

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Curso de Engenharia Civil
Projeto Final II

**ANÁLISE E PREVISÃO DE CARGA PARA VIGAS-
PAREDE COM FURO REFORÇADAS UTILIZANDO O
MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES**

Autor: CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA LEITE

Orientador: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

Co-orientador: VLADIMIR VILLAVERDE BARBÁN

Brasília, DF

2021



CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA LEITE

**TÍTULO: ANÁLISE E PREVISÃO DE CARGA PARA VIGAS-PAREDE COM FURO
REFORÇADAS UTILIZANDO O MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Dr. Rodrigo de Melo Lameiras

Co-orientador: Dr. Vladimir Villaverde Barbán

Brasília, DF

2021

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

LEITE, CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA.

Título da Monografia: ANÁLISE E PREVISÃO DE CARGA PARA VIGAS-PAREDE COM FURO REFORÇADAS UTILIZANDO O MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES/ CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA LEITE). Brasília: UnB, 2021. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2020. Orientação: Dr. Rodrigo de Melo Lameiras.

1. Vigas-Parede. 2. Método de Bielas e Tirantes. 3. Reforço de CFRP.

CDU Classificação

**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**

CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA LEITE

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia - FT, da Universidade de Brasília, em (data: 21/05/2021) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. (Dr.): Rodrigo de Melo Lameiras, UnB

Orientador

Prof. (Dr.): Vladimir Villaverde Barbán, UnB

Co-orientador

Prof. (Dr.): Antônio Carlos Oliveira Miranda, UnB

Examinador Interno

M.^a: Izabel Castro de Abreu Neta, UnB

Examinador Externo

Brasília, DF
2021

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. DEFINIÇÃO E USO DE VIGAS-PAREDE.....	3
2.2. MODOS DE RUPTURA DE VIGAS-PAREDE	3
2.2.1. RUPTURA POR FLEXÃO	4
2.2.2. RUPTURA POR CISALHAMENTO	4
2.2.2.1. RUPTURA POR TRAÇÃO DIAGONAL.....	5
2.2.2.2. RUPTURA POR COMPRESSÃO DIAGONAL.....	5
2.2.2.3. RUPTURA LOCAL	6
2.3. VIGAS-PAREDE COM FURO	6
2.3.1. ASPECTOS NORMATIVOS.....	7
2.3.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE VIGAS-PAREDE.....	8
2.3.3. VIGAS-PAREDE REFORÇADAS.....	12
2.4. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES	19
2.4.1. ELEMENTOS DA TRELIÇA	20
2.4.1.1. BIELAS.....	21
2.4.1.2. TIRANTES.....	24
2.4.1.3. ZONA NODAL	25
2.4.2. ESTUDOS COM VIGAS PAREDE COM FURO QUE UTILIZARAM O MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES	28
2.4.3. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES EM VIGAS PAREDE REFORÇADAS COM CFRP	31
2.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	Erro! Indicador não definido.
2.6. FORCEPAD e CAST	34
3. METODOLOGIA.....	36
3.1. INSERÇÃO DO REFORÇO NO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES.....	39
4. PERSPECTIVA DE ANÁLISE - MODELAGEM DAS VIGAS, COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR NETA (2019) E PERSPECTIVA DE GANHO DE RESISTÊNCIA PARA AS VIGAS REFORÇADAS	39
4.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	39

4.2. DB –H1	40
4.2.1. DB-NR-H1	42
4.2.2. DB -NR-H1-S	48
4.2.3. DB-WR-H1	51
4.2.4. DB-WR-H1-S	55
4.3. DB –H2	60
5. CONCLUSÃO	84
6. BIBLIOGRAFIA	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede com furos.	1
Quadro 2. 2 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede com furos reforçadas.....	18
Quadro 2. 3 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede por meio do método das bielas e tirantes.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Principais tipos de geometrias e seus respectivos Graus de Complexidade Geométrica. Adaptado de Vieira (2018).	10
Tabela 2. 2– Propriedades mecânicas do concreto do estudo preliminar de Neta (2019).	17
Tabela 2. 3 - Propriedades mecânicas do aço do estudo preliminar de Neta (2019).	17
Tabela 2. 4 – Limites inferior e superior para o ângulo formado entre as diagonais comprimidas e a armadura longitudinal da viga.	23
Tabela 2. 5 – Valores do coeficiente da zona nodal β_n	27

Tabela 4. 1– Resistência média dos materiais e nós. Fonte: autor.....	39
Tabela 4. 2 - Propriedades do reforço de CFRP (NETA, 2019).	40
Tabela 4. 3 – Propriedades dos nós. Fonte: autor.	41
Tabela 4. 4 - Propriedades geométricas das barras. Fonte: autor.....	42
Tabela 4. 5 – Fatores de utilização das barras da treliça da viga DB-H1-NR. Fonte: autor....	44
Tabela 4. 6– Fatores de utilização dos nós da viga DB-H1-NR. Fonte: autor.....	46
Tabela 4. 7 –Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H1-NR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.	47
Tabela 4. 8 –Fatores de utilização das bielas e tirantes da viga DB-H1-NR-S. Fonte: autor. .	48
Tabela 4. 9 -- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H1-NR-S. Fonte: autor.	50
Tabela 4. 10 - Comparativo entre os modelos das vigas DB-H1-NR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.	51
Tabela 4. 11 – Fatores de utilização das barras da treliça. Fonte: autor.	53
Tabela 4. 12 – Fatores de utilização dos nós da viga DB-H1-WR. Fonte: autor.....	54
Tabela 4. 13 - Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H1-WR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.	55
Tabela 4. 14 – Fatores de utilização de bielas e tirantes da viga DB-H1-WR-S. Fonte: autor.	57
Tabela 4. 15- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-WR-H1-S. Fonte: autor.	59
Tabela 4. 16 - Comparativo entre os modelos das vigas DB-H1-WR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.	60
Tabela 4. 17 – Propriedades dos nós da viga DB-H2. Fonte: autor.....	62
Tabela 4. 18 - Propriedades geométricas das barras da treliça da viga DB-H2. Fonte:autor. .	63
Tabela 4. 19- Fatores de utilização das barras da treliça da viga DB-H2-NR. Fonte: autor....	65
Tabela 4. 20 - Fatores de utilização dos nós do modelo da viga DB-H2-NR. Fonte: autor. ...	66
Tabela 4. 21.- Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H2-NR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.	68
Tabela 4. 22 - Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-NR-S. Fonte: autor.....	70
Tabela 4. 23- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-NR-S. Fonte: autor.....	72
Tabela 4. 24- Comparativo entre os modelos das vigas DB-H2-NR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.	73
Tabela 4. 25 – Fatores de utilização das barras da treliça da viga-parede DB-H2-WR. Fonte: autor.	76
Tabela 4. 26 - Fatores de utilização dos nós da viga DB-H2-WR. Fonte: autor.	77

Tabela 4. 27- Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H2-WR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.	79
Tabela 4. 28 - Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-WR-S. Fonte: autor.	80
Tabela 4. 29- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-WR-S. Fonte: autor.	82
Tabela 4. 30- Comparativo entre os modelos das vigas DB-H2-WR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sequência de aparição das fissuras com o aumento da carga na falha por flexão.	4
Figura 2. 2 - Ruptura por tração diagonal em viga biapoiada.....	5
Figura 2. 3 - Ruptura por compressão diagonal em uma viga biapoiada.....	6
Figura 2.4 - Ruptura local próximo dos apoios e dos pontos de aplicação de carga.	6
Figura 2. 5 - Vigas-parede em edificações :(a) viga-parede sem abertura; (b) vigas-parede com furo e reentrância (VIEIRA, 2018).	7
Figura 2. 6 - Abertura em vigas-parede (NBR 6118-ABNT,2014).	8
Figura 2. 7 - Padrão de fissuras do modelo real versus grau de tensão no método dos elementos finitos. Adaptado de Ibrahim <i>et al</i> (2018).....	9
Figura 2. 8- Geometrias das vigas-parede (unidades em milímetros) de Neta (2019). Fonte: Neta (2019).	14
Figura 2. 9 – Fluxograma da nomenclatura das vigas estudadas (NETA, 2019).....	15
Figura 2. 10 – Detalhamento das armaduras DB-NR-H1-NA (dimensões em mm). Neta (2019).	15
Figura 2. 11 – Detalhamento das armaduras DB-WR-H1-NA (dimensões em mm). Neta (2019).	15
Figura 2. 12 - Detalhamento das armaduras DB-NR-H2-NA (dimensões em mm). Neta (2019).	16
Figura 2. 13 - Detalhamento das armaduras DB-WR-H2-NA (dimensões em mm). Neta (2019).	16
Figura 2. 14– Detalhamento do reforço ao cisalhamento/flexão das vigas DB-H1-S e DB-H2-S(unidade em milímetros). Adaptado de Neta (2019).	16
Figura 2. 15 - Analogia da treliça clássica no método das bielas e tirantes (AGUIAR , 2018).	19
Figura 2. 16 - Pórtico com regiões do tipo B e D (SCHLAICH, SCHÄFER e JENNEWEIN, 1987).	20
Figura 2.17- Modelo de bielas e tirantes com todos elementos da treliça. Adaptado de (BIRRCHE, TUCHSCHERER, <i>et al.</i> , 2009).....	21
Figura 2.18 - Biela em forma de garrafa. Adaptado de Nilson, Darwin e Dolan (2010).....	21
Figura 2.19 - Classificação dos nós. Adaptado de Nilson, Darwin e Donlan (2010).	25
Figura 2.20 - Mecânica dos nós. Adaptado de Brown, Sankovich, <i>et al</i> (2006).	26
Figura 2. 21 – Determinação da biela, tirante e zona nodal. Adaptado de Nilson, Darwin e Donlan (2010).	27
Figura 2. 22 - Mecanismo proposto de transferência de cargas. Adaptado de Dhahir (2018).31	
Figura 2. 23 - Diferentes tipos de orientações de CFRP previstos nas equações de Dhahir (2018). Adaptado de Dhahir (2018).....	32
Figura 2. 24 – Tela principal do software ForcePAD ilustrando as tensões principais de uma viga-parede. Fonte: autor.	34
Figura 2. 25 – Passo-a-passo da modelagem no CAST. Adaptado de (SANTOS, 2006). Erro! Indicador não definido.	
Figura 3. 1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	38
Figura 4. 1 – Tensões principais na viga DB-H1. Fonte: autor.	40

Figura 4. 2 - Modelo de Bielas e Tirantes da viga-parede DB-H1. Fonte: autor.....	41
Figura 4. 3 – Comparativo entre o modelo DB-H1 e a armação da viga DB-H1-NR de Neta (2019).....	43
Figura 4. 4 - Forças nas barras da treliça DB-H1-NR.....	44
Figura 4. 5 - Modo de Ruptura das duas vigas DB-H1-NR. Adaptado de Neta (2019).	47
Figura 4. 6 – Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga DB-H1-NR-S. Fonte: autor.	48
Figura 4. 7 – Comparativo entre o modelo de bielas e tirantes DB-H1 e a armação da viga DB-H1-WR de Neta (2019).....	52
Figura 4. 8 –Forças nas barras da treliça DB-H1-WR. Fonte: autor.....	52
Figura 4. 9 – Modo de ruptura das vigas DB-H1-WR de (Neta 2019).....	55
Figura 4. 10 – Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga-parede DB-H1-WR-S. Fonte: autor.	56
Figura 4. 11 - Tensões principais na viga DB-H2. Fonte: autor.	61
Figura 4. 12 - Modelo de bielas e tirantes da viga-parede DB-H2. Fonte: autor.....	61
Figura 4. 13 – Comparativo entre o modelo DB-H2 e o detalhamento de armação da viga DB-H2-NR de Neta (2019).....	64
Figura 4. 14 - Força máxima nas barras da treliça DB-H2-NR. Fonte: autor.....	64
Figura 4. 15 – Modo de ruptura das duas vigas DB-H2-NR de Neta (2019).	68
Figura 4. 16 - Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga DB-H2-NR-S. Fonte: autor.	69
Figura 4. 17- – Comparativo entre o modelo de bielas e tirantes DB-H2 e a armação da viga DB-H2-WR de Neta (2019).	74
Figura 4. 18 - Forças nas barras da treliça DB-H2-WR. Fonte: autor.	75
Figura 4. 19 – Modo de ruptura das vigas DB-WR-H2 de Neta (2019).....	78
Figura 4. 20 - Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga-parede DB-WR-H2-S. Fonte: autor.	80

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f – Área de CFRP ao longo do vão da viga-parede;

A_{sr} – Área da seção transversal do reforço de tiras de CFRP;

β_n - Coeficiente de minoração da zona nodal;

ϵ_{ymedio} – Deformação específica média de escoamento do aço;

f_{cd} - Resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{cd1} – Tensão resistente máxima do concreto em nós onde confluem somente bielas de compressão (nós CCC);

f_{cd2} – Tensão resistente máxima no concreto em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados (nós CTT ou TTT);

f_{cd3} – Tensão resistente máxima no concreto em nós onde conflui um tirante tracionado (nós CCT));

f_{ce} – Resistência à compressão efetiva;

f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto;

f_{ef} – Tensão efetiva;

f_{res} – Tensão resistente;

f_{cmedio} – Resistência à compressão média do concreto;

$f_{ctmedio}$ – Resistência média à tração do concreto;

$f_{ysmedio}$ – Tensão de escoamento média do aço;

f_{yd} – Resistência ao escoamento do aço de armadura passiva de projeto;

f'_c - Resistência a compressão na zona nodal do concreto;

c – cobrimento do concreto;

l_a – Comprimento de ancoragem;

l_b – Espessura do apoio;

w_s – Espessura da biela;

w_t – Espessura do tirante considerado na interface da zona nodal;

$\sigma_{Rd,max}$ - Tensão normal resistente de cálculo máxima;

θ – Inclinação da biela inclinada;

f'_s - Tensão de escoamento característica do aço;

ϕ - Fator de redução de resistência;

A_s - Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;

A'_s - Área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão;

A_{cs} – Área da seção transversal da biela;

A_{nz} – Área da seção transversal da zonal perpendicular à linha de ação da força resultante na seção;

E_{cmedio} – Módulo de Elasticidade médio do concreto;

E_{smedio} – Módulo de elasticidade média longitudinal do aço;

E_f -Módulo de elasticidade das tiras de CFRP;

F_{nn} - Resistência à compressão nominal da zona nodal;

F_{ns} - Carga resistente das bielas;

F_{sd} - Valor de cálculo da força de tração determinada no tirante;

F_{us} - Carga na combinação última das bielas;

V_c - Resistência cisalhante adicional da viga-parede promovida pelo reforço;

$V_{c,máx.}$ - Resistência cisalhante adicional máxima da viga-parede promovida pelo reforço.

$V_{máx,aço}$ – Força máxima resistida pelo aço;

$V_{máx,FRP}$ - Força máxima resistida pelo reforço de CFRP;

RESUMO

O Método das Bielas e Tirantes trata-se de um método estabelecido em diversas normas que tratam sobre projeto de estruturas em concreto armado. É um procedimento que possui uma boa eficácia para dimensionamento de elementos estruturais com regiões descontínuas, entre os quais a viga-parede. Extensas são as pesquisas que avaliam o comportamento de vigas-parede biapoiadas, contínuas, com ou sem furos e com diferentes tipos de carregamento. Contudo, na literatura há poucos estudos sobre o uso do Método das Bielas e Tirantes em vigas-parede reforçadas. Este trabalho, portanto, pretende incorporar o reforço de CFRP ao Método das Bielas e Tirantes e construir modelos de bielas e tirantes para as vigas-parede ensaiadas experimentalmente por Neta (2019). A geração dos modelos de bielas e tirantes se divide em duas perspectivas: de análise e de predição de carga de ruptura. Na perspectiva de análise foram gerados modelos de bielas e tirantes a partir do caminhamento de tensões gerados por um software baseado no método dos elementos finitos para que fossem comparados os comportamentos dos modelos gerados com as vigas-parede ensaiadas experimentalmente por Neta (2019). E, na perspectiva predição de carga de ruína, foram gerados modelos de bielas e tirantes que incorporassem as tiras de CFRP junto aos tirantes para que fosse possível prever uma carga máxima de solicitação, bem como o modo de ruptura esperado.

Palavras-chaves: Vigas-parede; Reforço de CFRP; Método de Bielas e Tirantes.

1. INTRODUÇÃO

O avanço técnico e científico na indústria da construção tem propiciado a concepção de estruturas cada vez mais arrojadas e diferentes do usual. Os engenheiros de estruturas, para atender às imposições de projetos arquitetônicos e de instalações, se veem na obrigatoriedade de projetar elementos estruturais que possuem variações de seções e geométricas. Tais elementos possuem regiões as quais não se aplicam os métodos tradicionais de dimensionamento das seções críticas. E, para a resolução desses problemas, o Método das Bielas e Tirantes (MBT) é uma ferramenta que pode ser utilizada.

Baseado na analogia da treliça clássica de Morsh (1899) e Ritter (1909) o MBT busca expressar padrões de tensão complexos com base no percurso dos esforços no elemento estrutural. As tensões de compressão são resistidas por bielas de concreto e as tensões de tração são resistidas pelos tirantes, que representam as armaduras. O MBT é uma teoria que atende ao Limite Inferior da Teoria da Plasticidade em que o equilíbrio é satisfeito e o elemento estrutural deve possuir ductilidade suficiente para que as bielas e tirantes possam se desenvolver.

As vigas-parede são elementos estruturais que podem ser dimensionadas por meio do MBT, como mostrou o trabalho desenvolvido por Schlaich et al (1987). As vigas-parede diferem das vigas esbeltas por possuírem uma relação entre vão e altura inferior a 2 em vigas biapoiadas e menor que 3 em vigas contínuas, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). São utilizadas como estruturas de transição, reservatórios, estruturas offshore e em fachadas de edifícios altos (EL-MAADDAWY e EL-ARISS, 2012).

O atendimento às exigências do projeto de instalações pode levar, muitas vezes, a furos na alma das vigas parede. Esses furos podem causar redução da resistência dessas vigas se comparadas com os mesmos elementos maciços. E, para situações em que as vigas-parede necessitem suportar carregamentos extras, pode-se utilizar materiais como os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP) para reforçar as vigas-parede. Este material é de fácil manuseio, possui uma boa relação resistência-peso, é resistente à corrosão e possui elevado módulo de elasticidade (NETA, 2019). Dessa forma, é interessante avaliar se o MBT é um método que consegue avaliar vigas-parede com furos que sejam reforçadas com CFRP.

Recentemente vigas-parede com geometrias complexas vem sendo estudadas pela universidade de Brasília com os estudos de Vieira (2018) que propôs estudos experimentais e numéricos de tais vigas e Neta (2019). Vale ressaltar que este trabalho dá continuidade a esses estudos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho possui como objetivo geral o estudo de modelos de bielas e tirantes que representem vigas-parede de concreto armado com geometrias não convencionais não reforçadas e reforçadas ao cisalhamento/flexão com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP).

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O referente trabalho terá como objetivos específicos:

- Construir modelos de bielas e tirantes que representem o comportamento (modo de ruptura e carga máxima) de vigas-parede com geometrias não convencionais já ensaiadas;
- Inserir reforço de CFRP na resistência dos tirantes em vigas-parede com geometrias não convencionais;
- Fazer previsão de carga de ruína para vigas-parede com geometrias não convencionais reforçadas com CFRP.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO E USO DE VIGAS-PAREDE

A definição clássica de vigas-parede é a de que são elementos estruturais em que a relação entre altura e vão é muito maior do que o normal, enquanto a espessura na direção perpendicular é bem menor do que a altura e profundidade (AMASH, 2011). Por conta de sua geometria, as vigas-parede apresentam um comportamento diferenciado das vigas tradicionais. São estruturas de concreto armado em que grande parte do carregamento é transportado por zonas de compressão (bielas) entre os pontos de aplicação de carga e os apoios (CHINNARAJ, PRASANNAN, *et al.*, 2015).

Normas internacionais não conceituam vigas-parede da mesma maneira. O Eurocode 2 (CEN, 2004) define que é considerada viga-parede qualquer viga cujo vão é menor do que três vezes a sua altura. O ACI Code 318 (ACI, 2014) descreve vigas-parede como elementos que são carregados em uma face e apoiados na face oposta com formação de bielas comprimidas entre o carregamento e o apoio. Esses elementos devem ter uma relação entre vão e altura menor que 4 ou deve existir uma carga concentrada que se distancia do apoio em uma relação menor do que duas vezes a altura da viga.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) também define vigas-parede de forma diferente. As vigas-parede devem estar sujeitas, principalmente, a ações normais a seu plano e serem elementos de superfície plana. Essas vigas devem possuir um vão menor do que três vezes a sua altura.

Com relação ao seu uso as vigas-parede de concreto armado são utilizadas para distribuir a carga em elementos como: vigas de transferência, paredes de contenção em subsolos, reservatórios de água, em edifícios altos e estruturas offshore (RUSSO, VENIR e PAULETTA, 2005; KONG E CHEMROUK, 2002).

2.2. MODOS DE RUPTURA DE VIGAS-PAREDE

Para indicar um método de dimensionamento de vigas-parede em concreto armado é necessário conhecer o seu comportamento quando submetido a cargas críticas. A partir de

observações em experiências de laboratório notou-se que há certos padrões de fissuração quando essas vigas são carregadas em sua face superior. Assim, levando-se em consideração a maneira com a qual essas vigas se apoiam, simplesmente apoiadas ou engastadas, podem-se identificar diferentes mecanismos de ruptura (BORDA, 2013). Esses mecanismos são citados e descritos em detalhe nos itens subsequentes.

