | 0,76 | 90 | 255,0 | 125 | 21,01 | 42,02 |
| V6 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 862,84 | 0,22 | 61,74 | 0,95 | 0,76 | 90 | 255,0 | 150 | 17,60 | 35,20 |
| V7 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 860,54 | 0,22 | 61,74 | 0,95 | 0,76 | 90 | 255,0 | 200 | 13,17 | 26,33 |
| V8 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 862,84 | 0,22 | 61,74 | 0,95 | 0,76 | 90 | 255,0 | 125 | 21,12 | 42,24 |
| V9 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 865,14 | 0,22 | 61,74 | 0,95 | 0,76 | 90 | 255,0 | 150 | 17,65 | 35,30 |
| V10 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 12,00 | 231000,00 | 0,02 | 853,61 | 0,22 | 61,74 | 0,94 | 0,76 | 90 | 255,0 | 200 | 13,06 | 26,12 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S0-0.12R | 1,00 | 0,11 | 40,00 | 8,80 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 115 | 17,46 | 26,36 |
| S0-0.17R1 | 1,00 | 0,11 | 87,50 | 19,25 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 175 | 25,10 | 37,90 |
| S0-0.17R2 | 1,00 | 0,11 | 1000,00 | 220,0 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 1000 | 50,20 | 75,79 |
| S0-0.20R1 | 1,00 | 0,11 | 53,00 | 11,66 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 87 | 30,40 | 45,91 |
| S0-0.20R2 | 1,00 | 0,11 | 30,00 | 6,60 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 50 | 30,12 | 45,48 |
| S0-0.23R | 1,00 | 0,11 | 87,50 | 19,25 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 125 | 35,14 | 53,06 |
| S0-0.33R | 1,00 | 0,11 | 1000,00 | 220,0 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 1000 | 50,20 | 75,79 |
| S0-0.66R | 1,00 | 0,11 | 1000,00 | 220,0 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 1000 | 50,20 | 75,79 |
| S1-0.17R1 | 1,00 | 0,11 | 87,50 | 19,25 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 175 | 25,10 | 37,90 |
| S1-0.17R2 | 1,00 | 0,11 | 87,50 | 19,25 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 175,0 | 25,10 | 37,90 |
| S1-0.23R | 1,00 | 0,11 | 87,50 | 19,25 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 125,0 | 35,14 | 53,06 |
| S1-0.33R | 1,00 | 0,11 | 1000,00 | 220,0 | 230000,00 | 0,02 | 920,00 | 0,29 | 65,09 | 1,10 | 0,74 | 90 | 248,0 | 1000 | 50,20 | 75,79 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VI-1 | 1,00 | 0,12 | 100,00 | 24,40 | 255000,00 | 0,12 | 1020,00 | 0,05 | 57,74 | 1,54 | 0,79 | 90 | 280,0 | 225 | 30,97 | 61,94 |
| VI-2 | 2,00 | 0,12 | 100,00 | 48,80 | 255000,00 | 0,12 | 1020,00 | 0,04 | 38,63 | 1,54 | 0,86 | 90 | 280,0 | 225 | 61,94 | 123,89 |
| VI-3 | 3,00 | 0,12 | 100,00 | 73,20 | 255000,00 | 0,12 | 905,78 | 0,03 | 30,53 | 1,55 | 0,89 | 90 | 280,0 | 225 | 82,51 | 165,02 |
| VII-1 | 1,00 | 0,12 | 100,00 | 24,40 | 255000,00 | 0,12 | 1020,00 | 0,05 | 57,74 | 1,53 | 0,79 | 90 | 280,0 | 225 | 30,97 | 61,94 |
| VII-2 | 2,00 | 0,12 | 100,00 | 48,80 | 255000,00 | 0,12 | 1020,00 | 0,04 | 38,63 | 1,54 | 0,86 | 90 | 280,0 | 225 | 61,94 | 123,89 |
| VII-3 | 3,00 | 0,12 | 100,00 | 73,20 | 255000,00 | 0,12 | 905,78 | 0,03 | 30,53 | 1,55 | 0,89 | 90 | 280,0 | 225 | 82,51 | 165,02 |

| Vigas | n | tf (mm) | wf (mm) | Afv (mm ²) | Ef (MPa) | efu | ffe (MPa) | kv | Le (mm) | k1 | k2 | α | dfv (mm) | sf (mm) | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------------|------|---------|---------|------------------------|-----------|------|-----------|------|---------|------|------|----|----------|---------|---------|----------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V9A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 90 | 255,0 | 100 | 19,67 | 39,33 |
| V9B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 90 | 255,0 | 100 | 19,67 | 39,33 |
| V21A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 90 | 255,0 | 100 | 19,67 | 39,33 |
| V10A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V10B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V17A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V11A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V11B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V17B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V12A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V18A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V20A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 100 | 25,81 | 51,61 |
| V12B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 141,4 | 19,67 | 39,34 |
| V14B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 141,4 | 19,67 | 39,34 |
| V19A | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 141,4 | 19,67 | 39,34 |
| V19B | 1,00 | 0,11 | 50,00 | 11,00 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 141,4 | 19,67 | 39,34 |
| V13A | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 90 | 255,0 | 655 | 39,33 | 78,66 |
| V13B | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 90 | 255,0 | 655 | 39,33 | 78,66 |
| V15B | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255 | 655 | 51,61 | 103,22 |
| V16B | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 655 | 51,61 | 103,22 |
| V16A | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 655 | 51,61 | 103,22 |
| V18B | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 920,00 | 0,31 | 65,09 | 1,14 | 0,74 | 90 | 255,0 | 655 | 51,61 | 103,22 |