2.2.1. RUPTURA POR FLEXÃO

Ao se carregar uma viga-parede biapoiada em sua face superior, desencadeia-se um processo de aparecimento de esforços que culminam no escoamento da armadura de flexão, geralmente no meio do vão, onde se localiza a região de maior momento fletor. O processo de ruptura inicia-se quando há o surgimento de fissuras verticais no meio do vão, indicando que a armadura de aço começa a escoar. Com o aumento contínuo do carregamento surgem fissuras inclinadas, que se distanciam do ponto médio do vão e se aproximam dos apoios, prolongando-se em direção aos pontos de aplicação da carga. Dessa forma, ocorre a ruptura por meio do escoamento da armadura e, em casos excepcionais, o esmagamento do concreto (SANTOS, 1999). A evolução da falha da viga-parede por meio da flexão é representado na Figura 2.1 abaixo:

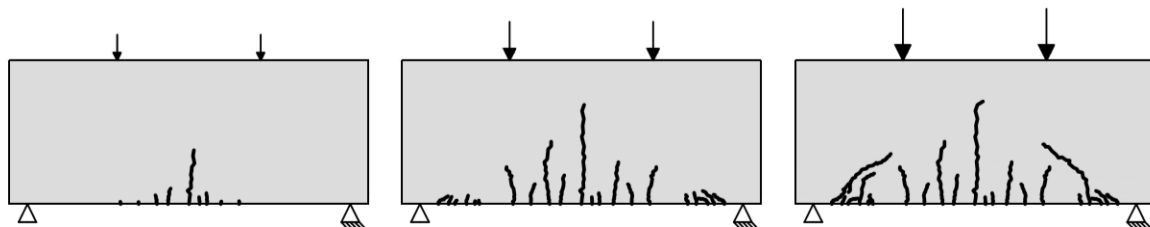


Figura 2.1 - Sequência de aparição das fissuras com o aumento da carga na falha por flexão.

2.2.2. RUPTURA POR CISALHAMENTO

A tensão de cisalhamento é transmitida da face superior à inferior de várias formas em elementos de concreto armado. Seu comportamento, incluindo os modos de ruptura, depende da maneira com a qual o cisalhamento é transmitido (LAFTA e YE, 2016). Geralmente, as vigas apresentam uma combinação de esforços cisalhantes e de flexão que acabam se desenvolvendo em zonas conhecidas como bielas de compressão (BORDA, 2013).

É importante ressaltar que esse tipo de ruína é menos preferível em relação à ruína por flexão. A ruptura por flexão, por ser dúctil, permite uma distribuição de tensão que faz com que o elemento estrutural “avise” o seu estado de limite, por meio de deflexões e aberturas de

fissuras. Já o modo de falha por cisalhamento ocorre de maneira frágil e repentina, o que não é desejável pois pode ser catastrófica (NETA, 2019). A seguir, são descritos os mecanismos de ruptura por cisalhamento.

2.2.2.1. RUPTURA POR TRAÇÃO DIAGONAL

Também conhecida como ruptura por fendilhamento, é um tipo de falha em que demonstra que a viga-parede não possui armadura transversal suficiente na alma. A Figura 2.2 indica que esse modo de ruptura é caracterizado por uma profunda fissura inclinada que se forma independentemente das fissuras à flexão. Essa fissura inicia seu caminho na face inferior da viga, próximo dos apoios, e se estende em direção aos pontos de aplicação da carga (KOTSOVOS, 2002; SANTOS, 1999).

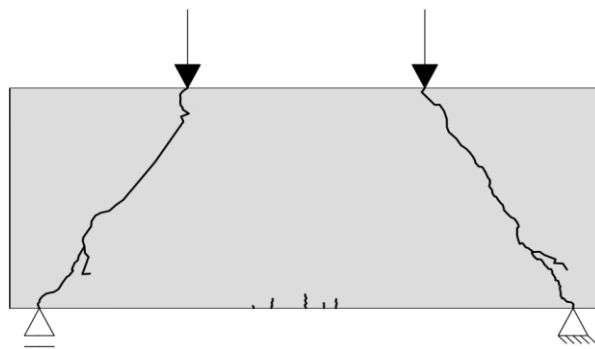


Figura 2. 2 - Ruptura por tração diagonal em viga biapoiada.

2.2.2.2. RUPTURA POR COMPRESSÃO DIAGONAL

Após o surgimento da fissura diagonal, explicada no modo de ruptura anterior, surgem novas fissuras, paralelas à primeira, em uma zona diagonal conhecida como biela de compressão. Essa biela comprimida, ao atingir o seu limite de resistência, fissura progressivamente até causar o fendilhamento do concreto nessa região (BORDA, 2013). O concreto dessa biela sofre um esmagamento e a viga é levada à ruptura. A Figura 2.3 abaixo ilustra esse processo:

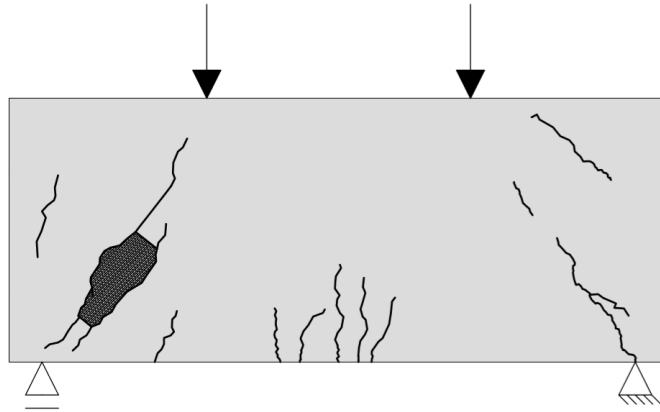


Figura 2. 3 - Ruptura por compressão diagonal em uma viga biapoiada.

2.2.2.3. RUPTURA LOCAL

Essa ruptura não aproveita ao máximo a capacidade resistente da viga. Por meio de elevadas tensões de compressão sobre o apoio ou sob as cargas concentradas ocorre o esmagamento do concreto (SANTOS, 1999). A espessura das fissuras mais críticas se torna maior a medida em que o carregamento aumenta, podendo ultrapassar os 3mm. Dessa forma, para prevenir esse tipo de falha e aproveitar ao máximo a capacidade resistente da viga, deve-se detalhar a viga apropriadamente (LAFTA e YE, 2016). A Figura 2.4 mostra como ocorre essa ruptura:

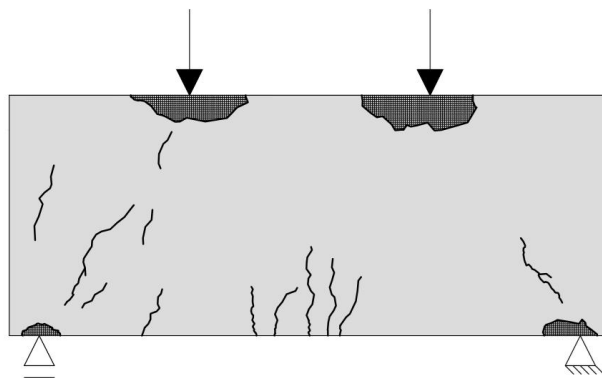


Figura 2.4 - Ruptura local próximo dos apoios e dos pontos de aplicação de carga.

2.3. VIGAS-PAREDE COM FURO

Atualmente, os projetos da indústria da construção estão se tornando cada vez mais complexos e desafiadores para os engenheiros estruturais. E, a presença de furos na alma de

vigas-parede acabam dificultando ainda mais essa situação (NETA, 2019). As vigas-parede, muitas vezes, precisam de diferentes tamanhos de aberturas em sua alma para acomodar dutos de ventilação, ar-condicionado, eletricidade e telefone. Essas aberturas acabam redirecionando as tensões e causando redução da resistência da viga, fissuras e deflexões (CHIN, SHAFIQ, *et al.*, 2014). A Figura 2.5 mostra as alterações geométricas que podem acontecer em vigas-parede.

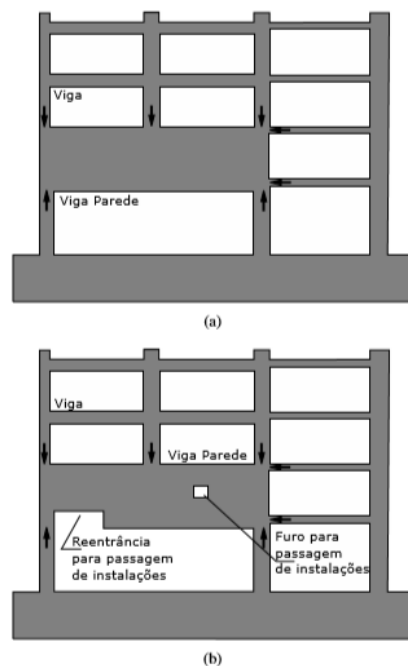


Figura 2. 5 - Vigas-parede em edificações :(a) viga-parede sem abertura; (b) vigas-parede com furo e reentrância (VIEIRA, 2018).

2.3.1. ASPECTOS NORMATIVOS

As orientações para projetos de vigas-parede são escassos em normas que tratam de dimensionamento de elementos estruturais, ainda mais quando as vigas-parede apresentam aberturas em sua alma (NETA, 2019). O ACI Code 318 (ACI, 2014) instrui, quanto ao método de dimensionamento, que técnicas de análise não-linear sejam utilizadas. A norma americana também define que o dimensionamento pode ser feito utilizando o modelo de bielas e tirantes, metodologia que será tratada mais à frente neste trabalho.

A norma brasileira, a NBR 6118 (ABNT, 2014), recomenda que sejam adotados modelos específicos de cálculo, como o método dos elementos finitos ou de bielas e tirantes. Além disso, sugere a posição das aberturas, em regiões menos solicitadas, para não modificar significativamente o funcionamento do elemento estrutural. A Figura 2.6 ilustra onde seria a melhor posição para esses furos.

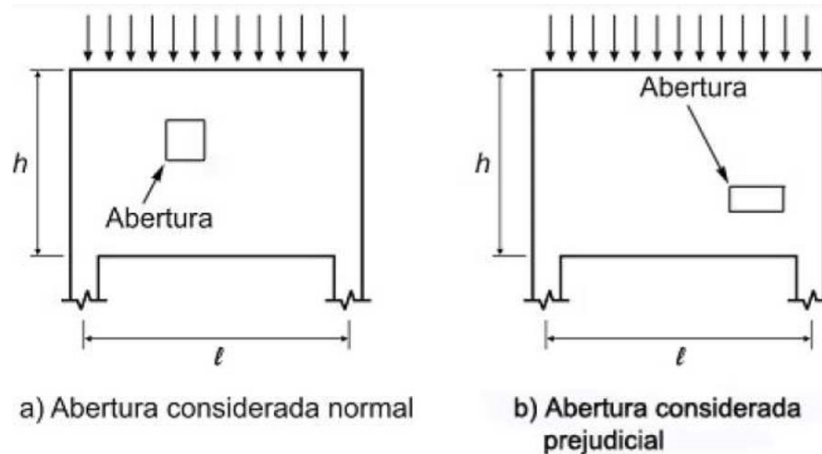


Figura 2. 6 - Abertura em vigas-parede (NBR 6118-ABNT,2014).

2.3.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE VIGAS-PAREDE

Observa-se vários tipos de estudos sobre vigas-parede com geometrias não convencionais. Guerra e Greco (2017) e Sato (2015), por exemplo, aplicam modelos topológicos para compatibilizar o fluxo de esforços internos juntamente com a geração de modelos de bielas e tirantes. Ambos artigos estudam o comportamento linear e não-linear de suas vigas-parede. Concluem que, para análises discretas desses elementos, o dimensionamento pela integração de esforços em uma determinada seção poderia gerar uma economia de armadura. Mas enfatizam que a otimização topológica é dependente dos parâmetros adotados pelo projetista.

Lafta e Ye (2016) examinaram os fatores que afetam a capacidade de cisalhamento e o comportamento de tais vigas. Investigaram parâmetros que influenciam mais como condições de carregamento e apoio, posição de reforço na alma, resistência à compressão e tração, além de fatores que tinham uma influência menor. Os autores concluíram que vigas-parede com maior resistência à compressão exibem uma maior capacidade ao cisalhamento e que aumentar a taxa de armadura pode aumentar o número de fissuras, bem como o carregamento final, contudo irá diminuir a ductilidade da viga e reduzir a sua deflexão.

Fórmulas e métodos também são propostos para prever a capacidade cisalhante de tais vigas como visto em Ibrahim *et al* (2018). Este trabalho propõe uma fórmula para o cálculo de cisalhamento de vigas com diferentes aberturas de cisalhamento, além de realizarem um estudo analítico para verificar o estudo experimental de novos tipos de armaduras para as vigas estudadas. O experimento utiliza 14 vigas-parede, com dois concretos distintos e três tipos de

aberturas de cisalhamento. A equação adimensional proposta viabiliza, com previsão razoável, uma resistência ao cisalhamento de vigas-parede com aberturas de cisalhamento com área de até 15% da área da zona de cisalhamento. Além disso, limita-se à uma razão de 1,2 da altura pela largura do furo contido na viga-parede. A Figura 2.7 ilustra a comparação entre um dos modelos experimentais, juntamente com modelo gerado pelo método dos elementos finitos.

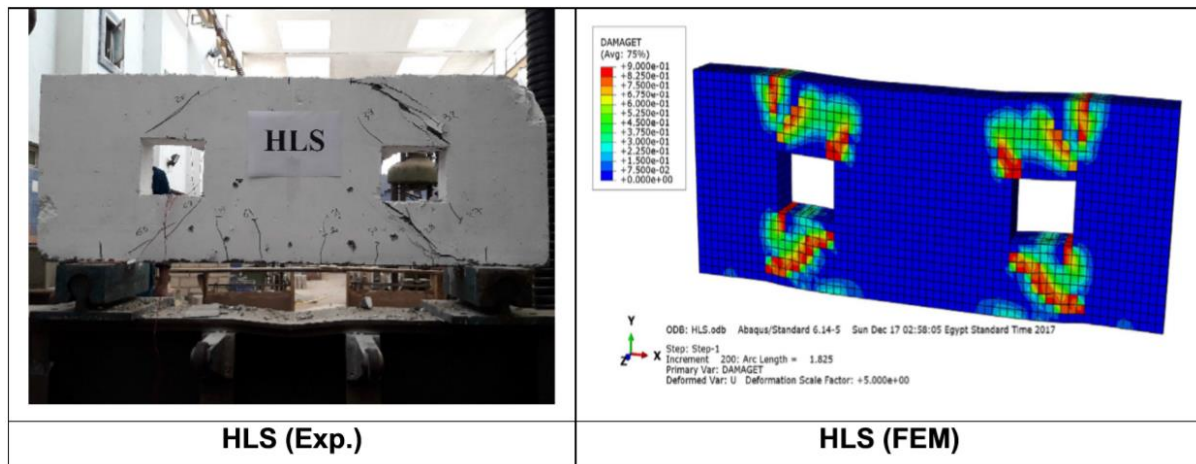










Figura 2. 7 - Padrão de fissuras do modelo real versus grau de tensão no método dos elementos finitos. Adaptado de Ibrahim *et al* (2018).

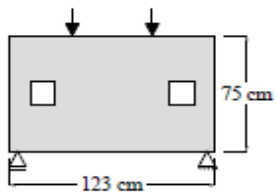

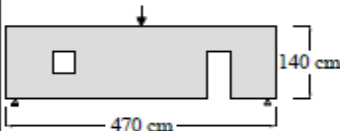
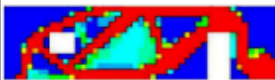
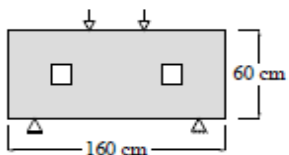
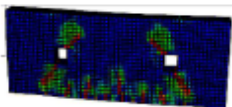
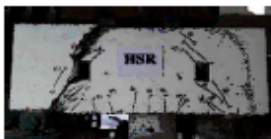
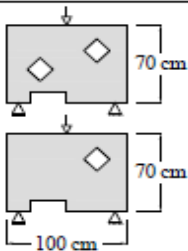
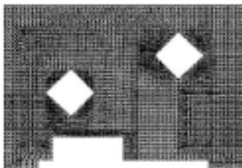

Alguns trabalhos complementam-se e mostram a evolução no estudo do comportamento de vigas-parede com furos e geometrias não-convencionais. Vieira (2018) estudou, de forma experimental e numérica, quatro modelos diferentes com geometrias inéditas. Seu estudo contribuiu com a criação de uma abordagem numérica de micro treliças para suas vigas-parede além de propor uma equação para quantificar a complexidade geométrica de uma viga-parede. Santos *et al* (2019) escolhe a viga-parede com maior grau de complexidade do estudo de Vieira (2018) para entender como se deu a ruptura desse elemento e realiza sua própria análise numérica em uma viga-parede diferente. Constatou que a energia de deformação se comporta de maneira inversamente proporcional ao fator de segurança, mas que todos os modelos estudados obtiveram um fator de segurança muito além do limite mínimo quando produzidos pelo método das bielas e tirantes. A Tabela 2.1 mostra diferentes tipos de geometrias de vigas-parede estudadas e o seus devidos Graus de Complexidade definidos de acordo com a equação de Vieira (2018).

Tabela 2. 1 - Principais tipos de geometrias e seus respectivos Graus de Complexidade Geométrica. Adaptado de Vieira (2018).

Tipo	Referência	Grau de Complexidade
 T1	(CAMPIONE; MINAFÓ,2012)	0
 T2	(CAMPIONE; MINAFÓ,2012)	1
 T3	(CAMPIONE; MINAFÓ,2012)	2
 T4	(EUN et al., 2006)	1
 T5	(YANG; ASHOUR, 2008)	0
 T6	(HU; TAN; LIU, 2007)	1
 T7	(LEY et al., 2007)	2
 T8	(VIEIRA, 2018)	5

O Quadro 2.1, a seguir, resume a principais características dos estudos citados para que possam ser visualizados, com maior facilidade, os tipos de vigas analisadas, modo de análise e os resultados obtidos.

Quadro 2.1 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede com furos.

REFERÊNCIA	TIPO DE ESTUDO	GEOMETRIA, DIMENSÕES E CONFIGURAÇÃO DE CARGA	MODELO NUMÉRICO	MODO DE RUPTURA	RESUMO DOS RESULTADOS
Guerra e Greco (2017)	Numérico		 Otimização Topológica	_____	A otimização topológica é dependente dos parâmetros adotados e que a escolha desses parâmetros devem ser bem fundamentados para representar corretamente o comportamento do material. Ao considerar o comportamento linear e não linear do material surgem diferenças nos resultados da topologia ótima e em relação à distribuição de tensões.
Sato (2015)	Numérico		 Otimização Topológica	_____	A otimização topológica auxilia na geração automática de modelos de bielas e tirantes, além de ser uma ferramenta poderosa na análise de regiões descontinuas. Sua aplicação pode ser considerada segura se aliada a outras disposições, em especial referentes a ancoragens e taxas mínimas de armadura.
Ibrahim <i>et al</i> (2018)	Numérico e Experimental		 Elementos Finitos		As 12 vigas romperam por um misto de cisalhamento e flexão, sendo que o cisalhamento mostrou-se preponderante. O estudo numérico, por meio dos elementos finitos, mostrou-se eficiente e gerou fissuras similares às obtidas pelo modelo experimental. Além disso, o estudo paramétrico revelou que à medida que a altura da viga-parede aumenta maior é a resistência ao cisalhamento.
Vieira (2018)	Numérico e Experimental		 Micro Treliças		Das 4 vigas ensaiadas 2 ruíram por cisalhamento e as outras 2 romperam por um misto de cisalhamento e flexão. O estudo numérico, por meio do modelo de micro treliças, conseguiu representar satisfatoriamente o comportamento experimental das vigas parede. Através da distribuição probabilística das propriedades do concreto pôde-se obter valores de carga últimos seguros, o que viabiliza o seu uso em projetos estruturais.

2.3.3. VIGAS-PAREDE REFORÇADAS

Heiza *et al* (2011) e Al-Bayati *et al* (2019) estudam o comportamento de vigas-parede com aberturas e que utilizam concreto autoadensável. O primeiro artigo faz uma análise experimental com vigas reforçadas com diferentes materiais, tais como polímeros reforçados com vidro e fibras de carbono (GFRP e CFRP, siglas da língua inglesa que designam *Glass Fiber Reinforced Polimer* e *Carbon Fiber Reinforced Polimer*, respectivamente). Além disso, técnicas de reforços externos de camadas ligadas externamente (EBL, *Externally Bonded Laminate*) e camadas de reforço próximas à superfície (NSM, *Near Surface Mounted Reinforcement*), com ranhuras de 5 cm, são ensaiados. São avaliadas 16 vigas-parede que possuíam a mesma dimensão e uma abertura retangular no centro do vão, sendo que era variado o tipo, dimensão e inclinação do reforço. Concluiu-se que a resistência ao cisalhamento aumenta ao se utilizar a técnica de reforço do tipo NSM em comparação à EBL. Além disso, as duas técnicas tiveram uma eficiência melhor na resistência ao cisalhamento quando os reforços estavam inclinados em relação à face da viga. O artigo de Al-Bayati *et al.* (2019) foca em vigas com duas aberturas circulares, localizadas simetricamente, no meio das vigas. Este trabalho avaliou comportamento do cisalhamento, padrão de fissuração, modo de ruptura e relação carregamento-deflexão com o uso de tiras inclinadas de CFRP. É descrito que a razão entre as distâncias dos pontos de aplicação das cargas e os apoios influenciam o comportamento das vigas-parede. Por exemplo, quando os pontos de aplicação de cargas aproxima-se mais do meio do vão é de se esperar um aumento das trincas por cisalhamento, porém com diminuição da flexão, sendo esperado também o comportamento oposto ao se distanciar os pontos de aplicação de carga. Finalmente, concluem que o sistema de CFRP utilizado na face externa e colocado na diagonal da viga atrasa o aparecimento de fissuras e aumenta em até 25,8% a carga final do que era esperado sem o uso desse material.