| V14A | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 655 | 55,62 | 111,25 |
| V15A | 1,00 | 0,11 | 655,00 | 144,1 | 230000,00 | 0,01 | 701,10 | 0,21 | 65,09 | 1,14 | 0,49 | 45 | 255,0 | 655 | 55,62 | 111,25 |
| V20B | 1,00 | 1,40 | 50,00 | 140,0 | 205000,00 | 0,01 | 273,17 | 0,11 | 15,91 | 1,14 | 0,88 | 90 | 255,0 | 100 | 97,52 | 195,04 |
| V22B | 1,00 | 1,40 | 50,00 | 140,0 | 205000,00 | 0,01 | 273,17 | 0,11 | 15,91 | 1,14 | 0,88 | 90 | 255,0 | 100 | 97,52 | 195,04 |
| V21B | 1,00 | 1,40 | 50,00 | 140,0 | 205000,00 | 0,01 | 273,17 | 0,11 | 15,91 | 1,14 | 0,88 | 45 | 255,0 | 141,4 | 97,54 | 195,07 |
| V22A | 1,00 | 1,40 | 50,00 | 140,0 | 205000,00 | 0,01 | 273,17 | 0,11 | 15,91 | 1,14 | 0,88 | 45 | 255,0 | 141,4 | 97,54 | 195,07 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V1G1 | 1,00 | 0,12 | 500,00 | 117,0 | 240000,00 | 0,02 | 324,61 | 0,09 | 61,28 | 1,12 | 0,23 | 90 | 160,0 | 500 | 12,15 | 24,31 |
| V2G1 | 1,00 | 0,12 | 500,00 | 117,0 | 240000,00 | 0,02 | 345,85 | 0,09 | 61,28 | 1,20 | 0,23 | 45 | 160,0 | 500 | 18,31 | 36,62 |
| V1G2 | 1,00 | 0,12 | 750,00 | 175,5 | 240000,00 | 0,02 | 727,31 | 0,20 | 61,28 | 2,15 | 0,27 | 90 | 168,7 | 750 | 28,71 | 57,42 |
| V2G2 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 11,70 | 240000,00 | 0,02 | 960,00 | 0,48 | 61,28 | 2,28 | 0,64 | 90 | 168,7 | 150 | 12,63 | 25,26 |
| V3G2 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 11,70 | 240000,00 | 0,02 | 960,00 | 0,51 | 61,28 | 2,42 | 0,64 | 90 | 168,7 | 150,0 | 12,63 | 25,26 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RC1 | 1,00 | 0,11 | 2000,00 | 440,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,40 | 64,45 | 1,63 | 0,85 | 45 | 439,0 | 2000 | 127,8 | 255,69 |
| C1 | 1,00 | 0,07 | 2000,00 | 280,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,49 | 83,76 | 1,63 | 0,81 | 45 | 439,0 | 2000 | 81,35 | 162,71 |
| C2 | 1,00 | 0,11 | 2000,00 | 440,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,41 | 64,45 | 1,69 | 0,85 | 45 | 439,0 | 2000 | 127,8 | 255,69 |
| C3 | 1,00 | 0,11 | 2000,00 | 440,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,36 | 64,45 | 1,48 | 0,85 | 90 | 439,0 | 2000 | 90,40 | 180,80 |
| C4 | 1,00 | 0,11 | 2000,00 | 440,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,36 | 64,45 | 1,48 | 0,85 | 0 | 439,0 | 2000 | 90,40 | 180,80 |
| C5 | 1,00 | 0,17 | 2000,00 | 660,0 | 234000,00 | 0,02 | 936,00 | 0,34 | 50,94 | 1,69 | 0,88 | 45 | 439,0 | 2000 | 191,7 | 383,53 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BT2 | 1,00 | 0,17 | 1070,00 | 353,1 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,25 | 51,71 | 1,19 | 0,81 | 90 | 266,0 | 1070 | 80,06 | 160,11 |
| BT3 | 1,00 | 0,17 | 1070,00 | 353,1 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,25 | 51,71 | 1,19 | 0,81 | 90 | 266,0 | 1070 | 80,06 | 160,11 |
| BT4 | 1,00 | 0,17 | 50,00 | 16,50 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,25 | 51,71 | 1,19 | 0,81 | 90 | 266,0 | 125 | 32,02 | 64,04 |
| BT5 | 1,00 | 0,17 | 50,00 | 16,50 | 228000,00 | 0,02 | 719,94 | 0,19 | 51,71 | 1,19 | 0,61 | 90 | 266,0 | 125 | 25,28 | 50,56 |
| BT6 | 1,00 | 0,17 | 1070,00 | 353,1 | 228000,00 | 0,02 | 912,00 | 0,25 | 51,71 | 1,19 | 0,81 | 90 | 266,0 | 1070 | 80,06 | 160,11 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 11,70 | 288000,00 | 0,01 | 1152,00 | 0,53 | 55,13 | 1,42 | 0,65 | 90 | 315,8 | 150 | 28,38 | 56,75 |
| V3 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 11,70 | 288000,00 | 0,01 | 1152,00 | 0,54 | 55,13 | 1,43 | 0,65 | 90 | 315,8 | 150 | 28,38 | 56,75 |
| V4 | 1,00 | 0,12 | 50,00 | 11,70 | 288000,00 | 0,01 | 1152,00 | 0,69 | 55,13 | 1,44 | 0,83 | 90 | 315,8 | 150 | 28,38 | 56,75 |
| V5 | 2,00 | 0,12 | 50,00 | 23,40 | 288000,00 | 0,01 | 1110,07 | 0,48 | 36,88 | 1,41 | 0,88 | 90 | 315,8 | 150 | 54,69 | 109,37 |
| V6 | 2,00 | 0,12 | 50,00 | 23,40 | 288000,00 | 0,01 | 1105,31 | 0,48 | 36,88 | 1,40 | 0,88 | 90 | 315,8 | 150 | 54,45 | 108,91 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TR30C2 | 1,00 | 0,17 | 750,00 | 247,5 | 233600,00 | 0,02 | 599,94 | 0,17 | 50,99 | 1,01 | 0,59 | 90 | 250,0 | 750 | 49,50 | 98,99 |
| TR30C3 | 3,00 | 0,17 | 750,00 | 742,5 | 233600,00 | 0,02 | 420,23 | 0,12 | 26,96 | 1,01 | 0,78 | 90 | 250,0 | 750 | 104,0 | 208,01 |
| TR30C4 | 3,00 | 0,17 | 750,00 | 742,5 | 233600,00 | 0,02 | 420,23 | 0,12 | 26,96 | 1,01 | 0,78 | 90 | 250,0 | 750 | 104,0 | 208,01 |
| TR30D10 | 2,00 | 0,17 | 750,00 | 495,0 | 233600,00 | 0,02 | 538,44 | 0,15 | 34,11 | 1,11 | 0,73 | 90 | 250,0 | 750 | 88,84 | 177,69 |
| TR30D2 | 3,00 | 0,17 | 750,00 | 742,5 | 233600,00 | 0,02 | 459,08 | 0,13 | 26,96 | 1,11 | 0,78 | 90 | 250,0 | 750 | 113,6 | 227,24 |
| TR30D20 | 3,00 | 0,17 | 750,00 | 742,5 | 233600,00 | 0,02 | 459,08 | 0,13 | 26,96 | 1,11 | 0,78 | 90 | 250,0 | 750 | 113,6 | 227,24 |
| TR30D3 | 1,00 | 0,17 | 750,00 | 247,5 | 233600,00 | 0,02 | 655,40 | 0,18 | 50,99 | 1,11 | 0,59 | 90 | 250,0 | 750 | 54,07 | 108,14 |
| TR30D4 | 2,00 | 0,17 | 750,00 | 495,0 | 233600,00 | 0,02 | 538,44 | 0,15 | 34,11 | 1,11 | 0,73 | 90 | 250,0 | 750 | 88,84 | 177,69 |
| TR30D40 | 2,00 | 0,17 | 750,00 | 495,0 | 233600,00 | 0,02 | 538,44 | 0,15 | 34,11 | 1,11 | 0,73 | 90 | 250,0 | 750 | 88,84 | 177,69 |

Tabela A.6: Cálculo do cisalhamento com fibra pela CEB-FIB-Bulletin 14 (2001).