Abdujalil (2014) observou o comportamento da resistência ao cisalhamento em vigas parede com furos reforçadas com tiras de mantas de CFRP. O estudo foi realizado de forma experimental com 8 vigas-parede. Os parâmetros avaliados incluem a orientação da fibra e o efeito da ancoragem nas fibras de carbono. As tiras foram ligadas externamente às vigas-parede, pelo método EBL, e concluiu-se que o reforço aumenta a resistência ao cisalhamento, limita as espessuras das fissuras e aumenta a rigidez das vigas. As vigas reforçadas com tiras de CFRP orientadas a 45° demonstraram maior eficiência quando comparadas com as tiras

orientadas verticalmente a 90° do eixo longitudinal da viga. E, houve o aumento de ductilidade da viga ao se orientar as tiras de CFRP tanto em 90° como em 45° .

Attiya e Abbas (2020) realizaram um estudo numérico com vigas-parede contínuas, fazendo-se uso de uma ferramenta computacional baseada no método dos elementos finitos. Foram avaliadas cinco vigas: uma sem furos, outra com quatro furos e sem reforço e mais três vigas com quatro aberturas e arranjos de reforços com tiras de CFRP distintos. Analisou-se a deflexão no meio do vão, resistência ao cisalhamento, padrão de fissuração, efeito dos furos e das configurações dos reforços. Constatou-se que a distribuição e orientação das tiras de CFRP aumentam a carga última bem como resistem mais às fissuras. E, ao seu aumentar a espessura das fibras de CFRP próximas às aberturas a resistência à carga última tende a aumentar e a espessura das fissuras tendem a diminuir.

Neta (2019) propôs-se a realizar estudos experimentais e numéricos de vigas-parede de concreto armado com geometrias não convencionais reforçadas ao cisalhamento e flexão em sua tese de doutorado. A geometria das vigas utilizadas foi a mesma de Vieira (2018). Até o momento da conclusão deste trabalho o escrito de Neta (2019) não foi finalizado, mas já possui dados da fase de Estudo Preliminar que são suficientes para acrescentar informações a este trabalho. É importante ressaltar que, nesta etapa de revisão bibliográfica, faz-se necessário pormenorizar detalhadamente o estudo de Neta (2019) tendo em vista que este é de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho como descrito na metodologia mais a frente.

As vigas-parede estudadas por Neta (2019) apresentam seção transversal de $140 \times 700 \text{ mm}$ e comprimento de 1000 mm . A nomenclatura das vigas-parede segue um padrão em que DB significa vigas-parede (*Deep Beam*), o H significa furo (*Hole*) e o caractere numérico subsequente representa a quantidade de aberturas na alma. Por exemplo, a viga DB-H2 corresponde a uma viga parede com duas aberturas na alma.

As geometrias foram pensadas de modo a interromper o caminho natural das tensões que deveriam seguir do ponto de aplicação da carga até os apoios. As duas vigas-parede apresentam uma reentrância próximo ao apoio esquerdo e apresentam aberturas em formato de losango. A Figura 2.8 a seguir mostra as vistas das vigas:

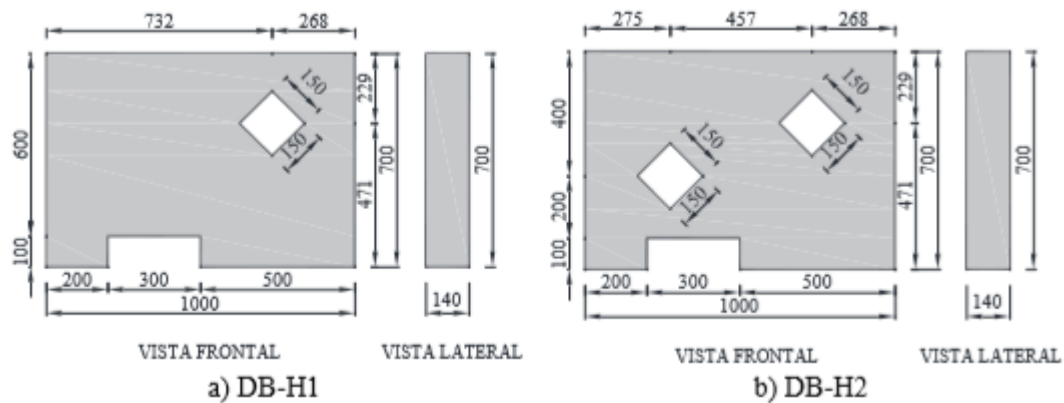


Figura 2. 8- Geometrias das vigas-parede (unidades em milímetros) de Neta (2019). Fonte: Neta (2019).

Além das características já citadas nas diferentes geometrias, as vigas-parede estudadas apresentam outras propriedades que as diferenciam e interferem em suas respectivas nomenclaturas. O trabalho de Neta (2019) leva em consideração a presença ou não de armadura na alma, a presença ou não de ancoragem e se a viga-parede possui reforço de CFRP. Os termos NR (*No Reinforcement*) se refere à inexistência de armadura na alma da viga-parede e WR (*Web Reinforcement*) à presença de armadura na alma. A presença, ou não, de ancoragem nas armaduras de flexão são caracterizadas pelos termos AP (*Anchor Present*) e NA (*No Anchor*), respectivamente. O reforço ou não, por meio de CFRP, foi representado por S (*Strengthened*) e U (*Unstrengthened*), respectivamente. A Figura 2.9 mostra o fluxograma da nomenclatura das vigas:

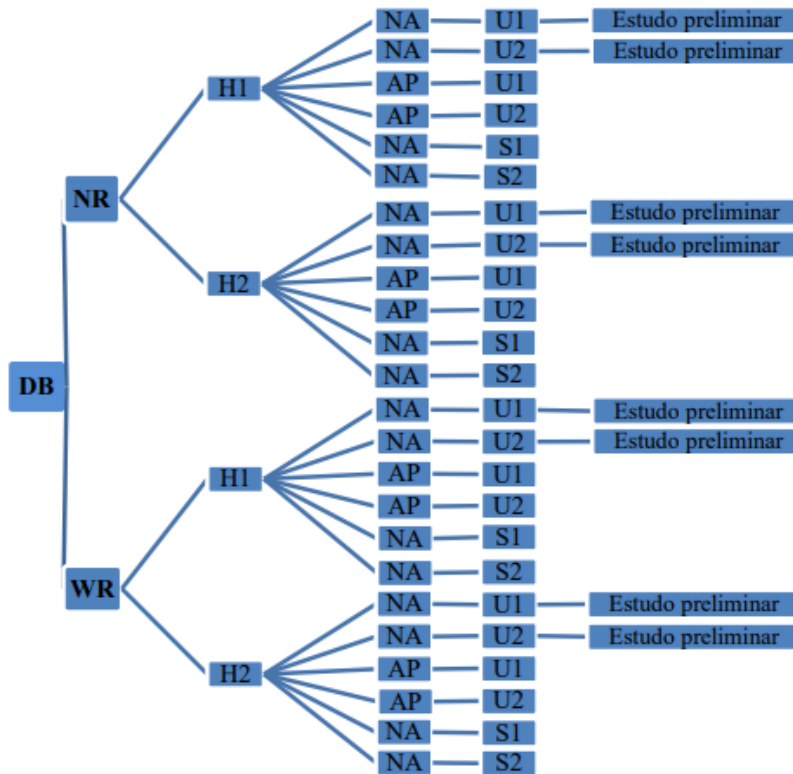


Figura 2. 9 – Fluxograma da nomenclatura das vigas estudadas (NETA, 2019)

O detalhamento das armaduras levou em consideração um cobrimento de 2,5 cm e possuem o mesmo padrão dos modelos ensaiados por Vieira (2018). A seguir, na Figuras 2.10 a 2.13, apresentados os detalhamentos das vigas-paredes do tipo NA:

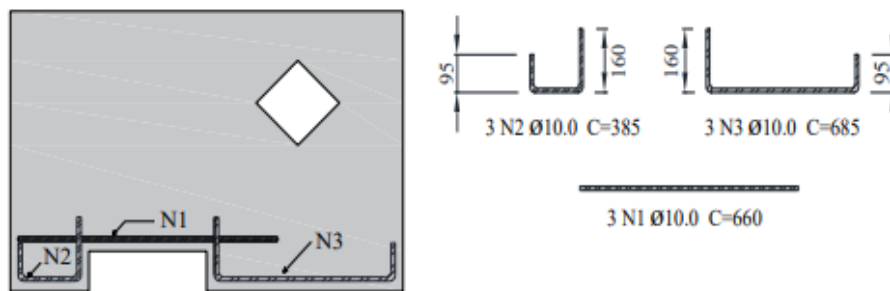


Figura 2. 10 – Detalhamento das armaduras DB-NR-H1-NA (dimensões em mm). Neta (2019).

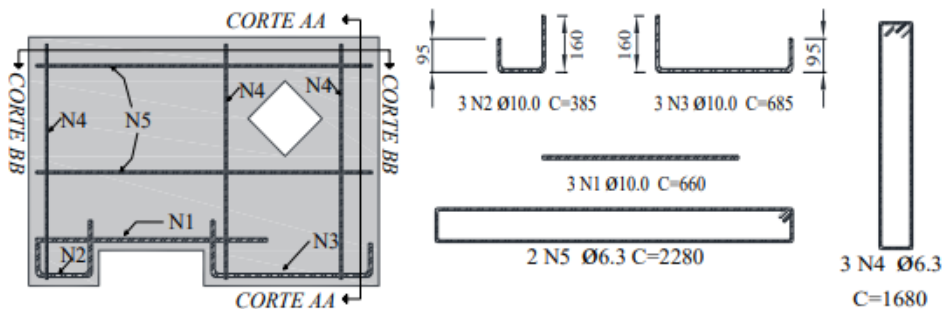


Figura 2. 11 – Detalhamento das armaduras DB-WR-H1-NA (dimensões em mm). Neta (2019).

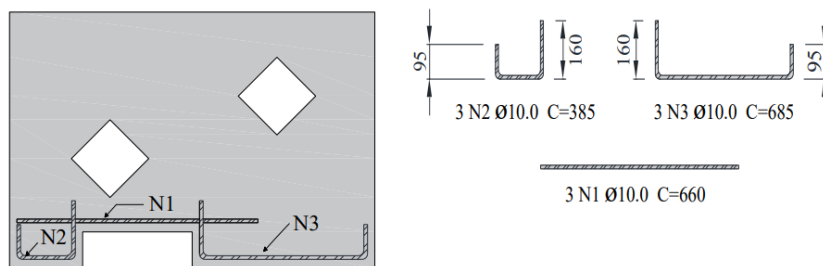


Figura 2.12 - Detalhamento das armaduras DB-NR-H2-NA (dimensões em mm). Neta (2019).

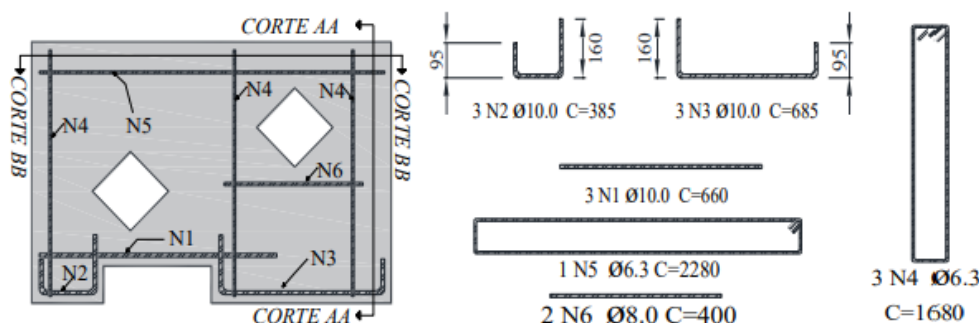


Figura 2.13 - Detalhamento das armaduras DB-WR-H2-NA (dimensões em mm). Neta (2019).

As vigas-parede reforçadas de Neta (2019) visam combater o cisalhamento/flexão. Para isso, são usadas tiras de CFRP com largura de 50mm as quais encobrem as vigas-parede na face frontal, posterior e lateral. As tiras que combatem o efeito cisalhante foram aplicadas em um ângulo de 45° com a horizontal e as tiras de flexão na horizontal. A vista frontal do detalhamento do reforço das vigas DB-H1-S e DB-H2-S podem ser visualizadas na Figura 2.14:

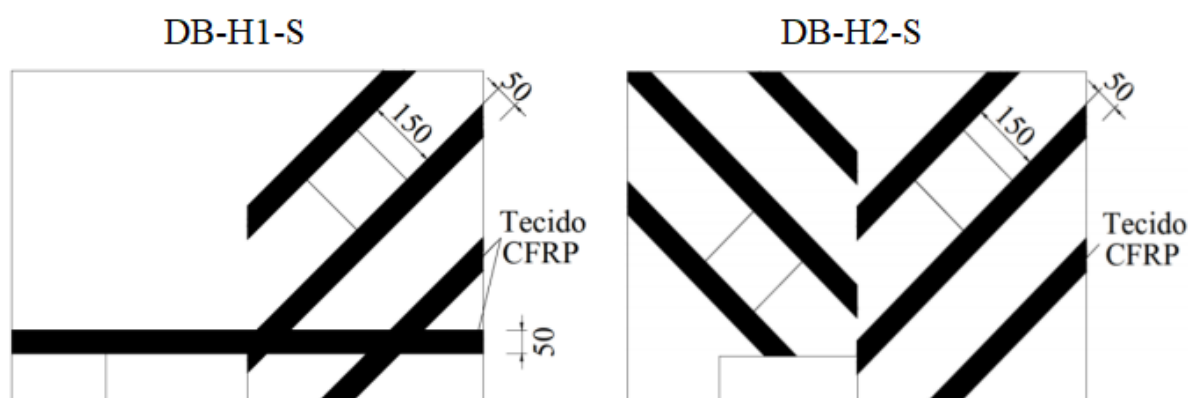


Figura 2.14– Detalhamento do reforço ao cisalhamento/flexão das vigas DB-H1-S e DB-H2-S(unidade em milímetros). Adaptado de Neta (2019).

No Estudo Preliminar foram ensaiadas 8 vigas-parede (não reforçadas) e o concreto foi dosado com $f_{ck}=35$ Mpa aos 28 dias. Foram realizados ensaios de módulo de elasticidade

do concreto, ensaios de tração por compressão diagonal e ensaios de compressão. A Tabela 2.2 apresenta o resumo das propriedades mecânicas do concreto:

Tabela 2. 2– Propriedades mecânicas do concreto do estudo preliminar de Neta (2019).

Concretagem	Idade (dias)	f_{cm}medio (MPa)	E_{cm}medio (Gpa)	f_{ct}medio (Mpa)
12/09/2018	145	47,64	38,99	3,7

Foram utilizadas três amostras de cada bitola utilizada para caracterizar as propriedades mecânicas do aço. Assim, um resumo das propriedades das barras utilizadas na confecção das vigas pode ser vista na Tabela 2.3:

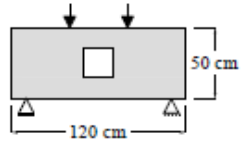

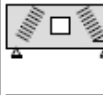


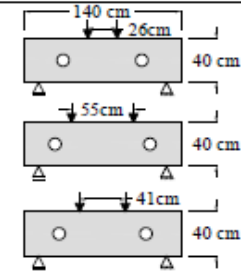


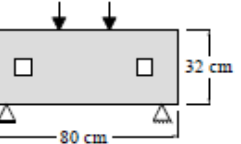
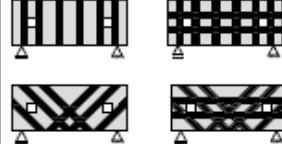

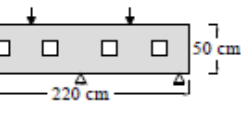
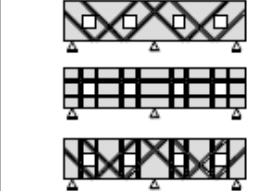

Tabela 2. 3 - Propriedades mecânicas do aço do estudo preliminar de Neta (2019).

Φ (mm)	f_{ys}medio (MPa)	ε_ymedio (%)	E_smedio (Gpa)
6.3	-	-	-
8.0	-	-	-
10.0	552,33	28,9	190,67

Em seu Estudo Preliminar de Neta (2019) as 8 vigas-parede sem reforço foram ensaiadas e analisadas como exposto na Figura 2.9. O comportamento das vigas, analisando-se a carga de ruptura, foi dentro do esperado: as vigas com apenas 1 abertura e com armadura na alma resistiram mais do que as vigas com 2 aberturas e sem a presença de armadura na alma. E, com relação ao modo de ruína, todas romperam de modo frágil com uma combinação de cisalhamento e ancoragem insuficiente. O tipo de reforço a ser utilizado será o CFRP conforme exposto na Figura 2.14. Este estudo busca avaliar se o comportamento de tais vigas-parede poderiam ser representados em ferramentas numéricas de modo a representar o comportamento não-linear nesse tipo de estrutura de geometria complexa. Além disso, busca-se analisar o desempenho quanto a capacidade de carga, fissurações, modos de ruptura e fazer comparações de modelos reforçados e não reforçados.

O Quadro 2.2, a seguir, resume a principais características dos estudos citados para que possam ser visualizados, com maior facilidade, os tipos de vigas analisadas, os tipos de reforço, modo de análise e os resultados obtidos.

Quadro 2. 2 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede com furos reforçadas.

REFERÊNCIA	TIPO DE ESTUDO	GEOMETRIA, DIMENSÕES E CONFIGURAÇÃO DE CARGA	SISTEMA DE REFORÇO	MODO DE RUPTURA	RESUMO DOS RESULTADOS
Heiza <i>et al</i> (2011)	Numérico e Experimental		 <p>Reforço vertical do tipo NSM. São utilizadas barras de aço, chapas de aço, tiras de GRFP ou tiras de CFRP.</p>  <p>Reforço inclinado do tipo NSM. São utilizadas tiras de GRFP e barras de aço.</p>  <p>Reforço do tipo EBL. Utilizou-se chapas de aço, GRFP ou CFRP.</p>		As 16 vigas ensaiadas rompem, preponderantemente, por cisalhamento. O reforço vertical do tipo NSM é mais eficiente do que o reforço NSM inclinado. Pode-se atribuir esse resultado à maior área que o reforço vertical consegue abranger. O reforço do tipo NSM gerou melhores resultados em relação à carga máxima em comparação com o reforço EBL quando utilizados os mesmos materiais. Além disso, o modelo de Elementos Finitos representou com precisão o sistema de reforços impostos à viga-parede.
Al-Bayati <i>et al</i> (2019)	Experimental		 <p>Reforço do tipo CFRP. Utilizou-se tiras de 4 centímetros de largura que se dispunham perpendicularmente à direção entre o carregamento e o apoio.</p>		As 6 vigas parede com furos ensaiadas romperam por cisalhamento. A presença de aberturas circulares provocam um decréscimo na carga máxima de até 50% quando comparada à uma viga sólida. Porém, a deflexão aumenta e permite que a ruína seja mais dúctil. O sistema de tiras de CFRP mostrou-se eficiente e aumentou em até 25,8% o carregamento último. Além disso, a relação entre a distância do ponto de aplicação da carga até o apoio influencia em até 22,5 % a carga máxima e surge efeito também na deflexão apresentada pela viga.
Abdujalil (2014)	Experimental		 <p>Reforço do tipo CFRP. Utilizou-se tiras de 4 centímetros de largura que se dispunham ao de forma vertical, horizontal e inclinada em 45°.</p>		As 8 vigas ensaiadas romperam por cisalhamento. Ao se combinar tiras verticais e horizontais na viga parede conseguiu-se um aumento adicional da carga de fissuração e carga final de 5% e 24,6%, respectivamente. Com tiras horizontais e inclinadas a 45° os resultados mostraram um aumento na carga de fissuração e carga final de 8% e 40,2%, respectivamente. O uso de CFRP diminuiu a espessura das fissuras. E, as deformações nas tiras de CFRP foram muito pequenas antes do aparecimento das fissuras contudo, aumentou rapidamente após o aparecimento das mesmas.
Attiya e Abbas (2020)	Numérico		 <p>Reforço do tipo CFRP. As tiras se dispunham de forma vertical, horizontal e inclinada em 45°.</p>		A ruptura foi ensaiada de maneira numérica. O modelo mostrou que o padrão de fissuração seria composto por flexão e cisalhamento. Constatou-se um efeito benéfico significativo na viga parede contínua o uso de tiras de CFRP. O ensaio numérico mostrou que há um aumento no grau de fissuração e de carga última. Além disso, a viga que contava com tiras verticais e inclinadas de CFRP obteve melhores resultados em comparação com as outras. E, ao se aumentar a espessura das tiras próximas aos furos nota-se um aumento da resistência cisalhante e um decréscimo da espessura das fissuras.

2.4. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES

Os primeiros estudos referentes ao método das bielas e tirantes originaram-se com Ritter (1899) e Morsch (1909) para vigas de concreto armado submetidas à flexão simples. É admitido, neste método, a substituição da viga por uma treliça, com banzos paralelos, que represente a distribuição de tensões quando aplicado o carregamento. Dessa forma, os tirantes constituem as barras da treliça submetidas à tração e as bielas representam as barras à compressão. A Figura 2.8 ilustra a analogia da treliça clássica.