| Vigas | tf (mm) | wf (mm) | sf (mm) | bw (mm) | pf (taxa de reforço de FRP) | fc' (MPa) | Ef (Gpa) | efu | efe | d (mm) | θ | α | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|--------------|-------------|--------|---------|-----------|----|----|------------|-------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 44,6 | 228 | 0,017 | 0,00502 | 355,2 | 45 | 90 | 78,70 | 157,39 |
| V3 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 44,6 | 228 | 0,017 | 0,00502 | 355,2 | 45 | 45 | 111,29 | 222,58 |
| V5 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 40 | 228 | 0,017 | 0,00482 | 355,2 | 45 | 90 | 75,56 | 151,12 |
| V6 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 0,00330 | 40 | 228 | 0,017 | 0,00302 | 355,2 | 45 | 90 | 109,01 | 218,02 |
| V7 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 40 | 228 | 0,017 | 0,00482 | 355,2 | 45 | 45 | 106,86 | 213,72 |
| V8 | 0,165 | 150 | 180 | 150 | 0,00183 | 40 | 228 | 0,017 | 0,00420 | 355,2 | 45 | 45 | 119,03 | 238,06 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 41,9 | 228 | 0,017 | 0,006 | 355,2 | 45 | 90 | 94,12 | 188,24 |
| V3 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 0,00330 | 42,2 | 228 | 0,017 | 0,006 | 355,2 | 45 | 90 | 216,47 | 432,95 |
| V5 | 0,165 | 150 | 200 | 150 | 0,00165 | 45,3 | 228 | 0,017 | 0,006 | 355,2 | 45 | 45 | 153,07 | 306,14 |
| V6 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 46,4 | 228 | 0,017 | 0,006 | 355,2 | 45 | 45 | 133,10 | 266,21 |
| V4* | 0,495 | 150 | 200 | 150 | 0,00495 | 43,8 | 228 | 0,017 | 0,00249 | 355,2 | 45 | 90 | 134,79 | 269,58 |
| V7 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 45,3 | 228 | 0,017 | 0,00505 | 355,2 | 45 | 90 | 79,15 | 158,31 |
| V8 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 0,00330 | 45,3 | 228 | 0,017 | 0,00317 | 355,2 | 45 | 90 | 114,19 | 228,38 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 22,5 | 228 | 0,017 | 0,00389 | 355,2 | 45 | 90 | 60,96 | 121,91 |
| V3 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 22,5 | 228 | 0,017 | 0,00389 | 355,2 | 45 | 90 | 60,96 | 121,91 |
| V4 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 0,00330 | 22,5 | 228 | 0,017 | 0,00244 | 355,2 | 45 | 90 | 87,94 | 175,87 |
| V6 | 0,165 | 150 | 230 | 150 | 0,00143 | 45,7 | 228 | 0,017 | 0,006 | 349,3 | 45 | 90 | 92,56 | 185,11 |
| V7 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 0,00330 | 45,8 | 228 | 0,017 | 0,006 | 349,3 | 45 | 90 | 212,88 | 425,76 |
| V8 | 0,165 | 150 | 325 | 150 | 0,00102 | 46,6 | 228 | 0,017 | 0,006 | 349,3 | 45 | 45 | 92,63 | 185,27 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 0,0008 | 25,2 | 231 | 0,017 | 0,0056 | 330 | 45 | 90 | 36,76 | 73,52 |
| V3 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 0,0007 | 24,9 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 32,93 | 65,86 |
| V4 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 0,0005 | 24,8 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 24,70 | 49,39 |
| V5 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 0,0008 | 24,8 | 231 | 0,017 | 0,0055 | 330 | 45 | 90 | 36,54 | 73,08 |
| V6 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 0,0007 | 25 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 32,93 | 65,86 |
| V7 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 0,0005 | 24,9 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 24,70 | 49,39 |
| V8 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 0,0008 | 25 | 231 | 0,017 | 0,0056 | 330 | 45 | 90 | 36,65 | 73,30 |
| V9 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 0,0007 | 25,1 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 32,93 | 65,86 |
| V10 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 0,0005 | 24,6 | 231 | 0,017 | 0,006 | 330 | 45 | 90 | 24,70 | 49,39 |
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | | | | |
| S0-0.12R | 0,11 | 40 | 115 | 160 | 0,00048 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0060 | 350 | 45 | 90 | 33,26 | 50,23 |
| S0-0.17R1 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 0,00069 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0060 | 350 | 45 | 90 | 47,82 | 72,20 |
| S0-0.17R2 | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 0,00138 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0045 | 350 | 45 | 90 | 71,14 | 107,43 |
| S0-0.20R1 | 0,11 | 53 | 87,5 | 160 | 0,00083 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0059 | 350 | 45 | 90 | 57,06 | 86,16 |
| S0-0.20R2 | 0,11 | 30 | 50 | 160 | 0,00083 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0059 | 350 | 45 | 90 | 56,82 | 85,80 |
| S0-0.23R | 0,11 | 87,5 | 125 | 160 | 0,00096 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0055 | 350 | 45 | 90 | 60,81 | 91,82 |
| S0-0.33R | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 0,00138 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0045 | 350 | 45 | 90 | 71,14 | 107,43 |
| S0-0.66R | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 0,00138 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0045 | 350 | 45 | 90 | 71,14 | 107,43 |
| S1-0.17R1 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 0,00069 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0060 | 350 | 45 | 90 | 47,82 | 72,20 |
| S1-0.17R2 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 0,00069 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0060 | 350 | 45 | 90 | 47,82 | 72,20 |
| S1-0.23R | 0,11 | 87,5 | 125 | 160 | 0,00096 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0055 | 350 | 45 | 90 | 60,81 | 91,82 |
| S1-0.33R | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 0,00138 | 31 | 230 | 0,015 | 0,0045 | 350 | 45 | 90 | 71,14 | 107,43 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | | | | | |