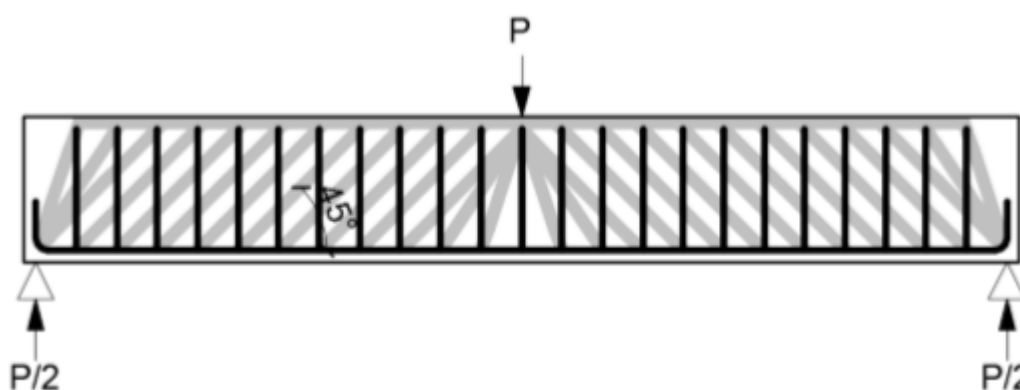


Figura 2. 15 - Analogia da treliça clássica no método das bielas e tirantes (AGUIAR , 2018).

Schlaich *et al* (1987) apresentam a generalização da treliça para todas as partes de qualquer elemento de concreto armado. Dessa forma, estruturas como vigas-parede, dentes gerber, consolos, entre outros poderiam ser dimensionados. Para realizar este dimensionamento não poderia ser utilizado o princípio de Saint Venant, que estipula que as deformações induzidas por descontinuidades na carga ou na seção transversal variam de maneira linear a distâncias iguais ou maiores à maior dimensão da seção transversal ao ponto de aplicação da carga. O que contraria a teoria clássica do concreto armado baseado no equilíbrio, compatibilidade e comportamento dos materiais aço e concreto, em particular a suposição de que seções planas permanecem planas ao se deformarem.

Para realizar o dimensionamento proposto por Schlaich *et al* (1987) devem ser consideradas regiões descontínuas dentro do elemento de concreto armado próximas à cargas concentradas, aberturas ou locais em que ocorre mudança na seção transversal. Regiões descontínuas são referidas como regiões D e as regiões onde se aplica a teoria clássica do

concreto armado como regiões B. A Figura 2.9 a seguir mostra uma estrutura contendo regiões do tipo B e D.

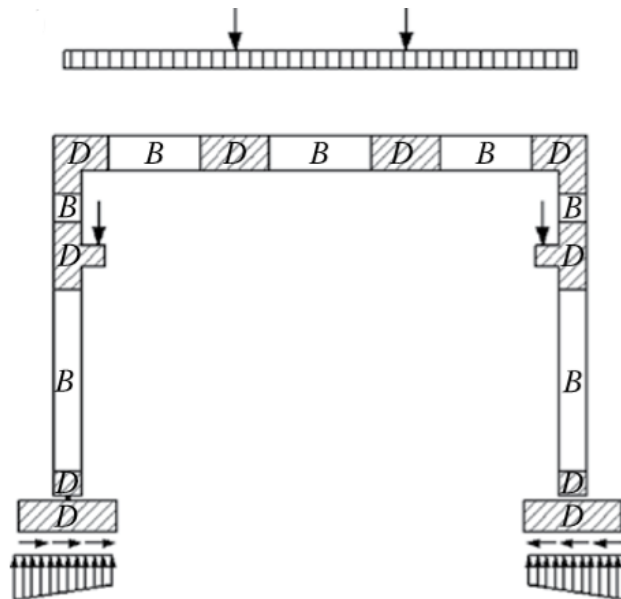


Figura 2. 16 - Pórtico com regiões do tipo B e D (SCHLAICH, SCHÄFER e JENNEWEIN, 1987).

Por conta de sua geometria, vigas-parede são consideradas regiões D e, portanto, método de bielas e tirantes pode ser aplicado. Isso permite que se resolva, de forma simplificada, problemas complexos de dimensionamento desses elementos (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010). A norma ACI Code 318 (ACI, 2014) e NBR 6118 (ABNT, 2014) recomendam que seja utilizado este método para resoluções de problemas que envolvam vigas-parede.

2.4.1. ELEMENTOS DA TRELIÇA

O método das bielas e tirantes fundamenta-se em simbolizar, por meio do modelo idealizado da treliça, elementos que representam o campo de tensão à compressão (bielas), elementos que representam o campo de tensões à tração (tirantes) e as zonas nodais que interligam esses campos de tensões (BORDA, 2013). A Figura 2.10 mostra esses elementos em uma viga.

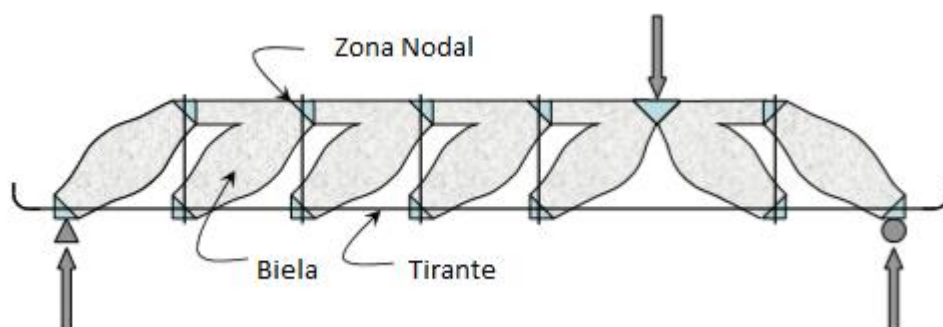


Figura 2.17- Modelo de bielas e tirantes com todos elementos da treliça. Adaptado de (BIRRCHEER, TUCHSCHERER, *et al.*, 2009)

2.4.1.1. BIELAS

A biela é um elemento que está submetido à compressão. O seu formato pode ser retangular, prismático (que é maneira como é comumente idealizado para projeto) ou em forma de garrafa. Em ambos os casos as tensões de compressão se propagam lateralmente entre as zonas nodais, como mostrado na Figura 2.11. Assim que a biela é submetida a uma tensão cada vez maior de compressão ao longo de seu comprimento, a tensão de tração perpendicular ao eixo da biela pode resultar em fissuras longitudinais. A capacidade de uma biela depende diretamente da resistência à compressão do concreto (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010).

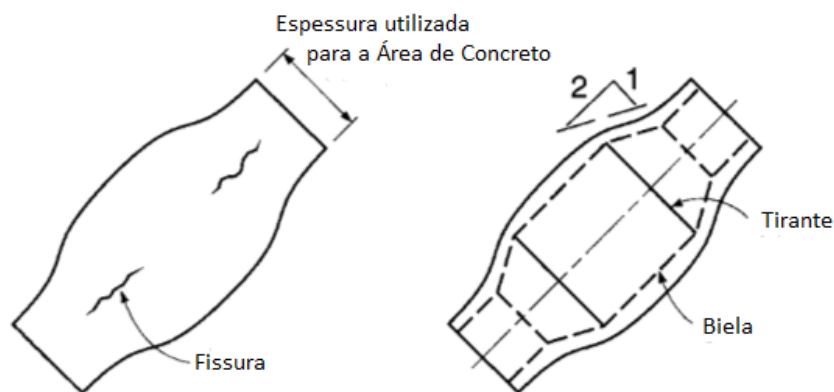


Figura 2.18 - Biela em forma de garrafa. Adaptado de Nilson, Darwin e Dolan (2010).

Ao se analisar o padrão de fissuração de uma estrutura é possível inferir o fluxo das tensões de compressão. A fissuração ocorrerá inicialmente na direção da tração máxima à medida em que a tensão de compressão será paralela às fissuras. Assim, tirantes são costumeiramente posicionados de modo perpendicular às fissuras e as bielas paralelas a estas. Esse tipo de análise é útil quando se possui resultados experimentais do problema analisado (SATO, 2015).

O Eurocode 2 (CEN, 2004) mostra duas maneiras para se projetar bielas. Na primeira maneira, que é calculada pela Equação 2.1, a biela não pode estar submetida a tensões transversais. Assim, considera-se apropriado utilizar essa formulação, que gera maiores valores de resistência, em regiões em que as bielas sofrem compressão de forma multiaxial.

$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que $\sigma_{Rd,max}$ é a tensão normal resistente de cálculo máxima e f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto. As bielas submetidas a tensão transversal, devem ser calculadas de acordo com a Equação 2.2. A resistência à compressão nesse caso é reduzida pois pode-se gerar fissuras na zona de compressão.

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Em que f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define três diferentes equações para dimensionar o valor de resistência de cálculo das bielas. A Equação 2.3 aplica-se em nós que não estão submetidos a tensões transversais:

$$f_{cd1} = 0,85 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Em que f_{cd1} é a tensão resistente máxima do concreto em nós onde confluem apenas bielas de compressão. A Equação 2.4 deve ser utilizada em bielas submetidas a tensão transversal, desde que seja atravessada por tirante único:

$$f_{cd3} = 0,72 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Em que f_{cd3} é a tensão resistente máxima do concreto em nós onde conflui apenas um tirante tracionado. Por fim, a Equação 2.5 faz-se necessária em bielas submetidas a tensão transversal em que as bielas são atravessadas por mais de um tirante:

$$f_{cd2} = 0,60 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Em que f_{cd2} é a tensão resistente máxima do concreto em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados. Nota-se, a fins de comparação, que a norma brasileira adota valores mais conservadores do que a norma europeia visto que, mesmo em bielas não submetidas a tensão transversal, há coeficientes de redução na resistência do concreto.

O ângulo formado por bielas e tirantes concorrentes em um mesmo nó é um elemento limitante para a segurança e confiabilidade de uma região nodal. Menor será a resistência a compressão da biela quanto menor for este ângulo (SANTOS, 2006). A Tabela 2.2 apresenta, segundo recomendações de normas e de pesquisadores, os intervalos permitidos para o ângulo formado entre uma biela e um tirante.

Tabela 2. 4 – Limites inferior e superior para o ângulo formado entre as diagonais comprimidas e a armadura longitudinal da viga.

Norma ou pesquisador	Ângulo θ (°)
NBR 6118 (ABNT,2014)	$30^\circ \leq \theta \leq 63^\circ$
Eurocode 2 (CEN,2004)	$21^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
ACI Code 318 (ACI, 2014)	$25^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$
Schlaich e Schäfer (1991)	$45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$

O ACI Code 318 (ACI, 2014) propõe a Equação 2.6 para projetar bielas:

$$\phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Em que F_{ns} é a carga resistente das bielas e F_{us} é a carga, na combinação última, agindo nas bielas. Sendo que o fator de redução de resistência, ϕ , definido pela norma americana, equivale a 0,75 para bielas, tirantes e zonas nodais. A capacidade resistente das bielas, F_{ns} , pode ser calculada, para bielas sem reforço longitudinal, pela Equação 2.7:

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Em que f_{ce} é a resistência à compressão efetiva e A_{cs} corresponde à área da seção transversal da biela. Quando houver bielas com armadura longitudinal, F_{ns} pode ser calculada pela Equação 2.8:

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} + A'_s f'_s \quad (\text{Equação 2.8})$$

Onde A'_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal submetida à compressão e f'_s é a tensão de escoamento característica do aço. Assim, a capacidade de resistência a compressão efetiva, f_{ce} , é calculada por meio da Equação 2.9:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_s f'_c \quad (\text{Equação 2.9})$$

O valor do coeficiente da biela, β_s , considera efeitos de fissuração e de armadura confinada dentro da biela (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010) e pode ser obtido pela tabela 23.4.3 da ACI Code 318 (ACI, 2014).

2.4.1.2. TIRANTES

O tirante é o elemento submetido à tração no método das bielas e tirantes. A armadura de aço deve ser distribuída de forma que seu centroide coincida com a localização do tirante. Assume-se, no método das bielas e tirantes, que apenas o aço resiste às tensões de tração (BIRRCHE, TUCHSCHERER, *et al.*, 2009). A área da seção transversal da armadura longitudinal submetida à tração é designada como A_s . Assim, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define que o dimensionamento destes tirantes é obtido por meio da Equação 2.10:

$$A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} \quad (\text{Equação 2.10})$$

Em que f_{yd} é a resistência ao escoamento da armadura passiva de cálculo e F_{sd} é o valor da força de tração atuante no tirante. A norma americana e europeia tratam o dimensionamento dos tirantes da mesma maneira.

2.4.1.3. ZONA NODAL

Os nós são regiões dentro do modelo de bielas e tirantes em que os eixos das bielas, tirantes e carregamentos pontuais se interceptam. A zona nodal é o volume de concreto em volta do nó onde a transferência de forças ocorre. Para o equilíbrio, ao menos três forças devem agir em um nó. E, essas forças são classificadas como sendo de compressão (C) ou de tração (T). Assim, um nó do tipo C-C-C resiste a três forças de compressão e, um nó do tipo C-C-T resiste a duas forças de compressão e uma de tração (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010). A Figura 2.12 ilustra os tipos de configuração que um nó pode ter.

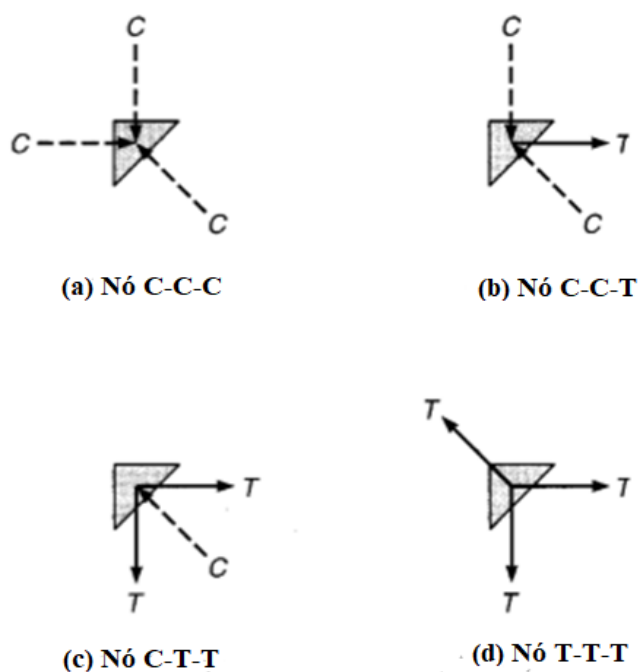


Figura 2.19 - Classificação dos nós. Adaptado de Nilson, Darwin e Donlan (2010).

Nós podem ser classificados como hidrostáticos ou não hidrostáticos. Os nós hidrostáticos são aqueles em que a tensão é aplicada de forma perpendicular em cada face do nó e que a magnitude dessa tensão é igual em cada uma das faces. Dessa forma, não haverá tensão de cisalhamento no nó. Caso o nó seja carregado de forma diferente ele será considerado um nó não hidrostático e, necessariamente, terá tensão de cisalhamento atuando sobre ele (BROWN, SANKOVICH, *et al.*, 2006). A Figura 2.13 ilustra a mecânica de um nó hidrostático e outro não hidrostático.

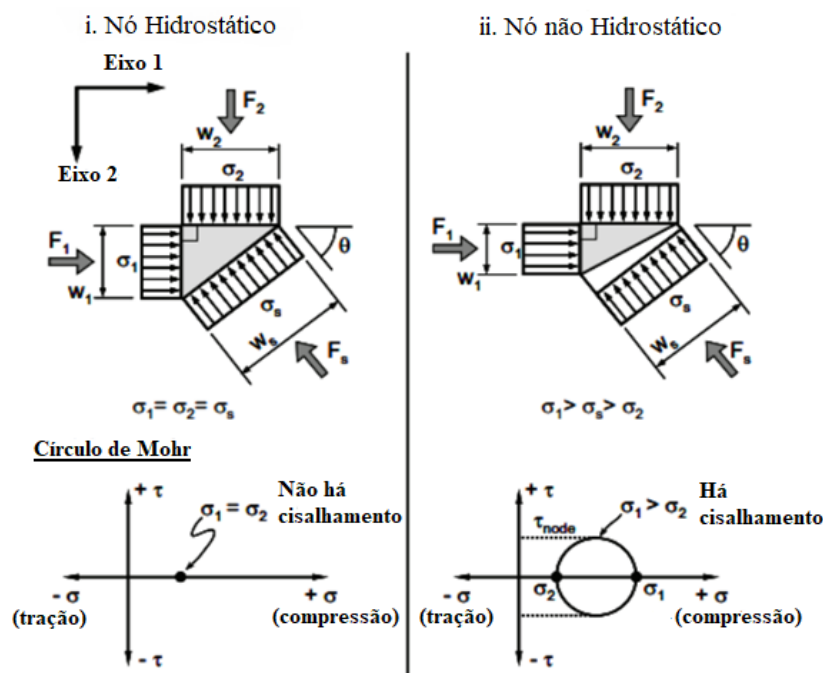


Figura 2.20 - Mecânica dos nós. Adaptado de Brown, Sankovich, *et al* (2006).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) dimensiona zonas nodais e bielas igualmente. O Eurocode 2 (CEN, 2004) traz um dimensionamento diferenciado para ambas. Os valores de projeto são comparáveis e seguem critérios de diminuição da capacidade resistente próximos aos da norma brasileira.

O ACI Code 318 (ACI, 2014) define a resistência a compressão da região nodal F_{nn} de acordo com a Equação 2.11:

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Em que A_{nz} é a área da seção transversal da zonal nodal perpendicular à linha de ação da força resultante. Desse modo, a resistência efetiva à compressão do concreto na zona nodal é calculada pela Equação 2.12:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_n f'_c \quad (\text{Equação 2.12})$$

O fator de minoração, β_n , reflete o grau de perturbação em zonas nodais devido à incompatibilidade de deformações de tração nos tirantes com deformações de compressões nas

bielas (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010). Este fator de minoração assume os valores apresentados na Tabela 2.5:

Tabela 2. 5 – Valores do coeficiente da zona nodal β_n

Configuração da Zona Nodal	β_n
Zona nodal circundada por bielas, placas de apoio ou ambas (nó C-C-C)	1,00
Zona nodal ancorando em um único tirante (nó C-C-T)	0,80
Zona nodal ancorando em dois ou mais tirantes (nó C-T-T)	0,60

Fonte: ACI Code 318 (ACI, 2014).

O dimensionamento das zonas nodais é baseado na premissa de que as principais tensões que interceptam bielas e tirantes são paralelas aos eixos destes elementos da treliça idealizada. A espessura das bielas e tirantes é, no geral, proporcional à magnitude da força nesses elementos. Contudo, alguns arranjos geométricos impedem o estabelecimento de um nó hidrostático (NILSON, DARWIN e DOLAN, 2010). Nesses casos, a espessura das bielas é determinada pela geometria do apoio ou da tensão no tirante, assim como mostrado na Figura 2.21:

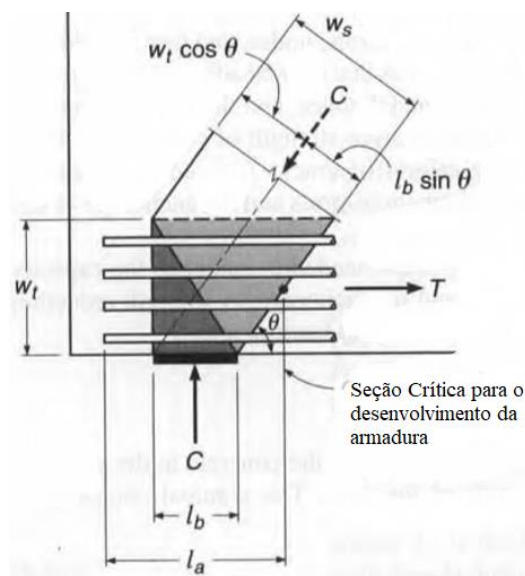


Figura 2. 21 – Determinação da biela, tirante e zona nodal. Adaptado de Nilson, Darwin e Donlan (2010).

Assim, pode-se encontrar a espessura da biela, w_s , por meio da Equação 2.13

$$w_s = w_t \cdot \cos\theta + l_b \cdot \sin\theta \quad \text{(Equação 2.13)}$$

2.4.2. ESTUDOS COM VIGAS PAREDE COM FURO QUE UTILIZARAM O MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES

Fadhil (2017) estudou o desempenho do MBT em três vigas parede idênticas. As vigas eram simplesmente apoiadas e carregadas com uma carga concentrada no meio do vão. Essas vigas parede possuíam dois furos retangulares simétricos e próximos ao ponto de aplicação da carga. Dimensionou-se as vigas com o MBT e, em seguida, foi realizado o teste experimental. Os resultados mostraram que as vigas foram capazes de suportar uma carga última maior do que a carga final de projeto. A carga de serviço, no entanto, se comportou dentro dos limites estimados. O modelo idealizado para projeto foi capaz de lidar com a distorção que as aberturas próximas ao ponto de aplicação da carga causaram no caminho das tensões e impediram qualquer fragmentação do concreto nessa região. Assim, comprovou-se que, com uma boa escolha de modelo de treliça, foi possível fazer com a viga superasse as forças de cisalhamento diagonais até que se atingissem cargas finais satisfatórias, bem como deflexões que demonstrassem o comportamento dúctil da viga.

Garber *et al* (2014) realizaram um estudo experimental para determinar a acurácia de projeto, por meio de quatro modelos de bielas e tirantes, em uma viga estaticamente indeterminada com três aberturas não simétricas. A armadura foi posicionada de acordo com cada um dos modelos para avaliar a diferença de comportamento entre eles. O artigo também buscou investigar a aplicabilidade da norma americana (ACI, 2014) para estruturas indeterminadas. Após o ensaio das vigas parede o carregamento último excedeu a resistência nominal de projeto, o que demonstrou um conservadorismo do MBT. O modo de ruptura de cada uma das vigas correlacionou-se diretamente com as concentrações de tensão demonstradas na análise elástica do MBT para cada um dos quatro modelos de viga. Assim, com o detalhamento apropriado e com o posicionamento das bielas em regiões de alta tensão a compressão demonstrou-se ser possível prevenir falhas frágeis. E, os modelos que seguiram mais fielmente o modelo elástico de distribuição de tensão geraram projetos de vigas parede mais eficientes.