| VI-1 | 0,122 | 100 | 225 | 150 | 0,00072 | 51,73 | 255 | 0,1160 | 0,00600 | 360 | 45 | 90 | 53,76 | 107,52 |
| VI-2 | 0,244 | 100 | 225 | 150 | 0,00145 | 51,73 | 255 | 0,1160 | 0,00496 | 360 | 45 | 90 | 88,86 | 177,71 |
| VI-3 | 0,366 | 100 | 225 | 150 | 0,00217 | 52,30 | 255 | 0,1160 | 0,00397 | 360 | 45 | 90 | 106,65 | 213,29 |
| VII-1 | 0,122 | 100 | 225 | 150 | 0,00072 | 50,94 | 255 | 0,1160 | 0,00600 | 360 | 45 | 90 | 53,76 | 107,52 |
| VII-2 | 0,244 | 100 | 225 | 150 | 0,00145 | 51,73 | 255 | 0,1160 | 0,00496 | 360 | 45 | 90 | 88,86 | 177,71 |
| VII-3 | 0,366 | 100 | 225 | 150 | 0,00217 | 52,30 | 255 | 0,1160 | 0,00397 | 360 | 45 | 90 | 106,65 | 213,29 |

| Vigas | tf (mm) | wf (mm) | sf (mm) | bw (mm) | pf (taxa de reforço de FRP) | fc' (MPa) | Ef (Gpa) | efu | efe | d (mm) | θ | α | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|--------------|-------------|--------|---------|-----------|----|----|------------|-------------|
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | | | | |
| V9A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V9B | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V21A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V10A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V10B | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V17A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V11A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V11B | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V17B | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V12A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V18A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V20A | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 0,00073 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 34,84 | 69,68 |
| V12B | 0,11 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00052 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 45 | 34,84 | 69,69 |
| V14B | 0,11 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00052 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 45 | 34,84 | 69,69 |
| V19A | 0,11 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00052 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 45 | 34,84 | 69,69 |
| V19B | 0,11 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00052 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 45 | 34,84 | 69,69 |
| V13A | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0044 | 255 | 45 | 90 | 51,06 | 102,12 |
| V13B | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0044 | 255 | 45 | 90 | 51,06 | 102,12 |
| V15B | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0044 | 255 | 45 | 90 | 51,06 | 102,12 |
| V16B | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0044 | 255 | 45 | 90 | 51,06 | 102,12 |
| V16A | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 69,68 | 139,35 |
| V18B | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00147 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,006 | 255 | 45 | 90 | 69,68 | 139,35 |
| V14A | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00104 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0053 | 255 | 45 | 45 | 61,99 | 123,99 |
| V15A | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 0,00104 | 32,8 | 230 | 0,015 | 0,0053 | 255 | 45 | 45 | 61,99 | 123,99 |
| V20B | 1,4 | 50 | 100 | 150 | 0,00933 | 32,8 | 205 | 0,012 | 0,0017 | 255 | 45 | 90 | 109,57 | 219,14 |
| V22B | 1,4 | 50 | 100 | 150 | 0,00933 | 32,8 | 205 | 0,012 | 0,0017 | 255 | 45 | 90 | 109,57 | 219,14 |
| V21B | 1,4 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00660 | 32,8 | 205 | 0,012 | 0,0020 | 255 | 45 | 45 | 133,05 | 266,10 |
| V22A | 1,4 | 50 | 141,4 | 150 | 0,00660 | 32,8 | 205 | 0,012 | 0,0020 | 255 | 45 | 45 | 133,05 | 266,10 |
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | | | | |
| V1G1 | 0,117 | 500 | 500 | 150 | 0,00156 | 32,1 | 240 | 0,016 | 0,00411 | 160 | 45 | 90 | 33,27 | 66,542 |
| V2G1 | 0,117 | 500 | 500 | 150 | 0,00110 | 35,3 | 240 | 0,016 | 0,00518 | 160 | 45 | 45 | 41,86 | 83,712 |
| V1G2 | 0,117 | 750 | 750 | 150 | 0,00156 | 85,2 | 240 | 0,016 | 0,00592 | 168,7 | 45 | 90 | 50,50 | 101,01 |
| V2G2 | 0,117 | 50 | 150 | 150 | 0,00052 | 93,2 | 240 | 0,016 | 0,006 | 168,7 | 45 | 90 | 17,05 | 34,11 |
| V3G2 | 0,117 | 50 | 150 | 150 | 0,00052 | 101,86 | 240 | 0,016 | 0,006 | 168,7 | 45 | 90 | 17,05 | 34,11 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | | | | |
| RC1 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 0,00086 | 55,94 | 234 | 0,019 | 0,00600 | 439 | 45 | 45 | 122,04 | 244,08 |
| C1 | 0,07 | 2000 | 2000 | 180 | 0,00055 | 55,94 | 234 | 0,019 | 0,00600 | 439 | 45 | 45 | 77,66 | 155,32 |
| C2 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 0,00086 | 59,26 | 234 | 0,019 | 0,00600 | 439 | 45 | 45 | 122,04 | 244,08 |
| C3 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 0,00122 | 48,72 | 234 | 0,019 | 0,00559 | 439 | 45 | 90 | 113,70 | 227,41 |
| C5 | 0,165 | 2000 | 2000 | 180 | 0,00130 | 59,26 | 234 | 0,019 | 0,00582 | 439 | 45 | 45 | 177,54 | 355,08 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | | | | |
| BT2 | 0,165 | 1070 | 1070 | 150 | 0,00220 | 35 | 228 | 0,0166 | 0,00361 | 366 | 45 | 90 | 89,40 | 178,80 |
| BT3 | 0,165 | 1070 | 1070 | 150 | 0,00220 | 35 | 228 | 0,0166 | 0,00361 | 366 | 45 | 90 | 89,40 | 178,80 |
| BT4 | 0,165 | 50 | 125 | 150 | 0,00088 | 35 | 228 | 0,0166 | 0,00600 | 366 | 45 | 90 | 59,48 | 118,96 |
| BT5 | 0,165 | 50 | 125 | 150 | 0,00088 | 35 | 228 | 0,0166 | 0,00600 | 366 | 45 | 90 | 59,48 | 118,96 |
| BT6 | 0,165 | 1070 | 1070 | 150 | 0,00220 | 35 | 228 | 0,0166 | 0,00361 | 366 | 45 | 90 | 89,40 | 178,80 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 0,117 | 50 | 150 | 120 | 0,00065 | 45,84 | 288 | 0,0080 | 0,00485 | 415,8 | 45 | 90 | 40,74 | 81,48 |
| V3 | 0,117 | 50 | 150 | 120 | 0,00065 | 46,23 | 288 | 0,0080 | 0,00485 | 415,8 | 45 | 90 | 40,81 | 81,62 |
| V4 | 0,117 | 50 | 150 | 120 | 0,00065 | 46,8 | 288 | 0,0080 | 0,00487 | 415,8 | 45 | 90 | 40,91 | 81,82 |
| V5 | 0,234 | 50 | 150 | 120 | 0,00130 | 45,12 | 288 | 0,0080 | 0,00392 | 415,8 | 45 | 90 | 65,97 | 131,94 |
| V6 | 0,234 | 50 | 150 | 120 | 0,00130 | 44,83 | 288 | 0,0080 | 0,00392 | 415,8 | 45 | 90 | 65,89 | 131,77 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | | | | |
| TR30C2 | 0,165 | 750 | 750 | 150 | 0,00220 | 27,5 | 233,6 | 0,0152 | 0,00325 | 250 | 45 | 90 | 56,41 | 112,81 |
| TR30C3 | 0,495 | 750 | 750 | 150 | 0,00660 | 27,5 | 233,6 | 0,0152 | 0,00176 | 250 | 45 | 90 | 91,47 | 182,93 |
| TR30C4 | 0,495 | 750 | 750 | 150 | 0,00660 | 27,5 | 233,6 | 0,0152 | 0,00176 | 250 | 45 | 90 | 91,47 | 182,93 |
| TR30D10 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 0,00440 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00232 | 250 | 45 | 90 | 80,41 | 160,81 |
| TR30D2 | 0,495 | 750 | 750 | 150 | 0,00660 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00185 | 250 | 45 | 90 | 96,11 | 192,22 |
| TR30D20 | 0,495 | 750 | 750 | 150 | 0,00660 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00185 | 250 | 45 | 90 | 96,11 | 192,22 |
| TR30D3 | 0,165 | 750 | 750 | 150 | 0,00220 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00342 | 250 | 45 | 90 | 59,27 | 118,54 |
| TR30D4 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 0,00440 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00232 | 250 | 45 | 90 | 80,41 | 160,81 |
| TR30D40 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 0,00440 | 31,4 | 233,6 | 0,0152 | 0,00232 | 250 | 45 | 90 | 80,41 | 160,81 |

Tabela A.7: Cálculo do cisalhamento com fibra pelo Chen e Teng (2003).

| Vigas | f_c' (Mpa) | tf (mm) | wf (mm) | sf (mm) | bw (mm) | β | β_w | h (mm) | d (mm) | dfrp (mm) | dfrp,t (mm) | zb | zt | hfrp,e (mm) | Ef (MPa) | Le (mm) | Lmax (mm) | λ | BL | emax | efu | ffrp (MPa) | Dfr p | tensão max. | ffe (MPa) | Vf (kN) | Puf (kN) |
|----------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------|-----|-----|----------------|-------------|------------|--------------|-----------|----|-------|------|---------------|----------|----------------|--------------|------------|-------------|
| Salles Neto (2000) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 44,6 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 75,05 | 219,6 | 2,93 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,87 | 1171,59 | 1026,1 | 48,51 | 97,03 |
| V3 | 44,6 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 45 | 0,74 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 75,05 | 310,6 | 4,14 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,91 | 971,23 | 885,97 | 59,24 | 118,4 |
| V5 | 40 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 77,12 | 219,6 | 2,85 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,87 | 1140,14 | 994,68 | 47,03 | 94,06 |
| V6 | 40 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 109,07 | 219,6 | 2,01 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,82 | 754,38 | 618,27 | 67,23 | 134,4 |
| V7 | 40 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 45 | 0,74 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 77,12 | 310,6 | 4,03 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,91 | 945,15 | 859,89 | 57,49 | 114,9 |
| V8 | 40 | 0,17 | 150 | 180 | 150 | 45 | 0,61 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 21968 | 228000 | 77,12 | 310,6 | 4,03 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3876 | 0,91 | 775,16 | 705,23 | 60,25 | 120,5 |
| Silva Filho (2001) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 41,9 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 0 | 320 | 0 | 319,6 | 228000 | 76,24 | 319,6 | 4,19 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,91 | 2736,00 | 2498,9 | 171,9 | 343,8 |
| V3 | 42,2 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 355,2 | 400 | 0 | 320 | 0 | 319,6 | 228000 | 107,62 | 319,6 | 2,97 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 2736,00 | 2401,3 | 379,9 | 759,9 |
| V5 | 45,3 | 0,17 | 150 | 200 | 150 | 45 | 0,67 | 400 | 355,2 | 400 | 0 | 320 | 0 | 319,6 | 228000 | 74,76 | 452,1 | 6,05 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,94 | 2736,00 | 2571,5 | 287,7 | 575,4 |
| V6 | 46,4 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 45 | 0,74 | 400 | 355,2 | 400 | 0 | 320 | 0 | 319,6 | 228000 | 74,32 | 452,1 | 6,08 | 1 | 0,015 | 0,07 | 3480 | 0,94 | 2736,00 | 2572,5 | 250,3 | 500,6 |
| V4* | 43,8 | 0,5 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 130,59 | 219,6 | 1,68 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,78 | 630,08 | 493,98 | 80,57 | 161,1 |
| V7 | 45,3 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 74,76 | 219,6 | 2,94 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1176,16 | 1030,7 | 48,73 | 97,46 |
| V8 | 45,3 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 105,73 | 219,6 | 2,08 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,83 | 778,21 | 642,11 | 69,82 | 139,6 |
| Araújo (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 22,5 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 89,06 | 219,6 | 2,47 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,85 | 987,39 | 841,94 | 39,81 | 79,61 |
| V3 | 22,5 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 89,06 | 219,6 | 2,47 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,85 | 987,39 | 841,94 | 39,81 | 79,61 |