Guan e Doh (2007) utilizaram o MBT em catorze vigas parede com furos retangulares de diferentes tamanhos e posições. Buscou-se investigar uma configuração de viga que maximizasse a eficiência dos materiais e a rigidez da viga parede com furo em comparação com uma viga parede sem aberturas. Comprovou-se que aberturas que estejam no caminho natural das tensões (linha reta entre o apoio e o ponto de aplicação de carga) têm grande

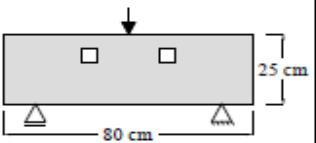
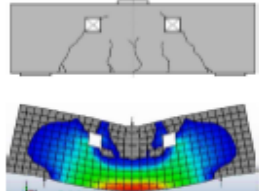
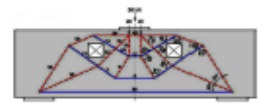
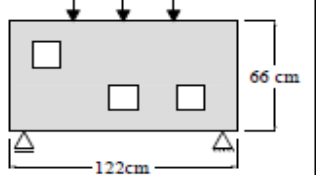
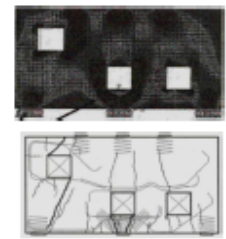
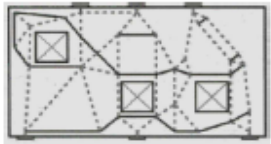
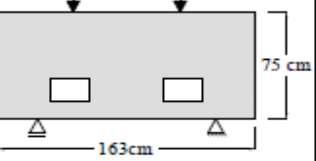
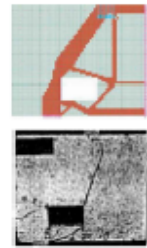
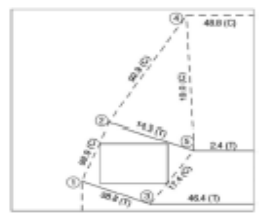
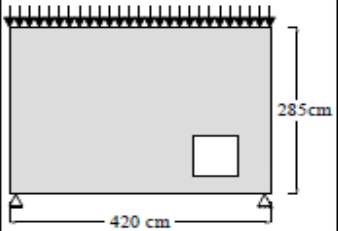
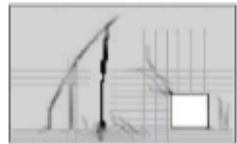
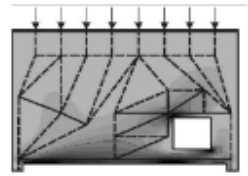
influência no carregamento último, visto que as tensões necessitam encontrar um “novo caminho” ao redor das aberturas. Também foi notado que à medida que se aumenta a região do furo, para uma mesma localização deste, maior é a tendência natural de diminuição da carga última. O estudo demonstrou que ao se projetar tais vigas com o MBT pode-se levar a estruturas que sejam seguras e econômicas em termos de performance estrutura.

Santos *et al* (2019) examina, de modo comparativo, diferentes soluções de projeto para vigas parede com métricas como a energia de deformação, taxa de armadura, carga máxima, eficiência estrutural, fator de segurança e comportamento das fissuras. A viga-parede biapoiada analisada possui uma abertura retangular próxima a um dos apoios e é carregada pontualmente no meio do vão. É produzido um modelo no método dos elementos finitos que simula o comportamento elástico linear do concreto. Adicionalmente, desenvolveu-se oito modelos de bielas e tirantes para a mesma viga parede. Mostrou-se que a aplicação do método dos elementos finitos levou a uma solução com menor propagação de fissuras, apesar de que a maior espessura de fissura é maior do que a desenvolvida no MBT. Todas as oito variações de MBT resultaram em soluções satisfatórias no que tange o Estado Limite Último. Contudo, houve uma variação de até 38,6% na capacidade máxima de carregamento entre os modelos desenvolvidos. Assim, as melhores soluções foram aquelas que atenderam ao critério de menor consumo de energia com melhor discretização da carga e que levaram a estruturas mais econômicas e eficientes.

Muttoni, Ruiz e Niketić (2015) propõe uma abordagem diferente na maneira de se tratar novos projetos ou avaliação de projetos já realizados com o método dos campos de tensão ou pelo modelo de bielas e tirantes. Eles consideram o comportamento dos materiais tanto no regime elástico-plástico quanto no regime rígido plástico. Para avaliação de estruturas existentes comprovam a acurácia do método do campos de tensão em regime elástico-plástico ao analisarem 150 testes de diferentes geometrias e modos de ruptura. E, por fim, ressaltam que, apesar de simples, o método de bielas e tirantes é uma boa maneira de se calcular a armadura necessária de vigas-parede.

O Quadro 2.3, a seguir, resume a principais características dos estudos citados para que possam ser visualizados, com maior facilidade, os tipos de vigas analisadas, os modelos de bielas e tirantes, modo de análise e os resultados obtidos.

Quadro 2.3 - Resumo dos estudos que abordam vigas-parede por meio do método das bielas e tirantes.

REFERÊNCIA	TIPO DE ESTUDO	GEOMETRIA, DIMENSÕES E CONFIGURAÇÃO DE CARGA	MODELO NUMÉRICO E/OU EXPERIMENTAL	MODELO DE BIELAS E TIRANTES	RESUMO DOS RESULTADOS
Fadhil (2017)	Numérico e Experimental				Em todas as 3 vigas do experimento a fissura inicial apareceu por conta da flexão, mas as vigas romperam por cisalhamento. A escolha do MBT mostrou-se satisfatória para resistir às forças cisalhantes e restringiu a propagação de fissuras diagonais ao prevenir uma ruptura prematura e frágil. A deflexão das vigas atendeu aos critérios de norma ao mostrar-se de maneira dúctil.
Garber <i>et al</i> (2014)	Numérico e Experimental				A ruptura nas quatro vigas parede ensaiadas se deu por um misto de flexão e cisalhamento. O MBT se mostrou um método conservador com um fator de segurança de no mínimo 43%. A correta localização das bielas em zonas de alta compressão ajudaram a prevenir falhas frágeis. Os modelos se basearam no comportamento elástico e ofereceram vigas eficientes para o propósito do experimento.
Guan e Doh (2007)	Numérico e Experimental				Os 14 MBT utilizados conseguiram representar com acurácia o trajeto das tensões e o mecanismo de transferência de carga. O experimento evidenciou que o MBT é representativo da realidade mesmo com as mudanças de tamanho e localização dos furos. A depender da localização do furo pode-se ter um aumento de até duas vezes na carga última.
Santos <i>et al</i> (2019)	Numérico				As condições de ruptura foram previstas pelo modelo de análise não linear e, em sua maioria, caracterizaram-se pelo escoamento do aço no meio do vão. A energia de tensão da armadura se comportou de maneira inversamente proporcional ao fator de segurança. Dessa forma, MBT que consideram uma grande discretização do carregamento constituem uma solução estrutural mais racional do ponto de vista energético.

2.4.3. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES EM VIGAS PAREDE REFORÇADAS COM CFRP

O artigo de Dhahir (2018) propõe equações que avaliam a resistência de vigas parede reforçadas com CFRP, compara-as com as formulações já descritas em normas internacionais e realiza um estudo paramétrico, que varia parâmetros que influem na resistência ao cisalhamento dessas vigas, para checar se as equações propostas representam o efeito de mudança de alguns parâmetros que controlam a resistência cisalhante.

O MBT proposto por Dhahir (2018) assume que o carregamento é transmitido de forma direta do apoio de carregamento para os apoios através de uma biela de concreto. O que muda neste modelo para os que foram vistos anteriormente neste trabalho é que as fibras de CFRP que podem trabalhar em conjunto, ou não, com os estribos de aço fazem com que seja providenciado uma resistência às forças transversais. Dessa forma, as deformações se reduzem e a resistência à compressão da biela inclinada aumenta, o que geralmente leva a um aumento da resistência cisalhante das vigas parede. A Figura 2.22 ilustra esse processo:

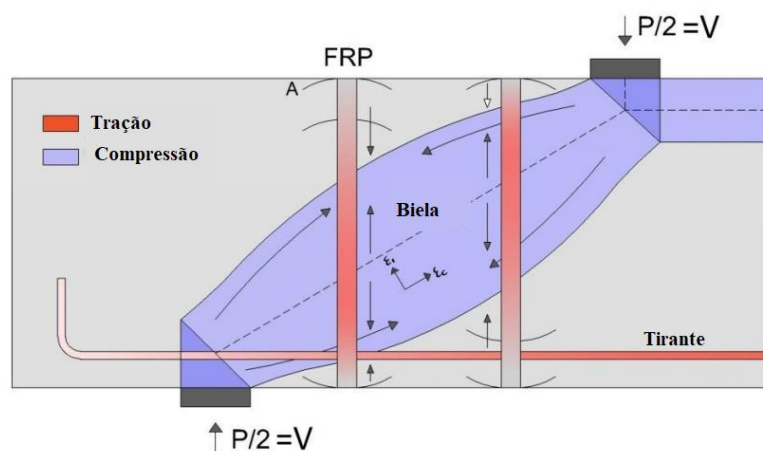


Figura 2. 22 - Mecanismo proposto de transferência de cargas. Adaptado de Dhahir (2018).

Dhahir (2018) considera que a força resistida pelas lâminas de CFRP dependem essencialmente da rigidez axial delas. Seu modelo propõe que a carga transportada pelo reforço será dispersa acima e abaixo da biela inclinada, como mostra a figura anterior. O MBT proposto também assume que as zonas nodais estão submetidas a tensões não hidrostáticas, o que leva a um estado de tensão diferente em casa face de zona nodal. Dessa forma, Dhahir (2018) formula quatro equações para diferentes tipos de reforço em vigas parede: reforço de CFRP vertical, reforço de CFRP inclinado, reforço de CFRP horizontal e viga parede com reforço de CFRP

com estribos de aço na vertical. A Figura 2.23 mostra os tipos de reforço previstos nas equações:

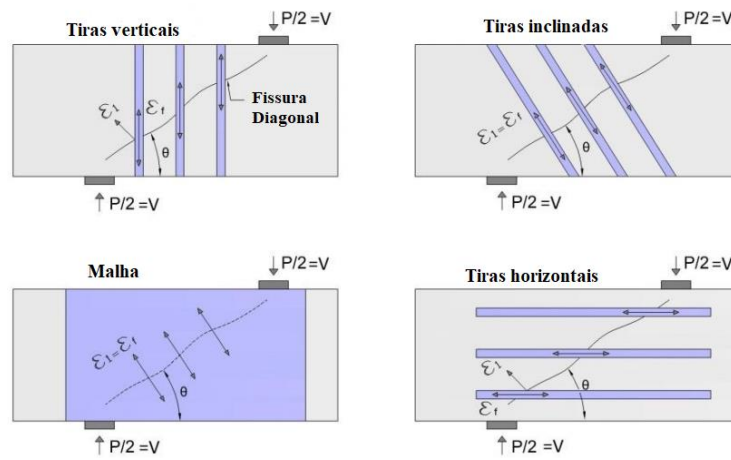


Figura 2. 23 - Diferentes tipos de orientações de CFRP previstos nas equações de Dhahir (2018). Adaptado de Dhahir (2018).

A equação geral para a força resistente adicional (V_c) que o reforço promove nas vigas-parede está apresentado na Equação 2.14:

$$V_c = \frac{-y + \sqrt{y^2 - 4xz}}{2x} \quad \text{(Equação 2.14)}$$

Essa equação serve como base para os diferentes tipos de arranjos de reforço. Dessa forma, para cada tipo de arranjo, os valores de x e y são diferentes. Para o parâmetro z , a fórmula é a mesma como evidenciado na Equação 2.15:

$$z = -(l_b \text{sen}^2\theta + c \cdot \text{sen}2\theta) b f_{cd} \quad \text{(Equação 2.15)}$$

Para as tiras de CFRP inclinadas esses valores de x e y são:

$$x = \frac{170}{6A_f E_f \text{sen}\theta} \quad \text{(Equação 2.16)}$$

$$y = 0,8 \quad \text{(Equação 2.17)}$$

Para as os tipos de reforço apresentados a seguir o valor de y é calculado da mesma forma, conforme apresentado pela Equação 2.18:

$$y = 0,34\tan^2\theta + 0,8 \quad (\text{Equação 2.18})$$

Para as vigas com reforço na vertical a Equação 2.19 mostra como calcular o valor de x que deve ser utilizado na equação geral:

$$x = \frac{170 + 170\tan^2\theta}{6A_f E_f \tan\theta} \quad (\text{Equação 2.19})$$

Em vigas com tiras de CFRP na horizontal, os valores de x é:

$$x = \frac{170 + 170\cot^2\theta}{6A_f E_f} \quad (\text{Equação 2.20})$$

Em vigas que, além de reforço na vertical, ainda contem com estribos verticais que auxiliem no combate ao cisalhamento o valor de x é dado por:

$$x = \frac{170 + 170\tan^2\theta}{6(A_{sv} + A_f n_f) E_s \tan\theta} \quad (\text{Equação 2.21})$$

Entretanto, para todos os casos de aumento na resistência cisalhante promovidos pelo reforço, o valor de V_c (calculado por meio da Equação 2.14) não deve exceder:

$$V_{c,máx} = 0,85(l_b \text{sen}^2\theta + c. \text{sen}2\theta) b f_{cd} \quad (\text{Equação 2.22})$$

O MBT proposto para análise de vigas-parede reforçadas com CFRP foi utilizado em 46 vigas parede, de diferentes artigos, com diferentes quantidades e tipos de CFRP. Os resultados mostraram que o MBT proposto por Dhahir (2018) produziu resultados precisos e consistentes com média de previsão de carga experimental de 99% e desvio padrão de 13%.

O estudo de Hanoon *et al.*(2017) utiliza o método de otimização por enxame de partículas (PSO, *Particle swarm optimization*) para procurar um modelo de bielas e tirantes ideal para a viga parede a partir da determinação do coeficiente de distribuição de tensão e do fator de redução de tensão de tração do concreto. O modelo considera que a falha irá ocorrer de duas maneiras nas vigas-parede reforçadas com CFRP: a descolagem do CFRP da viga parede e a ruptura por tração do CFRP. Assim, foram realizados cálculos iterativos para encontrar a resistência última das vigas parede reforçadas com CFRP. O MBT proposto foi validado por meio de dados experimentais já existentes na literatura. Assim, os resultados mostraram que o modelo proposto conta com alta precisão e consegue estimar, satisfatoriamente, a resistência última ao cisalhamento de tais vigas-parede. O valor médio da resistência, dos modelos gerados, foi 10% maior do que os valores experimentais e o desvio padrão foi de 9,8%.

2.5. FORCEPAD e CAST

O ForcePAD é uma ferramenta computacional intuitiva para visualização do comportamento de estruturas sujeitas a carregamentos. Este é um software que foi pensado para que o usuário consiga, de forma rápida, aplicar cargas e definir as condições de contorno na estrutura. Com isso, o programa tem o intuito de gerar imagens intuitivas do caminhos das tensões e deformações do material (FORCEPAD, 2017). Esta ferramenta computacional trabalha com modelos bidimensionais e foi idealizada para fins didáticos. Apesar de não ter sido projetado para fins de análises mecânicas avançadas, ele contém opcionalidades que fornecem características comportamentais otimizadas baseadas em elementos finitos (LINDEMANN, SANDBERG e K., 2004). A Figura 2.24 mostra uma das interfaces deste software:

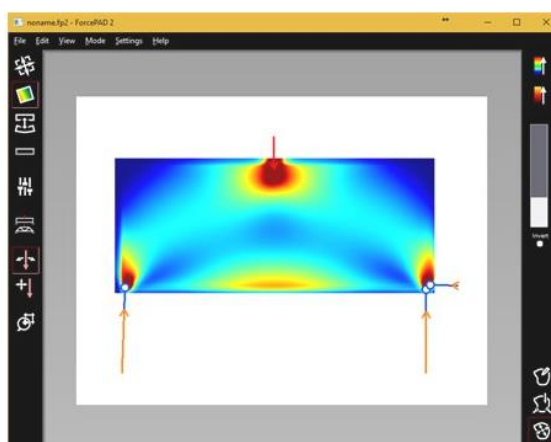


Figura 2. 24 – Tela principal do software ForcePAD ilustrando as tensões principais de uma viga-parede. Fonte: autor.

O CAST (*Computer Aided Strut and Tie*, 2000), é um software que realiza análise e dimensionamento de uma estrutura de concreto armado por meio do Método de Bielas e Tirantes (MBT). O programa foi desenvolvido por dois pesquisadores da Universidade de Illinois nos Estados Unidos, Daniel A. Kuchma e Tjen N. Tjhin, que no ano de 2001 apresentaram um artigo (*CAST Design Tool*) que mostra os atributos dessa ferramenta.

O programa CAST é de domínio público e o primeiro passo dos usuários é a definição dos limites das regiões descontínuas dentro do elemento estrutural. O usuário pode posicionar todos os nós livremente e definir a forma da estrutura a ser analisada. Os pontos de aplicação de carga, apoios, propriedades do aço e do concreto também podem ser definidas. Algo que o programa não faz é definir o melhor modelo de bielas e tirantes, ficando a cargo do projetista, com sua experiência e conhecimento técnico científico para encontrar o modelo adequado. Após a definição da treliça os esforços são exibidos ao longo de todos os seus elementos, sendo possível analisar, a partir desse momento, a capacidade resistente das bielas, tirantes e as tensões geradas nas interfaces das zonas nodais (KUCHMA e TJHIN, 2001).O passo-a-passo da modelagem dentro do programa está ilustrado na Figura 2.25 a seguir:

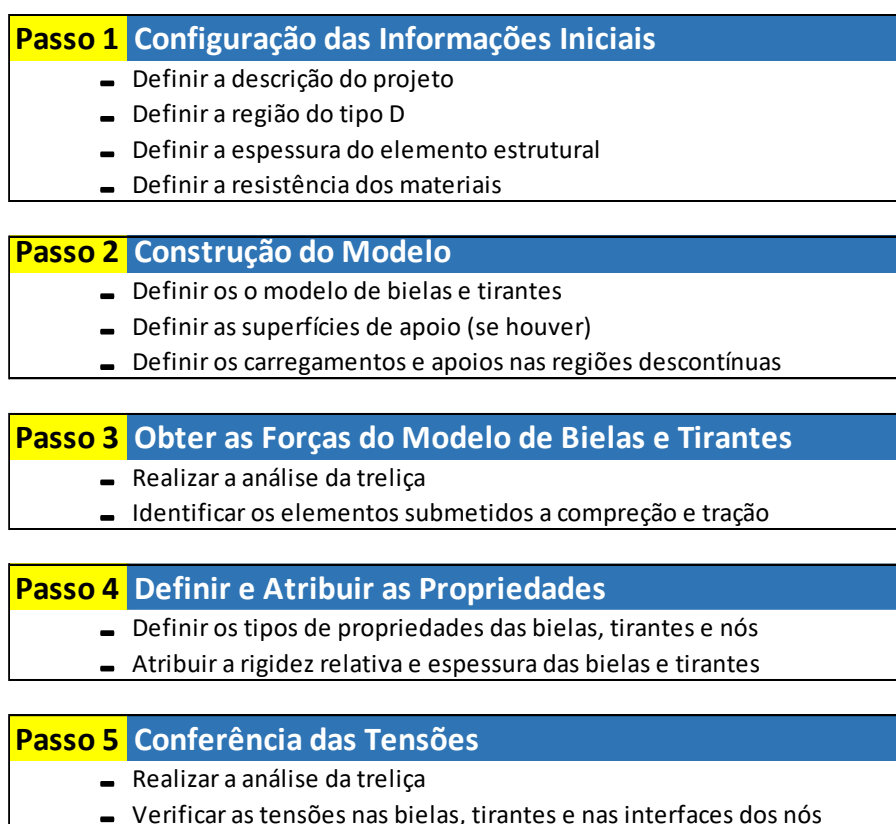


Figura 2. 25 - Passo-a-passo da modelagem no CAST. Adaptado de (SANTOS, 2006).

3. METODOLOGIA

A metodologia foi realizada sob duas etapas: análise das vigas-parede não reforçadas ensaiadas por Neta(2019) em seu estudo preliminar implementando um modelo de bielas e tirantes que represente o estudo experimental; e predição de carga de ruptura através dos modelos calibrados na 1ª etapa para as vigas reforçadas a serem ensaiadas por Neta (2019). As vigas-parede estudadas foram a DB-H1 e DB-H2 apresentadas na Figura 2.8. Para todos os modelos de bielas e tirantes gerados, considerou-se que essas vigas eram do tipo NA (sem ancoragem). A Tabela 3.1 apresenta quais foram as vigas-parede analisadas:

Tabela 3. 1 – Nomenclatura das vigas estudadas. Fonte: autor.

	Viga-Parede	Abertura	Presença, ou não, de armadura na alma	Reforço	Nomenclatura
1ª etapa análise	DB	H1	NR	-	DB-H1-NR
			WR	-	DB-H1-WR
		H2	NR	-	DB-H2-NR
			WR	-	DB-H2-WR
2ª etapa predição de carga de ruptura		H1	NR	S	DB-H1-NR-S
			WR	S	DB-H1-WR-S
		H2	NR	S	DB-H2-NR-S
			WR	S	DB-H2-WR-S

O primeiro passo adotado foi avaliar como se comportam as tensões quando nos modelos de bielas e tirantes há o carregamento da estrutura. Como as vigas-parede de estudo possuem uma geometria complexa utilizou-se a ferramenta computacional ForcePAD para analisar as direções das principais tensões. Desse modo, foi possível analisar quais regiões estão comprimidas e tracionadas para posicionar os elementos da treliça dentro das vigas-parede. Assim, o próximo passo foi definir um modelo de bielas e tirantes que representasse, de maneira confiável, o caminho de cargas dentro destes elementos estruturais.