| V4 | 22,5 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 355,2 | 400 | 100 | 320 | 100 | 219,6 | 228000 | 125,94 | 219,6 | 1,74 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,79 | 653,31 | 517,21 | 56,24 | 112,4 |
| V6 | 45,7 | 0,17 | 150 | 230 | 150 | 90 | 0,90 | 400 | 349,3 | 400 | 0 | 314 | 0 | 314,3 | 228000 | 74,60 | 314,3 | 4,21 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,91 | 2736,00 | 2500,0 | 169,1 | 338,3 |
| V7 | 45,8 | 0,33 | 150 | 200 | 150 | 90 | 0,84 | 400 | 349,3 | 400 | 0 | 314 | 0 | 314,3 | 228000 | 105,44 | 314,3 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 2736,00 | 2402,5 | 373,8 | 747,7 |
| V8 | 46,6 | 0,17 | 150 | 325 | 150 | 45 | 0,90 | 400 | 349,3 | 400 | 0 | 314 | 0 | 314,3 | 228000 | 74,24 | 444,5 | 5,99 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,94 | 2736,00 | 2569,9 | 174,0 | 348,0 |
| Altin et. al (2010) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 25,2 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 90 | 1,06 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,31 | 222 | 2,99 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1419,02 | 1246,4 | 26,56 | 53,13 |
| V3 | 24,9 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,11 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,53 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1479,61 | 1299,1 | 23,07 | 46,14 |
| V4 | 24,8 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 90 | 1,18 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,61 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1564,30 | 1373,2 | 18,29 | 36,58 |
| V5 | 24,8 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 90 | 1,06 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,61 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1413,36 | 1240,7 | 26,44 | 52,89 |
| V6 | 25 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,11 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,46 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1481,10 | 1300,5 | 23,10 | 46,20 |
| V7 | 24,9 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 90 | 1,18 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,53 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1565,88 | 1374,8 | 18,31 | 36,63 |
| V8 | 25 | 0,12 | 50 | 125 | 120 | 90 | 1,06 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,46 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1416,20 | 1243,6 | 26,50 | 53,01 |
| V9 | 25,1 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,11 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,38 | 222 | 2,98 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1482,58 | 1302,0 | 23,12 | 46,25 |
| V10 | 24,6 | 0,12 | 50 | 200 | 120 | 90 | 1,18 | 360 | 330 | 360 | 75 | 297 | 75 | 222 | 231000 | 74,76 | 222 | 2,97 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1561,14 | 1370,1 | 18,25 | 36,50 |

| Vigas | fc' (Mpa) | tf (mm) | wf (mm) | sf (mm) | bw (mm) | β | βw | h (mm) | d (mm) | dfrrp (mm) | dfrrp,t (mm) | zb | zt | hfrp,e (mm) | Ef (MPa) | Le (mm) | Lmax (mm) | λ | βL | emax | efu | frrp (MPa) | Dfr p | tensão max. | ffe (MPa) | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|----|------|--------|--------|------------|--------------|-----|-----|-------------|----------|---------|-----------|------|------|-------|------|------------|-------|-------------|-----------|---------|----------|
| Mofidi e Chaallal (2011) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S0-0.12R | 31 | 0,11 | 40 | 115 | 160 | 90 | 1,10 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1613,046 | 1427,5 | 23,27 | 35,13 |
| S0-0.17R1 | 31 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 90 | 1,00 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1456,921 | 1289,3 | 30,21 | 45,62 |
| S0-0.17R2 | 31 | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 90 | 0,71 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1030,20 | 911,72 | 42,72 | 64,51 |
| S0-0.20R1 | 31 | 0,11 | 53 | 87,5 | 160 | 90 | 0,93 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1357,618 | 1201,4 | 34,10 | 51,50 |
| S0-0.20R2 | 31 | 0,11 | 30 | 50 | 160 | 90 | 0,93 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1362,824 | 1206,1 | 33,91 | 51,21 |
| S0-0.23R | 31 | 0,11 | 87,5 | 125 | 160 | 90 | 0,87 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1274,040 | 1127,5 | 36,99 | 55,85 |
| S0-0.33R | 31 | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 90 | 0,71 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1030,20 | 911,72 | 42,72 | 64,51 |
| S0-0.66R | 31 | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 90 | 0,71 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1030,20 | 911,72 | 42,72 | 64,51 |
| S1-0.17R1 | 31 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 90 | 1,00 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1456,921 | 1289,3 | 30,21 | 45,62 |
| S1-0.17R2 | 31 | 0,11 | 87,5 | 175 | 160 | 90 | 1,00 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1456,921 | 1289,3 | 30,21 | 45,62 |
| S1-0.23R | 31 | 0,11 | 87,5 | 125 | 160 | 90 | 0,87 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1274,040 | 1127,5 | 36,99 | 55,85 |
| S1-0.33R | 31 | 0,11 | 1000 | 1000 | 160 | 90 | 0,71 | 406 | 350 | 406 | 102 | 315 | 102 | 213 | 230000 | 67,41 | 213 | 3,16 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3480 | 0,88 | 1030,20 | 911,72 | 42,72 | 64,51 |
| Beber (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V9A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 114,7 | 1,73 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,79 | 1477,62 | 1166,6 | 29,45 | 58,90 |
| V9B | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 114,7 | 1,73 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,79 | 1477,62 | 1166,6 | 29,45 | 58,90 |
| V21A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 114,7 | 1,73 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,79 | 1477,62 | 1166,6 | 29,45 | 58,90 |
| V10A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V10B | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V17A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V11A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V11B | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V17B | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1477,62 | 1322,1 | 33,38 | 66,75 |
| V12A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 2720,00 | 2433,7 | 61,44 | 122,8 |
| V18A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 2720,00 | 2433,7 | 61,44 | 122,8 |
| V20A | 32,8 | 0,11 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 2720,00 | 2433,7 | 61,44 | 122,8 |
| V12B | 32,8 | 0,11 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 162,2 | 2,44 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,85 | 1477,55 | 1257,6 | 31,75 | 63,51 |
| V14B | 32,8 | 0,11 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 162,2 | 2,44 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,85 | 1477,55 | 1257,6 | 31,75 | 63,51 |
| V19A | 32,8 | 0,11 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 324,5 | 4,88 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,93 | 1477,55 | 1367,6 | 34,53 | 69,06 |
| V19B | 32,8 | 0,11 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 324,5 | 4,88 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,93 | 1477,55 | 1367,6 | 34,53 | 69,06 |
| V13A | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 114,7 | 1,73 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,79 | 1044,84 | 824,93 | 41,65 | 83,30 |
| V13B | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 114,7 | 1,73 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,79 | 1044,84 | 824,93 | 41,65 | 83,30 |
| V15B | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1044,84 | 934,88 | 47,20 | 94,40 |
| V16B | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 1044,84 | 934,88 | 47,20 | 94,40 |
| V16A | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 2720,00 | 2433,7 | 122, | 245,7 |
| V18B | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 90 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 229,5 | 3,45 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,89 | 2720,00 | 2433,7 | 122,8 | 245,7 |
| V14A | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 45 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 162,2 | 2,44 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,85 | 1044,84 | 889,34 | 63,50 | 127,0 |
| V15A | 32,8 | 0,11 | 655 | 655 | 150 | 45 | 0,71 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 230000 | 66,465 | 162,2 | 2,44 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3400 | 0,85 | 1044,84 | 889,34 | 63,50 | 127,0 |
| V20B | 32,8 | 1,4 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 205000 | 223,86 | 114,7 | 0,51 | 0,72 | 0,015 | 0,01 | 2500 | 0,53 | 281,92 | 149,10 | 47,91 | 95,81 |
| V22B | 32,8 | 1,4 | 50 | 100 | 150 | 90 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 205000 | 223,86 | 114,7 | 0,51 | 0,72 | 0,015 | 0,01 | 2500 | 0,53 | 281,92 | 149,10 | 47,91 | 95,81 |
| V21B | 32,8 | 1,4 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 205000 | 223,86 | 162,2 | 0,72 | 0,91 | 0,015 | 0,01 | 2500 | 0,56 | 355,07 | 199,58 | 64,14 | 128,2 |
| V22A | 32,8 | 1,4 | 50 | 141 | 150 | 45 | 1,00 | 300 | 255 | 300 | 0 | 230 | 0 | 229,5 | 205000 | 223,86 | 162,2 | 0,72 | 0,91 | 0,015 | 0,01 | 2500 | 0,56 | 355,07 | 199,58 | 64,14 | 128,2 |

| Vigas | f_c' (Mpa) | tf (mm) | wf (mm) | sf (mm) | bw (mm) | β | β_w | h (mm) | d (mm) | dfrp (mm) | dfrp,t (mm) | zb | zt | hfrp,e (mm) | Ef (MPa) | Le (mm) | Lmax (mm) | λ | β_L | emax | efu | frrp (MPa) | Dfr p | tensão max. | ffe (MPa) | Vf (kN) | Puf (kN) |
|---------------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------|-----|-----|----------------|-------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------|------|---------------|----------|----------------|--------------|------------|-------------|
| Galvez (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V1G1 | 32,1 | 0,12 | 500 | 500 | 150 | 90 | 0,71 | 200 | 160 | 200 | 0 | 144 | 0 | 144 | 240000 | 70,4 | 72,00 | 1,02 | 1 | 0,016 | 0,01 | 3720 | 0,64 | 1029,32 | 663,60 | 22,36 | 44,72 |
| V2G1 | 35,3 | 0,12 | 500 | 500 | 150 | 45 | 0,71 | 200 | 160 | 200 | 0 | 144 | 0 | 144 | 240000 | 68,747 | 101,8 | 1,48 | 1 | 0,016 | 0,01 | 3720 | 0,75 | 1054,07 | 795,46 | 37,91 | 75,81 |
| V1G2 | 85,2 | 0,12 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 200 | 168,7 | 200 | 0 | 152 | 0 | 151,8 | 240000 | 55,155 | 75,92 | 1,38 | 1 | 0,016 | 0,01 | 3720 | 0,74 | 1313,82 | 966,96 | 34,35 | 68,71 |
| V2G2 | 93,2 | 0,12 | 50 | 150 | 150 | 90 | 1,12 | 200 | 168,7 | 200 | 0 | 152 | 0 | 151,8 | 240000 | 53,932 | 151,8 | 2,82 | 1 | 0,016 | 0,01 | 3720 | 0,87 | 2124,46 | 1850,2 | 21,91 | 43,82 |
| V3G2 | 101,9 | 0,12 | 50 | 150 | 150 | 90 | 1,12 | 200 | 168,7 | 200 | 0 | 152 | 0 | 151,8 | 240000 | 52,747 | 151,8 | 2,88 | 1 | 0,016 | 0,01 | 3720 | 0,87 | 2172,18 | 1897,9 | 22,48 | 44,95 |
| Täljsten (2003) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RC1 | 55,94 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 45 | 0,71 | 500 | 439 | 500 | 0 | 395 | 0 | 395,1 | 234000 | 58,66 | 279,3 | 4,76 | 1 | 0,019 | 0,01 | 4446 | 0,92 | 1204,36 | 1112,4 | 136,7 | 273,5 |
| C1 | 55,94 | 0,07 | 2000 | 2000 | 180 | 45 | 0,71 | 500 | 439 | 500 | 0 | 395 | 0 | 395,1 | 234000 | 46,80 | 279,3 | 5,97 | 1 | 0,019 | 0,01 | 4446 | 0,94 | 1509,74 | 1417,8 | 110,9 | 221,8 |
| C2 | 59,26 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 45 | 0,71 | 500 | 439 | 500 | 0 | 395 | 0 | 395,1 | 234000 | 57,82 | 279,3 | 4,83 | 1 | 0,019 | 0,01 | 4446 | 0,92 | 1221,84 | 1129,9 | 138,9 | 277,8 |