É necessário, para o uso do método das bielas e tirantes, que o usuário tenha experiência para estabelecer o posicionamento dos elementos que reflitam o real comportamento da estrutura. Para a definição dos modelos deste trabalho foi considerado que a angulação entre elementos da treliça obedeceriam as limitações impostas, como apresentado na Tabela 2.4, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, teve-se a preocupação de garantir que as bielas realmente estivessem nas regiões de compressão apresentadas pelo ForcePAD. Com relação aos tirantes, buscou-se garantir que o centroide das barras coincidissem com o centroide das armaduras (de modo a respeitar o cobrimento estabelecido). E, para as vigas com reforço, teve-se a mesma preocupação em garantir que o reforço estivesse localizado de maneira

condizente com o tirante. Todos esses cuidados fizeram com que fossem geradas algumas treliças que, por vezes, não estavam dispostas de modo a apresentar esforços de tração, onde se deveria esperar este tipo de esforço, e esforços de compressão, onde se esperava tal comportamento. Por fim, produziu-se os modelos de bielas e tirantes que apresentavam as características requeridas e com comportamento semelhante ao apresentado pelo software de análise.

Nos modelos gerados foi considerado que as bielas possuem um formato prismático com espessura constante e que podem ocorrer tensões não-hidrostáticas nas zonas nodais. Para o cálculo da resistência das bielas e zonas nodais utilizou-se as equações da NBR 6118 (ABNT, 2014), contudo utilizaram-se os valores médios de resistência do concreto ensaiados por Neta (2019) – conforme a Tabela 2.2 - e não se utilizaram os coeficientes de minoração das resistências, já que este é um estudo de análise e de previsão de carga, não de dimensionamento da estrutura. Já as interfaces das regiões nodais foram calculadas conforme a Equação 2.13 considerando também os valores médios de resistência do concreto ensaiados por Neta (2019).

Para os tirantes foi considerado que o aço, reforço de CFRP ou ambos (a depender da viga-parede analisada) resistem à tensões de tração quando posicionados nas regiões dos tirantes. A resistência do aço utilizada é a mesma apresentada na Tabela 2.3, decorrente dos ensaios realizados. Nos casos em que não havia armadura ou reforço nas regiões dos tirantes, o concreto resistiu às tensões de tração e sua resistência média a tração foi apresentada na Tabela 2.2. Nas interfaces de zonas nodais apenas foi considerado como espessura de tirantes, w_t , o aço da armadura, ignorando-se o reforço, já que apenas o aço entra em contato com a zona nodal.

Na perspectiva de análise fez-se modelos de bielas e tirantes que simulassem o comportamento das vigas-parede não reforçadas ensaiadas no Estudo Preliminar do trabalho de Neta (2019). Os modelos de bielas e tirantes foram gerados por meio do CAST e, em seguida, calculou-se qual a carga máxima que fazia com que os elementos de barra (biela e tirante) ou zonas nodais fossem levadas à ruína. Para que os elementos de barra atingissem sua carga máxima portante bastava que a tensão efetiva atuante no elemento, f_{ef} , fosse igual à tensão máxima resistida pelo elemento, f_{res} . Do mesmo modo, para os nós, bastava que a tensão efetiva atuante em cada interface nodal alcançasse a tensão máxima resistida pelo tipo de zona nodal (CCC, CCT, CTT ou TTT). Após a definição de qual componente da treliça que atingia a sua tensão máxima de resistência iniciava-se o processo de avaliação e comparação

do resultado experimental do Estudo Preliminar de Neta (2019), nos quesitos carga última e modo de ruptura, com o resultado adquirido por meio do modelo de bielas e tirantes.

Na perspectiva predição de carga de ruptura foram utilizadas as mesmas características dos materiais experimentados por Neta (2019), a fim de manter as vigas-parede com os mesmos atributos do Estudo Preliminar. O CAST, neste processo, foi utilizado apenas para se descobrir se saber o módulo de carga atuante nos elementos da treliça. Para a inserção da carga adicional que os reforços acarretam nos tirantes, foram produzidas planilhas eletrônicas de cálculo que somavam a força resistida pelo aço e a força resistida adicional provocada pelo reforço de CFRP, tendo em vista que com o CAST isto não é possível. Além disso, foi definido previamente quais seriam as características do reforço a ser utilizado nos ensaios futuros de acordo com o trabalho de Neta (2019). Dessa forma, foi possível verificar qual o ganho de carga máxima atuante que o reforço de CFRP gera nas vigas-parede de acordo com os modelos de bielas e tirantes produzidos. Para se calcular a carga adicional que os tirantes podem suportar foram utilizadas as equações de Dhahir (2018) apresentadas nas Equações de 2.14 a 2.22 deste texto. Desse modo, a carga máxima resistida pelo aço, $V_{máx,aço}$, e a carga máxima que pode ser resistida pelo reforço, $V_{máx,FRP}$, foram comparadas com a carga atuante em cada tirante que foi considerado reforçado. A Figura 3.1 mostra o fluxograma da metodologia deste trabalho:

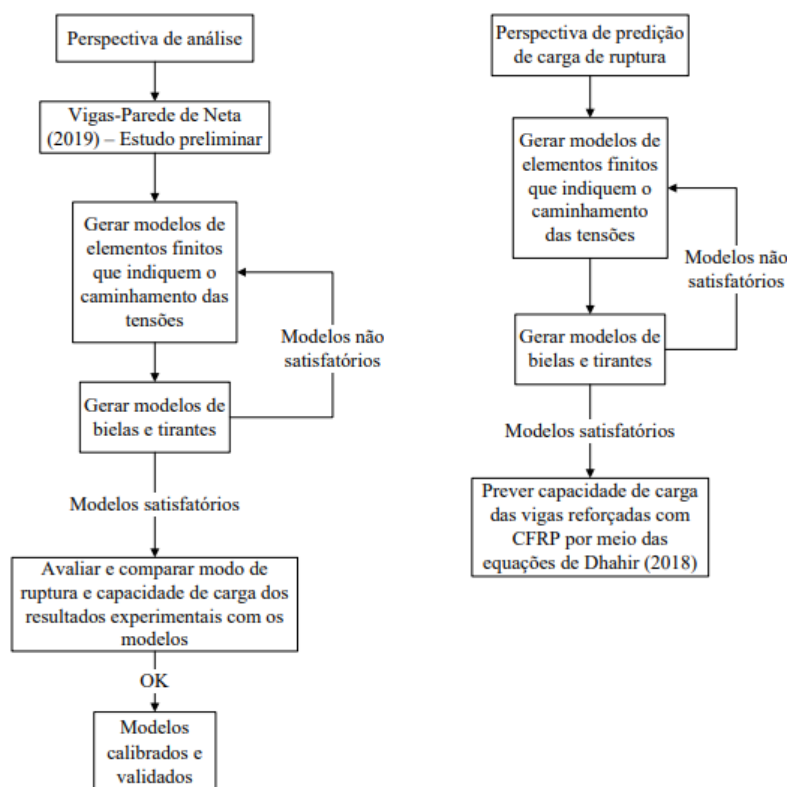


Figura 3. 1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

3.1 INSERÇÃO DO REFORÇO NO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES

O reforço será introduzido no método de bielas e tirantes de modo que os tirantes inclinados e horizontais resistam às tensões de tração. A força resistida pelo reforço de CFRP dependerá principalmente da sua rigidez axial. Foi considerado que, assim que o aço atingisse sua tensão de escoamento, as tensões de tração subitamente se redistribuiriam para as tiras de CFRP de modo a aumentar a tensão resistente do tirante até o máximo da resistência combinada entre aço e reforço. Dessa forma, foram utilizadas as equações de Dhahir (2018) para vigas-parede reforçadas com CFRP. Para este trabalho foi considerada apenas uma camada de reforço como será visto nas propriedades do reforço, Tabela 4.2, a ser utilizado por Neta (2019)

Foram realizadas algumas adequações com relação à equações de Dhahir (2018), tendo em vista a complexidade geométrica das vigas-parede estudadas. Foi considerado que: não seria necessário que as tensões cisalhantes caminhassem diretamente do ponto de aplicação de carga até os apoios e que as tensões às quais os tirantes com CFRP resistem poderiam ser redistribuídas entre os nós.

4. MODELAGEM DAS VIGAS, COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR NETA (2019) E ESTIMATIVA DE GANHO DE RESISTÊNCIA PARA AS VIGAS REFORÇADAS.

4.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Na 1ª etapa de análise visa-se a construção de modelos de bielas e tirantes que simulem o comportamento das vigas ensaiadas por Neta (2019). Para isso, é necessário conhecer as propriedades mecânicas do aço e do concreto que foram definidas por meio de ensaios de caracterização. Alguns desses valores já foram apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3, como as propriedades mecânicas do concreto e do aço. Os valores médios desses resultados serão utilizados nas bielas, tirantes e zonas nodais para que os resultados dos modelos se aproximem ao máximo da realidade do experimento. Para o cálculo dos modelos das vigas-parede serão utilizados os seguintes valores de resistências das bielas, tirantes e zonas nodais:

Tabela 4. 1– Resistência média dos materiais e nós. Fonte: autor.

Resistência média dos materiais	
f_{cmedio} (MPa)	47,64
$f_{ctmedio}$ (MPa)	3,70
$f_{ysmedio}$ (MPa)	552,30

Resistências dos nós - de acordo com a NBR 6118(2014)	
f_{c1} (CCC) - MPa	32,78
f_{c2} (TTT) - MPa	23,14
f_{c3} (CCT ou CTT) - MPa	27,76

Os materiais de reforço, tiras de laminado de CFRP, não foram utilizadas no Estudo Preliminar de Neta (2019) e, portanto, não foram realizados ensaios de caracterização de resistência desses materiais. Dessa forma, serão utilizados os valores de resistência e módulo de elasticidade comerciais desses reforços e a seção transversal de tiras de laminado de CFRP estabelecida por Neta (2019). A Tabela 4.2 mostra as propriedades do reforço:

Tabela 4. 2 - Propriedades do reforço de CFRP (NETA, 2019).

Propriedades do reforço de tiras de laminado de CFRP	
A_{sr} (mm ²)	14
E_f (GPa)	200

4.2. DB -H1

Na Figura 4.1 a seguir é possível ver o caminho das tensões nas vigas com uma única abertura, a DB-H1, gerada pelo ForcePAD:

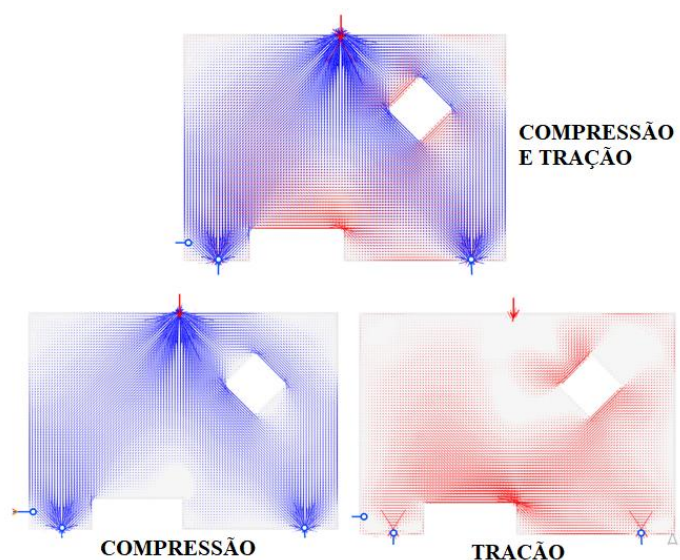


Figura 4. 1 – Tensões principais na viga DB-H1. Fonte: autor.

As regiões comprimidas possuem uma coloração azul e as tracionadas uma coloração vermelha. Ao se analisar a Figura 4.1 é possível perceber, na parte esquerda da viga-parede, que é formada uma grande biela comprimida que vai do ponto de aplicação da carga ao apoio de maneira direta, praticamente sem desvios. Nas regiões acima e ao lado da reentrância nota-se tensões de flexo-tração, sendo que no canto superior direito estão presentes as maiores tensões pela intensidade da coloração vermelha. No lado direito da viga percebe-se que as tensões precisam circundar o furo para que possam chegar ao apoio. Esse caminho das tensões gera, a 45° da horizontal e de modo paralelo as faces da abertura em losango, a

formação de bielas. Já a 135° da horizontal nota-se, também de maneira paralela, a formação de tirantes. A Figura 4.2 apresenta o modelo de bielas e tirantes, gerado pelo CAST, que foi criado com base na análise do caminho das tensões geradas pelo ForcePAD:

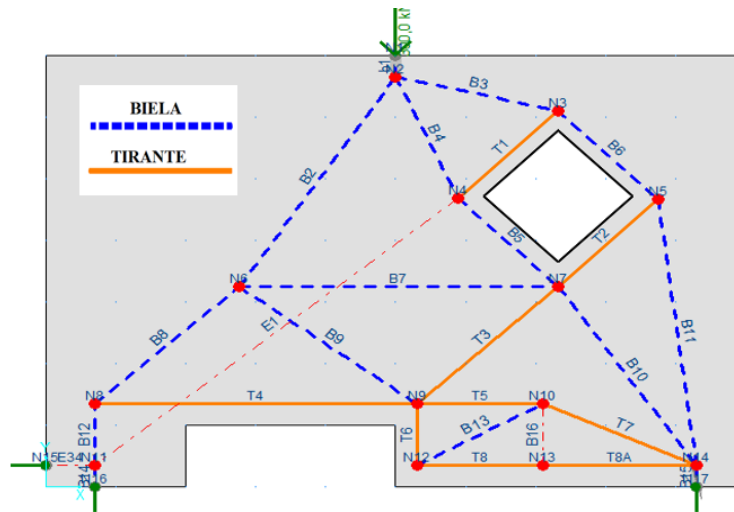


Figura 4. 2 - Modelo de Bielas e Tirantes da viga-parede DB-H1. Fonte: autor.

A Figura 4.2 apresenta as propriedades da treliça, em que as bielas são representadas por linhas azuis tracejadas, os tirantes por linhas alaranjadas contínuas e os elementos estabilizadores – que não absorvem carga, mas garantem a isostaticidade da treliça – são representados por linhas mais finas de traço e ponto. Os pontos vermelhos são os nós e eles identificam os pontos de encontro entre os tirantes e as bielas. A Tabela 4.3 mostra o posicionamento dos nós dentro da viga. Foi definido que o canto inferior esquerdo da viga seria o ponto inicial (0,0).

Tabela 4. 3 – Propriedades dos nós. Fonte: autor.

Identificação do Nó	Função	X (mm)	Y (mm)
N1	Ponto de Aplicação da Carga	500	700
N2	Biela e Tirante	500	665
N3	Biela e Tirante	731,7	610
N4	Biela e Tirante	589,5	467,9
N5	Biela e Tirante	875	467,9
N6	Biela e Tirante	276,1	324,5
N7	Biela e Tirante	732,9	324,5
N8	Biela e Tirante	70	135
N9	Biela e Tirante	530	135
N10	Biela e Tirante	710	135
N11	Biela e Tirante	70	35
N12	Biela e Tirante	530	35
N13	Biela e Tirante	710	35
N14	Biela e Tirante	930	35
N15	Apoio	0	35
N16	Apoio	70	0
N17	Apoio	930	0

A Tabela 4.4 apresenta informações a respeito da geometria das barras da treliça, seus respectivos comprimentos, funções e a direção para o modelo criado.

Tabela 4. 4 - Propriedades geométricas das barras. Fonte: autor.

Identificação da barra	Função	Comprimento (mm)	Direção (°)
B1	Biela	35	90
B2	Biela	407,52	56,67
B3	Biela	238,14	346,65
B4	Biela	216,47	294,42
B5	Biela	202,8	315
B6	Biela	202,66	315
B7	Biela	456,8	0
B8	Biela	279,98	42,6
B9	Biela	316,82	323,26
B10	Biela	350,23	304,25
B11	Biela	435,19	97,26
B12	Biela	100	90
B13	Biela	205,91	29,05
B14	Biela	35	270
B15	Biela	35	270
E1	Estabilizador	676,23	219,8
E2	Estabilizador	70	180
T1	Tirante	201,03	44,98
T2	Tirante	201,03	45,02
T3	Tirante	277,63	43,04
T4	Tirante	460	0
T5	Tirante	180	0
T6	Tirante	100	90
T7	Tirante	241,66	335,56
T8	Tirante	400	0

4.2.1. DB-H1-NR

Após a definição do modelo para a viga com uma abertura na alma verificou-se qual é a carga máxima suportada pelo modelo, dada as diferentes condições de contorno (presença ou não de armadura na alma e presença ou não de reforço. A viga DB-H1-NR, ensaiada experimentalmente por Neta (2019) em seu estudo preliminar, não possui armadura na alma. A Figura 4.3 mostra o comparativo entre o modelo gerado e a armação da viga DB-H1-NR:

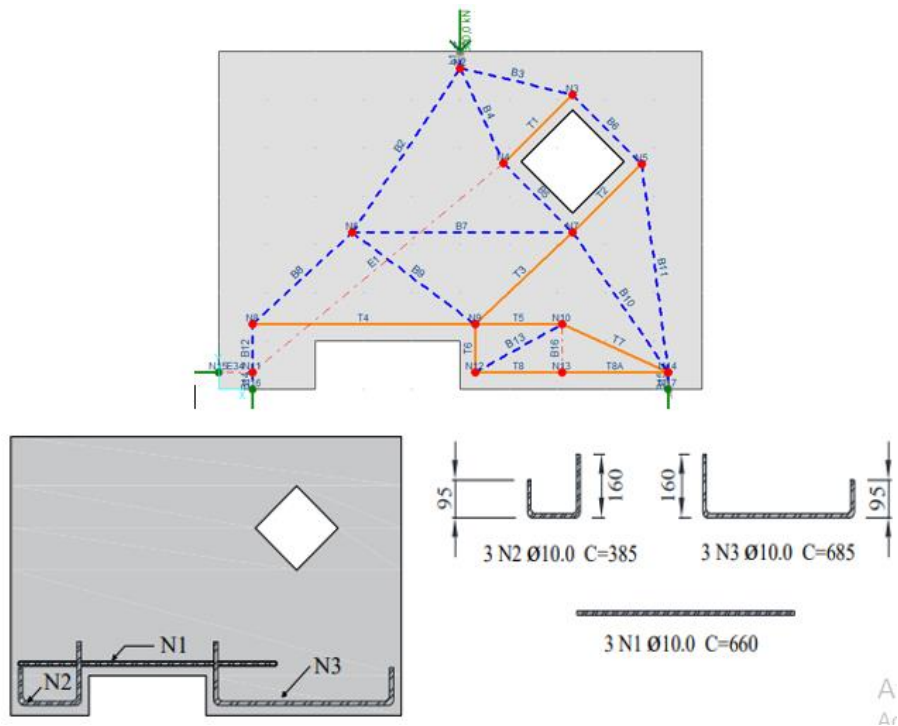


Figura 4. 3 – Comparativo entre o modelo DB-H1 e a armadura da viga DB-H1-NR de Neta (2019).

Percebe-se na Figura 4.3 que, por conta da ausência de armadura na alma, o material que resistirá aos esforços de tração nos tirantes T1, T2 e T3 será o concreto. Por outro lado, todos os outros tirantes serão resistidos pelas armaduras de aço. O passo seguinte, após definição do modelo e aplicação do modelo para a viga-parede ensaiada, foi verificar qual a solicitação que levará o modelo à ruína e compará-lo com o valor experimental.

A Figura 4.4 apresenta as forças solicitadas em cada membro da treliça para o carregamento máximo que ela suporta. Os valores com sinal positivo indicam tração e negativos compressão. Já os valores entre parênteses mostram a razão entre a solicitação no elemento e a resistência do mesmo, ou seja, quanto mais próximo de 1 for essa razão mais o elemento da treliça estará perto de alcançar a sua máxima capacidade portante.

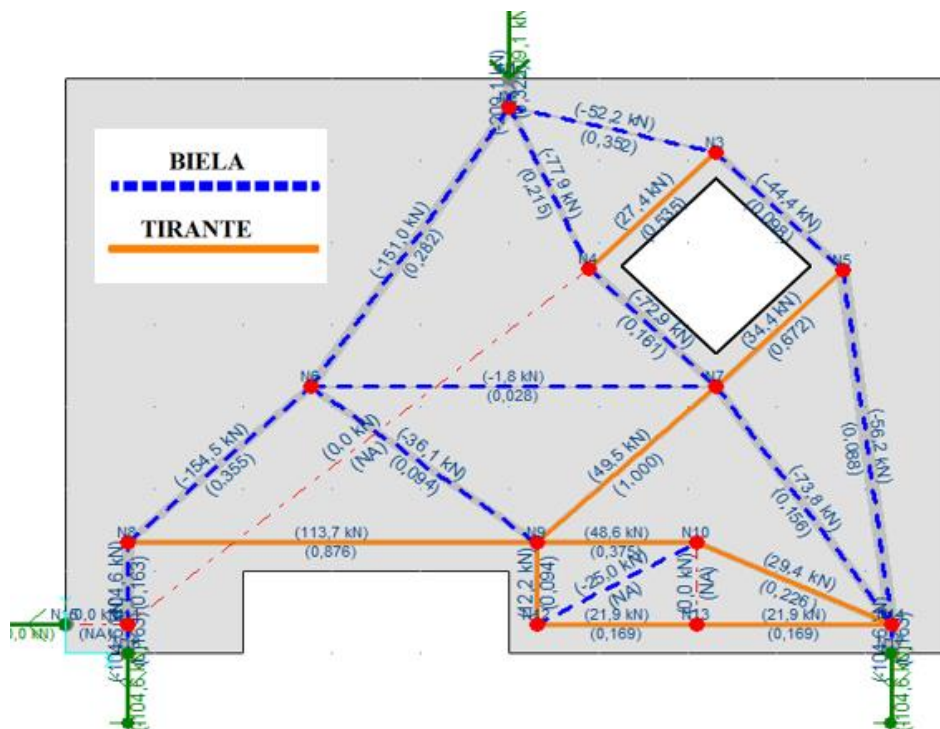


Figura 4. 4 - Forças nas barras da treliça DB-H1-NR.