| C3 | 48,72 | 0,11 | 2000 | 2000 | 180 | 90 | 0,71 | 500 | 439 | 500 | 0 | 395 | 0 | 395,1 | 234000 | 60,73 | 197,5 | 3,25 | 1 | 0,019 | 0,01 | 4446 | 0,89 | 1163,46 | 1033,5 | 89,83 | 179,6 |
| C5 | 59,26 | 0,17 | 2000 | 2000 | 180 | 45 | 0,71 | 500 | 439 | 500 | 0 | 395 | 0 | 395,1 | 234000 | 70,82 | 279,3 | 3,94 | 1 | 0,019 | 0,01 | 4446 | 0,91 | 997,63 | 905,73 | 167,0 | 334,0 |
| Khalifa & Nanni (2000) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BT2 | 35 | 0,17 | 1070 | 1070 | 150 | 90 | 0,71 | 405 | 366 | 405 | 100 | 329 | 100 | 229,4 | 228000 | 79,74 | 229,4 | 2,88 | 1 | 0,017 | 0,01 | 3790 | 0,87 | 863,29 | 754,24 | 57,10 | 114,1 |
| BT3 | 35 | 0,17 | 1070 | 1070 | 150 | 90 | 0,71 | 405 | 366 | 405 | 100 | 329 | 100 | 229,4 | 228000 | 79,74 | 229,4 | 2,88 | 1 | 0,017 | 0,01 | 3790 | 0,87 | 863,29 | 754,24 | 57,10 | 114,1 |
| BT4 | 35 | 0,17 | 50 | 125 | 150 | 90 | 1,07 | 405 | 366 | 405 | 100 | 329 | 100 | 229,4 | 228000 | 79,74 | 229,4 | 2,88 | 1 | 0,017 | 0,01 | 3790 | 0,87 | 1305,17 | 1140,3 | 34,53 | 69,06 |
| BT5 | 35 | 0,17 | 50 | 125 | 150 | 90 | 1,07 | 405 | 366 | 405 | 100 | 329 | 100 | 229,4 | 228000 | 79,74 | 114,7 | 1,44 | 1 | 0,017 | 0,01 | 3790 | 0,75 | 1305,17 | 975,44 | 29,54 | 59,07 |
| BT6 | 35 | 0,17 | 1070 | 1070 | 150 | 90 | 0,71 | 405 | 366 | 405 | 100 | 329 | 100 | 229,4 | 228000 | 79,74 | 229,4 | 2,88 | 1 | 0,017 | 0,01 | 3790 | 0,87 | 863,29 | 754,24 | 57,10 | 114,1 |
| Gallardo (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V2 | 45,84 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,12 | 460 | 415,8 | 460 | 100 | 374 | 100 | 274,2 | 288000 | 70,55 | 137,1 | 1,94 | 1 | 0,008 | 0,01 | 2310,9 | 0,81 | 1848,72 | 1503,0 | 32,15 | 64,30 |
| V3 | 46,23 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,12 | 460 | 415,8 | 460 | 100 | 374 | 100 | 274,2 | 288000 | 70,40 | 137,1 | 1,95 | 1 | 0,008 | 0,01 | 2310,9 | 0,81 | 1848,72 | 1503,8 | 32,16 | 64,33 |
| V4 | 46,8 | 0,12 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,12 | 460 | 415,8 | 460 | 100 | 374 | 100 | 274,2 | 288000 | 70,18 | 274,2 | 3,91 | 1 | 0,008 | 0,01 | 2310,9 | 0,91 | 1848,72 | 1676,7 | 35,87 | 71,73 |
| V5 | 45,12 | 0,23 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,12 | 460 | 415,8 | 460 | 100 | 374 | 100 | 274,2 | 288000 | 100,16 | 274,2 | 2,74 | 1 | 0,008 | 0,01 | 2310,9 | 0,87 | 1372,66 | 1190,4 | 50,93 | 101,8 |
| V6 | 44,83 | 0,23 | 50 | 150 | 120 | 90 | 1,12 | 460 | 415,8 | 460 | 100 | 374 | 100 | 274,2 | 288000 | 100,33 | 274,2 | 2,73 | 1 | 0,008 | 0,01 | 2310,9 | 0,87 | 1370,45 | 1188,2 | 50,83 | 101,6 |
| Pellegrino & Modena (2002) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TR30C2 | 27,5 | 0,17 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 85,73 | 112,5 | 1,31 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,72 | 822,70 | 594,88 | 44,17 | 88,34 |
| TR30C3 | 27,5 | 0,5 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 148,49 | 112,5 | 0,76 | 0,93 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,57 | 440,97 | 250,81 | 55,87 | 111,7 |
| TR30C4 | 27,5 | 0,5 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 148,49 | 112,5 | 0,76 | 0,93 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,57 | 440,97 | 250,81 | 55,87 | 111,7 |
| TR30D10 | 31,4 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 117,29 | 112,5 | 0,96 | 1,00 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,62 | 600,11 | 373,54 | 55,47 | 110,9 |
| TR30D2 | 31,4 | 0,5 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 143,65 | 112,5 | 0,78 | 0,94 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,57 | 462,79 | 265,79 | 59,20 | 118,4 |
| TR30D20 | 31,4 | 0,5 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 143,65 | 112,5 | 0,78 | 0,94 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,57 | 462,79 | 265,79 | 59,20 | 118,4 |
| TR30D3 | 31,4 | 0,17 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 82,94 | 112,5 | 1,36 | 1 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,73 | 850,43 | 622,61 | 46,23 | 92,46 |
| TR30D4 | 31,4 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 117,29 | 112,5 | 0,96 | 1,00 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,62 | 600,11 | 373,54 | 55,47 | 110,9 |
| TR30D40 | 31,4 | 0,33 | 750 | 750 | 150 | 90 | 0,71 | 285 | 250 | 285 | 0 | 225 | 0 | 225 | 233600 | 117,29 | 112,5 | 0,96 | 1,00 | 0,015 | 0,01 | 3550 | 0,62 | 600,11 | 373,54 | 55,47 | 110,9 |
| Spagnolo et al. (2013) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VI-1 | 51,73 | 0,12 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 65,77 | 244,0 | 3,71 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,90 | 1718,09 | 1549,8 | 41,01 | 82,02 |
| VI-2 | 51,73 | 0,24 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 93,01 | 244,0 | 2,62 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,86 | 1214,87 | 1046,5 | 55,39 | 110,7 |
| VI-3 | 52,3 | 0,37 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 113,60 | 244,0 | 2,15 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,83 | 994,66 | 826,38 | 65,60 | 131,2 |
| VII-1 | 50,94 | 0,12 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 66,02 | 244,0 | 3,70 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,90 | 1711,49 | 1543,2 | 40,83 | 81,67 |
| VII-2 | 51,73 | 0,24 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 93,01 | 244,0 | 2,62 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,86 | 1214,87 | 1046,5 | 55,39 | 110,7 |
| VII-3 | 52,3 | 0,37 | 100 | 225 | 150 | 90 | 1,04 | 400 | 360 | 400 | 80 | 324 | 80 | 244 | 255000 | 113,60 | 244,0 | 2,15 | 1 | 255 | 0,11 | 29580 | 0,83 | 994,66 | 826,38 | 65,60 | 131,2 |