Pela análise da Figura 4.4 nota-se que o tirante T3 foi o elemento da treliça que atingiu a sua máxima capacidade a uma carga de 209,13kN. Os fatores de utilização das bielas e tirantes são apresentadas na Tabela 4.5:

Tabela 4. 5 – Fatores de utilização das barras da treliça da viga DB-H1-NR. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
B1	Biela Prismática	-209,13	14,00	1,07	3,28	32,55%
B2	Biela Prismática	-151,00	11,70	0,92	3,28	28,13%
B3	Biela Prismática	-52,15	3,23	1,15	3,28	35,15%
B4	Biela Prismática	-77,87	7,91	0,70	3,28	21,44%
T1	Tirante de Concreto	27,40	9,90	0,20	0,37	53,43%
B5	Biela Prismática	-72,92	9,90	0,53	3,28	16,05%
B6	Biela Prismática	-44,41	9,90	0,32	3,28	9,78%
T2	Tirante de Concreto	34,37	9,90	0,25	0,37	67,02%
B7	Biela Prismática	-1,81	14,00	0,01	3,28	0,28%
B8	Biela Prismática	-154,49	9,48	1,16	3,28	35,53%
B9	Biela Prismática	-36,11	8,37	0,31	3,28	9,40%
T3	Tirante de Concreto	49,50	9,56	0,37	0,37	100,00%
B10	Biela Prismática	-73,82	10,34	0,51	3,28	15,55%
B11	Biela Prismática	-56,19	13,89	0,29	3,28	8,82%
B12	Biela Prismática	-104,57	14,00	0,53	3,28	16,28%

Tabela 4. 5– Fatores de utilização das barras da treliça da viga DB-H1-NR. Fonte: autor. (continuação)

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm²)	f_{res} (kN/cm²)	f_{ef}/f_{res}
T4	Tirante de Aço	113,7	-	48,26	55,23	87,38%
T5	Tirante de Aço	48,66	-	20,65	55,23	37,39%
T6	Tirante de Aço	12,13	-	5,15	55,23	9,32%
B13	Biela Prismática	-25,03	6,8	0,26	3,28	8,02%
T7	Tirante de Aço	29,35	-	12,46	55,23	22,55%
T8	Tirante de Aço	21,89	-	9,29	55,23	16,82%
B14	Biela Prismática	104,57	14	0,53	3,28	16,28%
B15	Biela Prismática	104,57	14	0,53	3,28	16,28%

Já a Tabela 4.6 mostra os fatores de utilização dos nós da treliça da viga DB-H1-NR:

Tabela 4. 6– Fatores de utilização dos nós da viga DB-H1-NR. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força(kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	209,13	14,00	1,07	3,28	32,55%
		B2	151,00	11,70	0,92	3,28	28,13%
		B3	52,15	3,23	1,15	3,28	35,15%
		B4	77,87	7,91	0,70	3,28	21,44%
N3	CCT	B3	52,15	3,23	1,15	2,78	41,50%
		T1	27,40	6,00	0,33	2,78	11,75%
		B6	44,41	9,90	0,32	2,78	11,54%
N4	CCT	B4	77,87	7,91	0,70	2,78	25,31%
		T1	27,40	6,00	0,33	2,78	11,75%
		B5	72,92	9,90	0,53	2,78	18,95%
N5	CCT	B6	44,41	9,90	0,32	2,78	11,54%
		T2	34,37	6,00	0,41	2,78	14,74%
		B11	56,19	13,89	0,29	2,78	10,41%
N6	CCC	B2	151,00	11,70	0,92	3,28	28,13%
		B7	1,81	14,00	0,01	3,28	0,28%
		B8	154,49	9,48	1,16	3,28	35,53%
		B9	36,11	8,37	0,31	3,28	9,40%
N7	CCT	B5	72,92	9,90	0,53	2,78	18,95%
		T2	34,37	9,90	0,25	2,78	8,93%
		B7	1,81	14,00	0,01	2,78	0,33%
		T3	49,50	9,56	0,37	2,78	13,33%
		B10	73,82	10,34	0,51	2,78	18,36%
N8	CCT	B8	154,49	9,48	1,16	2,78	41,94%
		T4	113,70	6,00	1,35	2,78	48,75%
		B12	104,57	14,00	0,53	2,78	19,22%
N9	TTT	T4	113,70	6,00	1,35	2,31	58,50%
		B9	36,11	8,37	0,31	2,31	13,31%
		T3	49,50	9,56	0,37	2,31	15,99%
		T5	48,66	6,00	0,58	2,31	25,04%
N10	CCT	T5	48,66	6,00	0,58	2,78	20,86%
		B13	25,03	6,80	0,26	2,78	9,47%
		T7	29,35	6,00	0,35	2,78	12,58%
N12	CTT	T6	12,13	6,00	0,14	2,78	5,20%
		T8	21,89	6,00	0,26	2,78	9,39%
		B13	25,03	6,80	0,26	2,78	9,47%
N14	CTT	T8	21,89	6,00	0,26	2,78	9,39%
		T7	29,35	6,00	0,35	2,78	12,58%
		B10	73,82	10,34	0,51	2,78	18,36%
		B11	56,19	13,89	0,29	2,78	10,41%
		B15	104,57	14,00	0,53	2,78	19,22%

A capacidade máxima de carregamento da viga foi atingida por conta da resistência máxima a tração do Tirante de concreto T3. A falta de armadura nessa região faz com que a viga tenda a sofrer com tensões cisalhantes nessa região levando-a a obter uma ruptura brusca. No Estudo Preliminar realizado por Neta(2019) as duas vigas DB-H1-NR apresentaram o seguinte comportamento, na ruptura, apresentado na Figura 4.5:



Figura 4. 5 - Modo de Ruptura das duas vigas DB-H1-NR. Adaptado de Neta (2019).

As vigas de Neta (2019) apresentaram um comportamento frágil e logo após o surgimento das primeiras fissuras chegou à ruína. O lado direito da estrutura é o que apresenta praticamente a totalidade das trincas. Traçando um paralelo com o modelo de bielas e tirantes apresentado, nota-se que os tirantes de concreto T1 e T2 realmente tem uma alta solicitação. As trincas ortogonais às interfaces superior esquerda e inferior direita das aberturas em losango mostradas na Figura 4.5 corroboram isso. Há também, nas duas vigas ensaiadas, a formação de uma fissura que se estende do canto superior direito da reentrância até a furo, região na qual o tirante T3 se encontra. Este elemento, de acordo com o modelo gerado, que levaria a viga à ruína, e com base no padrão de fissuração da viga, pode-se dizer que o modelo encontra-se condizente com o comportamento apresentado. Há de se levar em consideração também que durante o experimento notou-se um escorregamento da armadura do tirante representado por T4. Desse modo, esta armadura perdeu a ancoragem e deslizou dentro da viga-parede, fazendo com que ela não obtivesse o comportamento desejado. A Tabela 4.7 exhibe o comparativo numérico de carga média máxima ensaiada ($P_{u,média}$) e carga máxima encontrada no modelo($P_{u,MBT}$):

Tabela 4. 7 –Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H1-NR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.

$P_{u,média}$ (kN)	$P_{u,MBT}$ (kN)	Diferença (%)
200,67	209,13	4,22%

A carga última do modelo de bielas e tirantes proposto - $P_{u,MBT}$ - apresentou um resultado numérico próximo das vigas ensaiadas por Neta (2019), $P_{u,média}$, o que indica que o modelo satisfaz o comportamento esperado e a carga de ruína.

4.2.2. DB -H1-NR-S

A viga-parede DB-H1-NR-S difere da DB-H1-NR apenas no quesito reforço, já que esta conta com tiras de CFRP que visam combater o cisalhamento e flexão. A Figura 4.6 mostra a proposta de reforço da viga, sua armadura e o modelo de bielas e tirantes gerado:

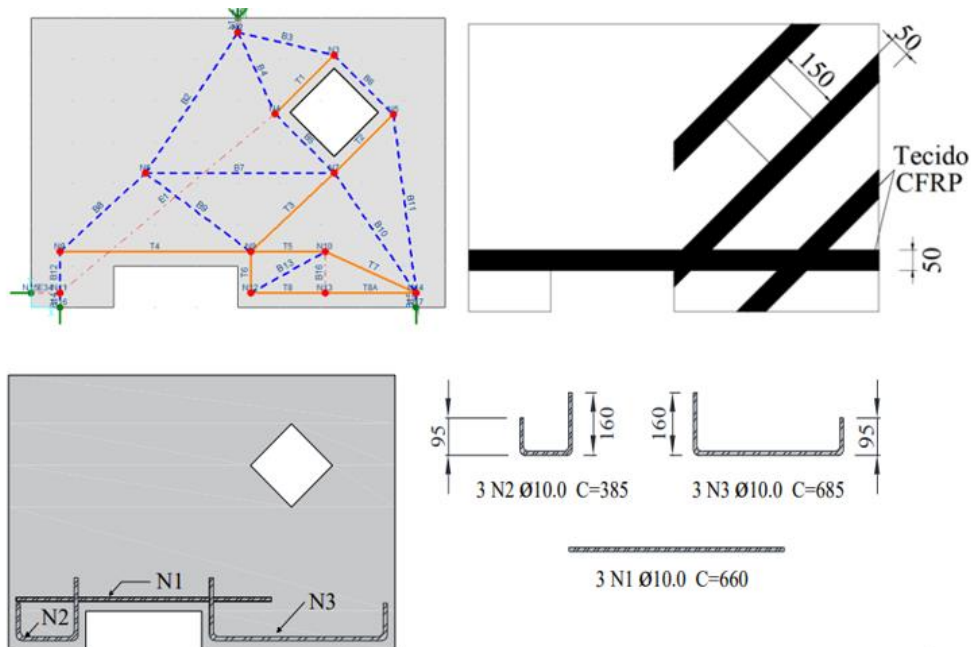


Figura 4. 6 – Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga DB-H1-NR-S. Fonte: autor.

É possível observar, com a inserção do reforço no modelo, que os tirantes T1, T2, e T3 possuem um material mais resistente à tração, ao contrário do concreto que pouco resiste a esse tipo de esforço. Além disso, todos os outros tirantes de flexão, localizados na parte inferior da viga, e que possuem armadura se beneficiarão do acréscimo de resistência à tração trazido pelo reforço. As forças resistidas pelo reforço foram calculadas por meio das equações adaptadas de Dhahir (2018). A Tabela 4.8 apresenta as forças aplicadas em cada membro da treliça para o carregamento máximo que ela suporta e a Tabela 4.9 mostra os fatores de utilização para as interfaces de cada nó:

Tabela 4. 8 –Fatores de utilização das bielas e tirantes da viga DB-H1-NR-S. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{máx,aço}$ (kN)	$V_{máx,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{máx,aço}+V_{máx,FRP}}{Força}$
B1	Prismática	357,48	14,0	1,82	3,28	55,64%	-	-	-
B2	Prismática	258,11	11,7	1,58	3,28	48,09%	-	-	-
B3	Prismática	89,13	3,2	1,97	3,28	60,09%	-	-	-
B4	Prismática	133,11	7,9	1,20	3,28	36,65%	-	-	-
T1	Tirante de FRP Inclinado	46,83	9,9	-	-	-	0,00	189,74	24,68%
B5	Prismática	124,64	9,9	0,90	3,28	27,44%	-	-	-
B6	Prismática	75,91	9,9	0,55	3,28	16,71%	-	-	-

Tabela 4. 8–Fatores de utilização das bielas e tirantes da viga DB-H1-NR-S. Fonte: autor.
(continuação)

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{máx,aço}$ (kN)	$V_{máx,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{máx,aço}+V_{máx,FRP}}{Força}$
B7	Prismática	3,1	14	0,02	3,28	0,48%	-	-	-
B8	Prismática	264,08	9,4	1,99	3,28	60,73%	-	-	-
B9	Prismática	61,73	8,3	0,53	3,28	16,06%	-	-	-
T3	Tirante de FRP Inclinado	84,61	9,5	-	-	-	0	189,74	44,59%
B10	Prismática	126,19	10,3	0,87	3,28	26,58%	-	-	-
B11	Prismática	96,05	13,8	0,49	3,28	15,07%	-	-	-
B12	Prismática	178,74	14	0,91	3,28	27,82%	-	-	-
T4	Tirante de Aço +FRP horizontal	194,35	-	55,23	55,23	-	130,12	155,54	68,03%
T5	Tirante de Aço +FRP horizontal	83,17	-	35,3	55,23	-	130,12	155,54	29,12%
T6	Tirante de Aço +FRP Vertical	20,73	-	8,8	55,23	-	130,12	155,54	7,26%
B13	Prismática	42,78	6,8	0,45	3,28	13,71%	-	-	-
T7	Tirante de Aço +FRP Inclinado	50,17	-	21,29	55,23	38,55%	130,12	189,74	15,68%
T8	Tirante de Aço +FRP horizontal	37,42	-	15,88	1166,26	-	130,12	155,54	13,10%
B14	Prismática	178,74	14	0,91	3,28	27,82%	-	-	-
B15	Prismática	178,74	14	0,91	3,28	27,82%	-	-	-

Tabela 4. 9 -- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H1-NR-S. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	357,48	14,00	1,82	3,28	55,64%
		B2	258,11	11,70	1,58	3,28	48,09%
		B3	89,13	3,23	1,97	3,28	60,09%
		B4	133,11	7,91	1,20	3,28	36,65%
N3	CCT	B3	89,13	3,23	1,97	2,78	70,94%
		T1	46,83	6,00	0,56	2,78	20,08%
		B6	75,91	9,90	0,55	2,78	19,73%
N4	CCT	B4	133,11	7,91	1,20	2,78	43,27%
		T1	46,83	6,00	0,56	2,78	20,08%
		B5	124,64	9,90	0,90	2,78	32,39%
N5	CCT	B6	75,91	9,90	0,55	2,78	19,73%
		T2	58,75	6,00	0,70	2,78	25,19%
		B11	96,05	13,89	0,49	2,78	17,79%
N6	CCC	B2	258,11	11,70	1,58	3,28	48,09%
		B7	3,10	14,00	0,02	3,28	0,48%
		B8	264,08	9,48	1,99	3,28	60,73%
		B9	61,73	8,37	0,53	3,28	16,06%
N7	CCT	B5	124,64	9,90	0,90	2,78	32,39%
		T2	58,75	6,00	0,70	2,78	25,19%
		B7	3,10	14,00	0,02	2,78	0,57%
		T3	84,61	9,56	0,63	2,78	22,78%
		B10	126,19	10,34	0,87	2,78	31,38%
N8	CCT	B8	264,08	9,48	1,99	2,78	71,69%
		T4	194,35	6,00	2,31	2,78	83,33%
		B12	178,74	14,00	0,91	2,78	32,85%
N9	TTT	T4	194,35	6,00	2,31	2,31	100,00%
		B9	61,73	8,37	0,53	2,31	22,75%
		T3	84,61	9,56	0,63	2,31	27,34%
		T5	83,17	6,00	0,99	2,31	42,80%
N10	CCT	T5	83,17	6,00	0,99	2,78	35,66%
		B13	42,78	6,80	0,45	2,78	16,19%
		T7	50,17	6,00	0,60	2,78	21,51%
N12	CTT	T6	20,73	6,00	0,25	2,78	8,89%
		T8	37,42	6,00	0,45	2,78	16,04%
		B13	42,78	6,80	0,45	2,78	16,19%
N14	CTT	T8	37,42	6,00	0,45	2,78	16,04%
		T7	50,17	6,00	0,60	2,78	21,51%
		B10	126,19	10,34	0,87	2,78	31,38%
		B11	96,05	13,89	0,49	2,78	17,79%
		B15	178,74	14,00	0,91	2,78	32,85%

Por meio da análise das Tabelas 4.8 e 4.9 é possível perceber que o reforço faz com que a viga suporte um carregamento superior ao encontrado pela viga sem reforço. A ruptura, de acordo com análise do modelo, não irá ocorrer nos elementos de barra (bielas e tirantes) e sim na região da zona nodal. O nó que tem a sua capacidade máxima atingida é o N9 em sua interface com o tirante de flexão T4. Este nó é do tipo TTT e é o menos resistente entre os tipos de nós. Apesar de o tirante T4 utilizar apenas o percentual de 68% na sua capacidade resistente (com o aço e reforço de CFRP), a zona nodal N9 à qual ele está inserido não suporta mais do que os 194 kN advindos desse tirante. Espera-se, portanto, para a viga-parede reforçada a ser ensaiada pela Neta (2019) que haja uma ruptura de frágil na região da zona nodal N9 próximo ao canto superior direito da reentrância por conta do esgotamento da resistência máxima desse nó na interface com o tirante. Para que isto ocorra, é necessário que todas as armaduras estejam perfeitamente ancoradas. A Tabela 4.10 a seguir mostra o ganho de resistência, demonstrado pelo modelo, que essa viga tem em comparação com a não reforçada.

Tabela 4. 10 - Comparativo entre os modelos das vigas DB-H1-NR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.

$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H1-NR (kN)	$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H1-NR-S (kN)	Aumento de resistência entre modelo reforçado e não reforçado (%)
209,13	357,48	70,94%

Portanto, para esse caso, a inserção do reforço agrega bastante na capacidade portante da viga. Os tirantes T1, T2 e T3, que antes eram resistidos apenas pelo concreto, se beneficiaram da presença do reforço por contarem com um material próprio para resistir aos esforços de tração já que na alma dessa viga não há a presença de armadura.

4.2.3. DB-H1-WR

A viga DB-H1-WR caracteriza-se pela presença de armadura na alma da viga-parede ausente na viga DB-H1-NR. Para esta viga, portanto, espera-se um comportamento mais dúctil e uma resistência maior por conta dessa armadura em comparação com a vista no tópico 4.2.1. A Figura 4.7 exhibe o comparativo entre o modelo gerado e a armação da viga-parede DB-H1-WR:

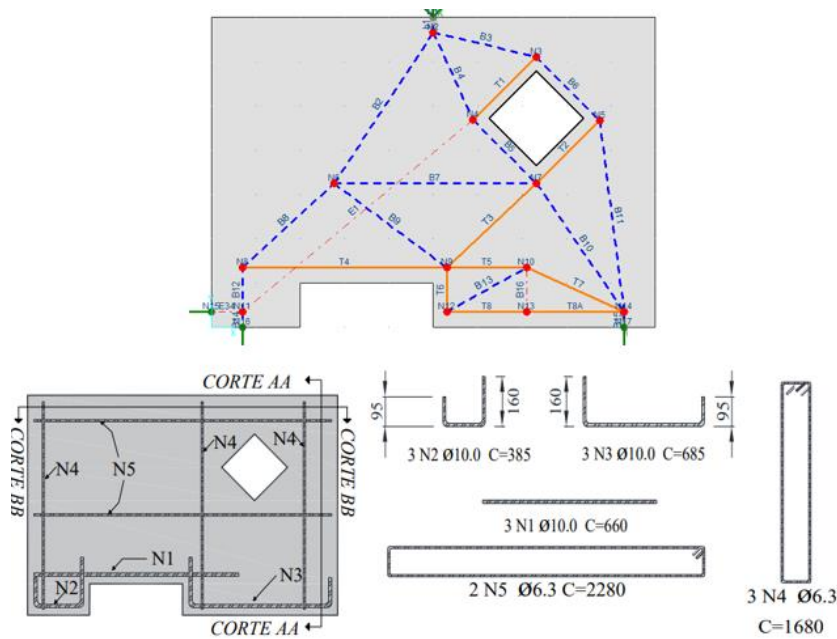


Figura 4. 7 – Comparativo entre o modelo de bielas e tirantes DB-H1 e a armadura da viga DB-H1-WR de Neta (2019).

Nota-se na Figura 4.7 que, os tirantes T1, T2 e T3 não coincidem com as armaduras N4 e N5 que estão posicionadas na alma da viga. Os tirantes encontram-se inclinados e as armaduras estão posicionadas na vertical e horizontal. Contudo, para os cálculos realizados nos tirantes, será considerado que estes elementos possuem a capacidade resistente a tração conferida pelas armaduras mais próximas em sua totalidade. A solicitação que levará o modelo a ruína, de acordo com o modelo de bielas e tirantes gerado, está apresentado na Figura 4.8 a seguir:

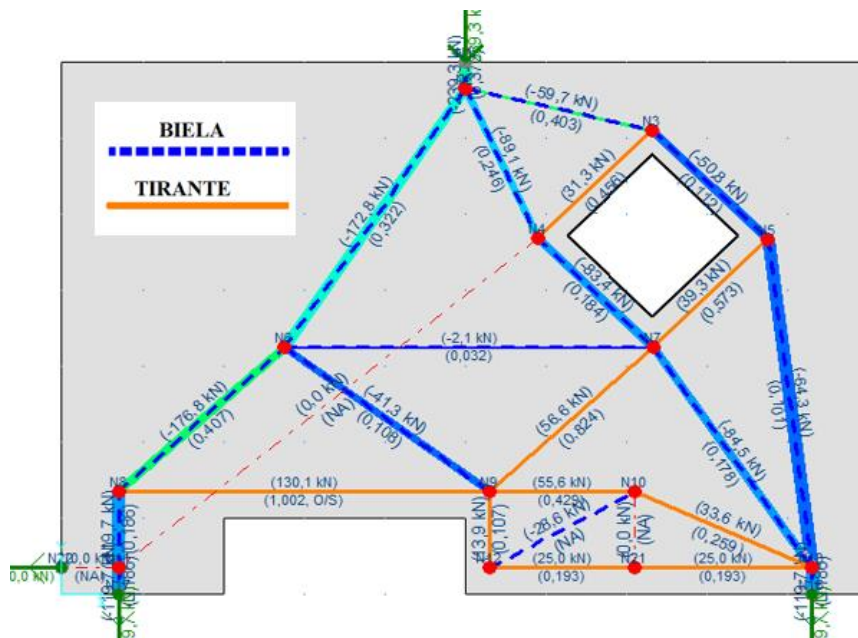


Figura 4. 8 –Forças nas barras da treliça DB-H1-WR. Fonte: autor.

O elemento da treliça que atingiu a sua máxima capacidade resistente foi o tirante T4 a uma carga máxima aplicada de 239,34kN. Os fatores de utilização das bielas e tirantes são apresentadas na Tabela 4.11:

Tabela 4. 11 – Fatores de utilização das barras da treliça. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm²)	f_{res} (kN/cm²)	f_{ef}/f_{res}
B1	Prismática	239,34	14,00	1,22	3,28	37,26%
B2	Prismática	172,81	11,70	1,06	3,28	32,19%
B3	Prismática	59,68	3,23	1,32	3,28	40,23%
B4	Prismática	89,12	7,91	0,80	3,28	24,54%
T1	Tirante de Aço	31,35	-	25,15	55,23	45,53%
B5	Prismática	83,45	9,90	0,60	3,28	18,37%
B6	Prismática	50,82	9,90	0,37	3,28	11,19%
T2	Tirante de Aço	39,33	-	31,55	55,23	57,12%
B7	Prismática	2,07	14,00	0,01	3,28	0,32%
B8	Prismática	176,81	9,48	1,33	3,28	40,66%
B9	Prismática	41,33	8,37	0,35	3,28	10,75%
T3	Tirante de Aço	56,64	-	45,43	55,23	82,26%
B10	Prismática	84,49	10,34	0,58	3,28	17,80%
B11	Prismática	64,30	13,89	0,33	3,28	10,09%
B12	Prismática	119,67	14,00	0,61	3,28	18,63%
T4	Tirante de Aço	130,12	-	55,23	55,23	100,00%
T5	Tirante de Aço	55,69	-	23,64	55,23	42,80%
T6	Tirante de Aço	13,88	-	5,89	55,23	10,67%
B13	Prismática	28,64	6,80	0,30	3,28	9,18%
T7	Tirante de Aço	33,59	-	14,26	55,23	25,81%
T8	Tirante de Aço	25,05	-	10,63	55,23	19,25%
B14	Prismática	119,67	14,00	0,61	3,28	18,63%
B15	Prismática	119,67	14,00	0,61	3,28	18,63%

E, a Tabela 4.12 mostra os fatores de utilização dos nós dessa treliça:

Tabela 4. 12 – Fatores de utilização dos nós da viga DB-H1-WR. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força(kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	239,34	14,00	1,22	3,28	37,26%
		B2	172,81	11,70	1,06	3,28	32,19%
		B3	59,68	3,23	1,32	3,28	40,23%
		B4	89,12	7,91	0,80	3,28	24,54%
N3	CCT	B3	59,68	3,23	1,32	2,78	47,49%
		T1	31,35	6,00	0,37	2,78	13,44%
		B6	50,82	9,90	0,37	2,78	13,21%
N4	CCT	B4	89,12	7,91	0,80	2,78	28,97%
		T1	31,35	6,00	0,37	2,78	13,44%
		B5	83,45	9,90	0,60	2,78	21,69%
N5	CCT	B6	50,82	9,90	0,37	2,78	13,21%
		T2	39,33	6,00	0,47	2,78	16,87%
		B11	64,30	13,89	0,33	2,78	11,91%
N6	CCC	B2	172,81	11,70	1,06	3,28	32,19%
		B7	2,07	14,00	0,01	3,28	0,32%
		B8	176,81	9,48	1,33	3,28	40,66%
		B9	41,33	8,37	0,35	3,28	10,75%
N7	CCT	B5	83,45	9,90	0,60	2,78	21,69%
		T2	39,33	6,00	0,47	2,78	16,87%
		B7	2,07	14,00	0,01	2,78	0,38%
		T3	56,64	6,00	0,67	2,78	24,29%
		B10	84,49	10,34	0,58	2,78	21,01%
N8	CCT	B8	176,81	9,48	1,33	2,78	48,00%
		T4	130,12	6,00	1,55	2,78	55,79%
		B12	119,67	14,00	0,61	2,78	21,99%
N9	TTT	T4	130,12	6,00	1,55	2,31	66,95%
		B9	41,33	8,37	0,35	2,31	15,23%
		T3	56,64	6,00	0,67	2,31	29,15%
		T5	55,69	6,00	0,66	2,31	28,65%
N10	CCT	T5	55,69	6,00	0,66	2,78	23,88%
		B13	28,64	6,80	0,30	2,78	10,84%
		T7	33,59	6,00	0,40	2,78	14,40%
N12	CTT	T6	13,88	6,00	0,17	2,78	5,95%
		T8	25,05	6,00	0,30	2,78	10,74%
		B13	28,64	6,80	0,30	2,78	10,84%
N14	CTT	T8	25,05	6,00	0,30	2,78	10,74%
		T7	33,59	6,00	0,40	2,78	14,40%
		B10	84,49	10,34	0,58	2,78	21,01%
		B11	64,30	13,89	0,33	2,78	11,91%
		B15	119,67	14,00	0,61	2,78	21,99%

Atingiu-se a capacidade máxima de carregamento por conta do tirante de aço T4. O outro elemento de treliça que foi bastante solicitado é a treliça T3. Isso indica que a região acima da reentrância ao longo do comprimento da viga, bem como a região diagonal entre a reentrância e o furo são regiões com elevadas tensões para o modelo gerado. A Figura 4.9 mostra o comportamento das duas vigas ensaiadas por Neta (2019) em seu Estudo Preliminar:

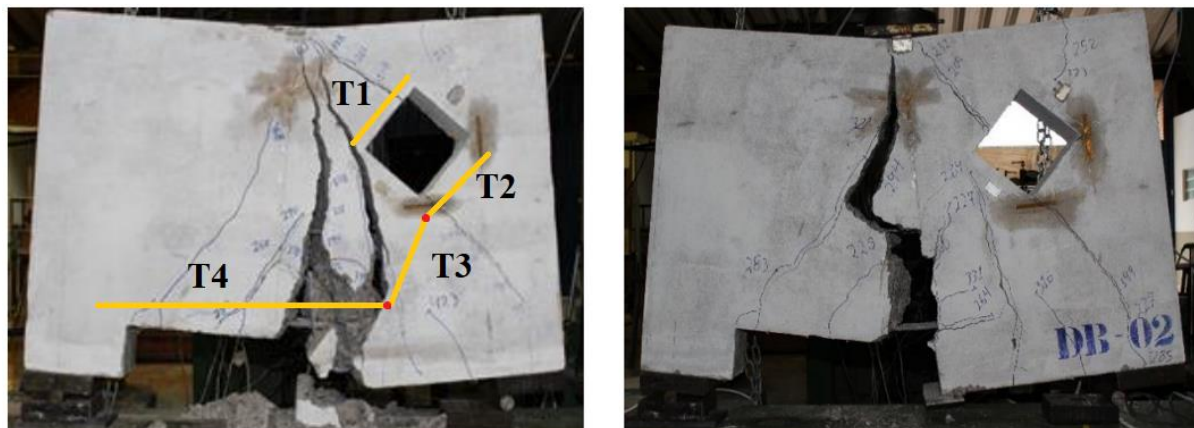


Figura 4. 9 – Modo de ruptura das vigas DB-H1-WR de (Neta 2019).

As vigas DB-H1-WR apresentaram um comportamento mais dúctil do que as vigas sem armadura na alma, como era de se esperar. É interessante notar que as fissuras inclinadas, perpendiculares às faces dos furos e aos tirantes T1 e T2, diminuíram consideravelmente em relação às vigas DB-H1-NR, justamente por conta da armadura presente na alma. É notório que a trinca principal, que apresenta o modo com o qual a viga foi levada à ruína, se iniciou perpendicularmente ao tirante mais solicitado, o T4. Esse tipo de trinca, que se inicia como fissura vertical na região inferior da viga e ascende à medida em que a carga aumenta, é típica de falha por flexão. Em seu texto, Neta(2019) diz que a ruptura dessas vigas ocorreu por um misto de cisalhamento e flexão. É possível afirmar que o modelo, avaliando-se do ponto de vista do comportamento esperado, é satisfatório à medida em que a viga-parede é levada a falha, entre outros motivos, por conta da capacidade máxima do aço flexionado na região do tirante T4. Numericamente, entretanto, o resultado experimental não se aproximou do valor de carga máxima esperada no modelo como pode-se ver na Tabela 4.13:

Tabela 4. 13 - Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H1-WR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.

$P_{u,média}$ (kN)	$P_{u,MBT}$ (kN)	Diferença (%)
407,98	239,34	-41,33

A carga última do modelo de bielas e tirantes proposto - $P_{u,MBT}$ - apresentou um resultado numérico impreciso e com uma carga consideravelmente inferior em relação às vigas ensaiadas por Neta (2019), $P_{u,média}$. Apesar disso, comparando-se o modelo com o modo de ruptura das vigas ensaiadas percebe-se que o comportamento esperado é similar ao que se verificou no experimento do Estudo Preliminar de Neta (2019).

4.2.4. DB-H1-WR-S

A última viga-parede modelada para as vigas com um furo é a viga DB-H1-WR-S. Esta viga possui armadura de flexão na região inferior, armadura cisalhante em sua alma e

conta ainda com tiras de CFRP que combatem o cisalhamento e flexão. A Figura 4.10 mostra o modelo gerado e os detalhes de reforço e armadura para essa viga.

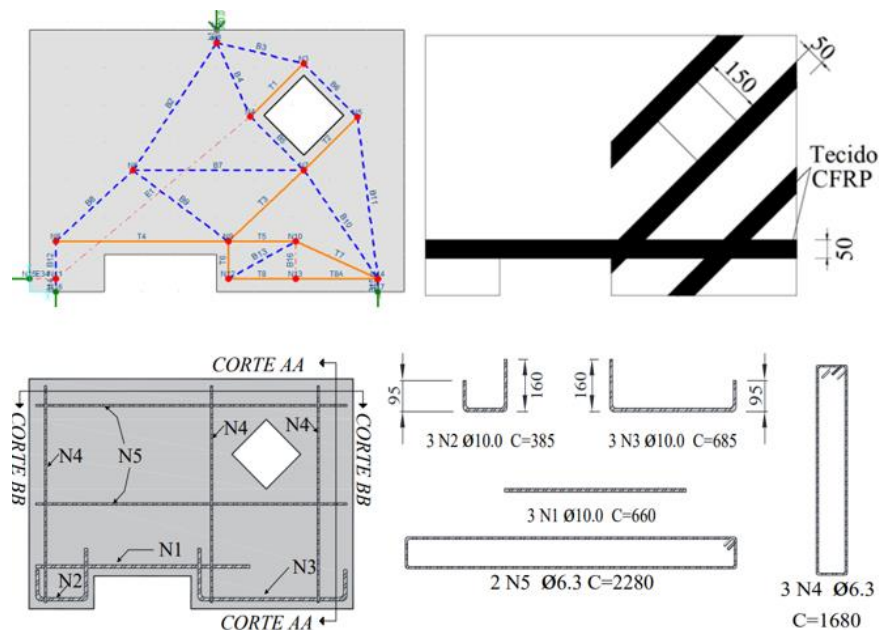


Figura 4. 10 – Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga-parede DB-H1-WR-S. Fonte: autor.

Como mencionado anteriormente, esta viga não foi ensaiada por Neta(2019) antes do término deste trabalho e foi realizada apenas uma estimativa de carga desta viga-parede. Esta é a viga mais reforçada para os modelos DB-H1, que tem apenas um furo, e dela se espera a maior carga resistente. A Tabela 4.14 mostra as forças resultantes em cada membro da treliça para o carregamento máximo suportado e a Tabela 4.15 exhibe os fatores de utilização para as interfaces de cada nó.

Tabela 4. 14 – Fatores de utilização de bielas e tirantes da viga DB-H1-WR-S. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{m\acute{a}x,a\acute{c}o}$ (kN)	$V_{m\acute{a}x,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{m\acute{a}x,a\acute{c}o}+V_{m\acute{a}x,FRP}}{For\c{c}a}$
B1	Prismática	428,98	14,00	2,19	3,28	66,77%	-	-	-
B2	Prismática	309,73	11,70	1,89	3,28	57,70%	-	-	-
B3	Prismática	106,96	3,23	2,36	3,28	72,11%	-	-	-
B4	Prismática	159,73	7,91	1,44	3,28	43,98%	-	-	-
T1	Tirante de Aço +FRP Inclinada	56,20	-	45,07	55,23	-	68,86	189,74	21,73%
B5	Prismática	149,57	9,90	1,08	3,28	32,93%	-	-	-
B6	Prismática	91,09	9,90	0,66	3,28	20,05%	-	-	-
T2	Tirante de Aço +FRP Inclinada	70,50	-	55,23	55,23	-	68,86	189,74	27,26%
B7	Prismática	3,72	14,00	0,02	3,28	0,58%	-	-	-
B8	Prismática	316,89	9,48	2,39	3,28	72,87%	-	-	-
B9	Prismática	74,07	8,37	0,63	3,28	19,27%	-	-	-
T3	Tirante de Aço +FRP Inclinada	101,53	-	55,23	55,23	-	68,86	189,74	39,26%
B10	Prismática	151,43	10,34	1,05	3,28	31,90%	-	-	-
B11	Prismática	115,25	13,89	0,59	3,28	18,09%	-	-	-
B12	Prismática	214,49	14,00	1,09	3,28	33,39%	-	-	-
T4	Tirante de Aço +FRP horizontal	233,22	-	55,23	55,23	-	130,12	155,54	81,64%

Tabela 4.14 – Fatores de utilização de bielas e tirantes da viga DB-H1-WR-S. Fonte:autor.(continuação)

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{máx,aço}$ (kN)	$V_{máx,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{máx,aço}+V_{máx,FRP}}{Força}$
T5	Tirante de Aço +FRP horizontal	99,81	-	42,36	55,23	-	130,12	155,54	34,94%
T6	Tirante de Aço +FRP Vertical	24,88	-	10,56	55,23	-	130,12	155,54	8,71%
B13	Prismática	51,33	6,8	0,54	3,28	16,46%	-	-	-
T7	Tirante de Aço +FRP Inclinado	60,2	-	25,55	55,23	-	130,12	189,74	18,82%
T8	Tirante de Aço +FRP horizontal	44,9	-	19,06	55,23	-	130,12	155,54	15,72%
B14	Prismática	214,49	14	1,09	3,28	33,39%	-	-	-
B15	Prismática	214,49	14	1,09	3,28	33,39%	-	-	-

Tabela 4. 15- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-WR-H1-S. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	428,98	14,00	2,19	3,28	66,77%
		B2	309,73	11,70	1,89	3,28	57,70%
		B3	106,96	3,23	2,36	3,28	72,11%
		B4	159,73	7,91	1,44	3,28	43,98%
N3	CCT	B3	106,96	3,23	2,36	2,78	85,13%
		T1	56,20	6,00	0,67	2,78	24,10%
		B6	91,09	9,90	0,66	2,78	23,67%
N4	CCT	B4	159,73	7,91	1,44	2,78	51,93%
		T1	56,20	6,00	0,67	2,78	24,10%
		B5	149,57	9,90	1,08	2,78	38,87%
N5	CCT	B6	91,09	9,90	0,66	2,78	23,67%
		T2	70,50	6,00	0,84	2,78	30,23%
		B11	115,25	13,89	0,59	2,78	21,35%
N6	CCC	B2	309,73	11,70	1,89	3,28	57,70%
		B7	3,72	14,00	0,02	3,28	0,58%
		B8	316,89	9,48	2,39	3,28	72,87%
		B9	74,07	8,37	0,63	3,28	19,27%
N7	CCT	B5	149,57	9,90	1,08	2,78	38,87%
		T2	70,50	6,00	0,84	2,78	30,23%
		B7	3,72	14,00	0,02	2,78	0,68%
		T3	101,53	6,00	1,21	2,78	43,53%
		B10	151,43	10,34	1,05	2,78	37,66%
N8	CCT	B8	316,89	9,48	2,39	2,78	86,03%
		T4	233,22	6,00	2,78	2,78	100,00%
		B12	214,49	14,00	1,09	2,78	39,41%
N9	CTT	T4	233,22	6,00	2,78	2,78	100,00%
		B9	74,07	8,37	0,63	2,78	22,75%
		T3	101,53	6,00	1,21	2,78	43,53%
		T5	99,81	6,00	1,19	2,78	42,80%
N10	CTT	T5	99,81	6,00	1,19	2,78	42,80%
		B13	51,33	6,80	0,54	2,78	19,43%
		T7	60,20	6,00	0,72	2,78	25,81%
N12	CTT	T6	24,88	6,00	0,30	2,78	10,67%
		T8	44,90	6,00	0,53	2,78	19,25%
		B13	51,33	6,80	0,54	2,78	19,43%
N14	CTT	T8	44,90	6,00	0,53	2,78	19,25%
		T7	60,20	6,00	0,72	2,78	25,81%
		B10	151,43	10,34	1,05	2,78	37,66%
		B11	115,25	13,89	0,59	2,78	21,35%
		B15	214,49	14,00	1,09	2,78	39,41%

Ao se analisar as Tabelas 4.14 e 4.15 percebe-se que, dentre todas as vigas com apenas um furo na alma (DB-H1), esta é a que suporta o maior carregamento, como esperado. Também se verifica que vários elementos, entre bielas, tirantes e nós, possuem um alto fator de utilização quando comparados com as vigas mostradas anteriormente, fato este evidenciado pelo maior número de elementos com colorações quentes (mais próximas do vermelho).

A carga máxima encontrada pelo modelo de bielas e tirantes da viga- DB-H1-WR-S é de 428,98 kN. Espera-se que a ruína da viga ocorra nas regiões dos nós N8 e N9 (CCT e CTT, respectivamente) ocasionados pela interface do tirante de flexão T4. Ou seja, de acordo com o modelo, as regiões dos cantos superiores da reentrância concentrarão tensões no concreto dessas zonas nodais que as levarão a ruptura. Presume-se uma ruptura frágil em razão disto. A Tabela 4.16 apresenta o ganho de resistência, demonstrado pelo modelo, que essa viga tem em comparação com a não reforçada.

Tabela 4. 16 - Comparativo entre os modelos das vigas DB-H1-WR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.

$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H1-WR (kN)	$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H1-WR-S (kN)	Aumento de resistência entre modelo reforçado e não reforçado (%)
239,34	428,98	79,23%

Dessa forma, a presença do reforço nesta viga pode gerar, de acordo com o modelo de bielas e tirantes gerado, um ganho de resistência de 79,23%. É importante ressaltar que a presença do reforço faz com que os tirantes resistam mais à tração, mas não faz com que se aumente a resistência dos nós. Dessa forma, mesmo que se aumentasse a quantidade de reforço ou a quantidade de armadura na região das interfaces dos tirantes das zonas nodais N8 e N9 o resultado de carga máxima resistente encontrado não seria alterado.

4.3. DB –H2

Esta segunda geometria de viga-parede diferencia-se da anterior pela inserção de um furo em losango na região inferior esquerda da viga-parede. Este furo está disposto de forma não alinhada com o furo da direita e dificulta ainda mais o caminho das tensões pela viga. O ForcePAD foi utilizado novamente para se entender comportamento desse elemento para que fosse possível gerar o modelo de bielas e tirantes que mais se aproximasse do comportamento real da estrutura. Na Figura 4.11 é exibido o caminhamento das tensões principais da viga DB-H2:

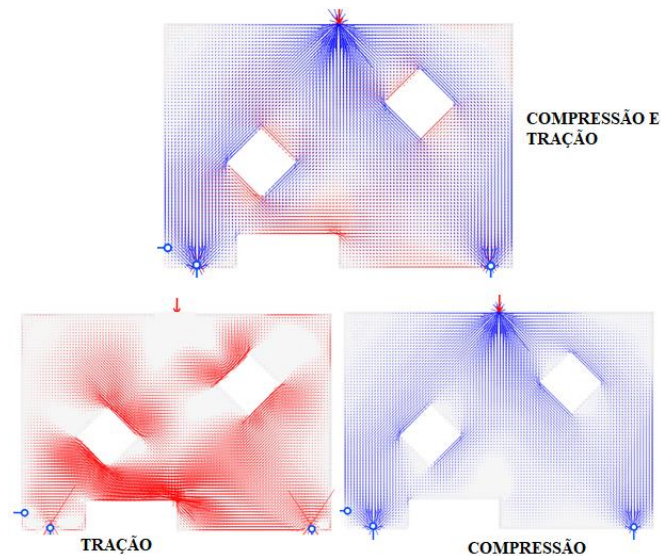


Figura 4. 11 - Tensões principais na viga DB-H2. Fonte: autor.

Pela Figura 4.11 é possível perceber que a coloração azul corresponde às regiões comprimidas e as tracionadas estão na cor avermelhada. De maneira similar ao que ocorreu com a viga DB-H1 as tensões que circundam o novo furo geram, a 45° com a horizontal, nas faces do furo, a formação de tirantes e, nas faces perpendiculares a 135° do furo, a formação de bielas. Também nota-se que é acentuada a tração na região acima da reentrância e próxima ao apoio esquerdo. Espera-se portanto, com a inserção deste furo, que a carga máxima resistente da viga seja menor do que a dos modelos análogos de apenas um furo. Com base nisso, foi gerado o modelo de bielas e tirantes para as vigas DB-H2 que é apresentada na Figura 4.12 e foi gerada pelo CAST:

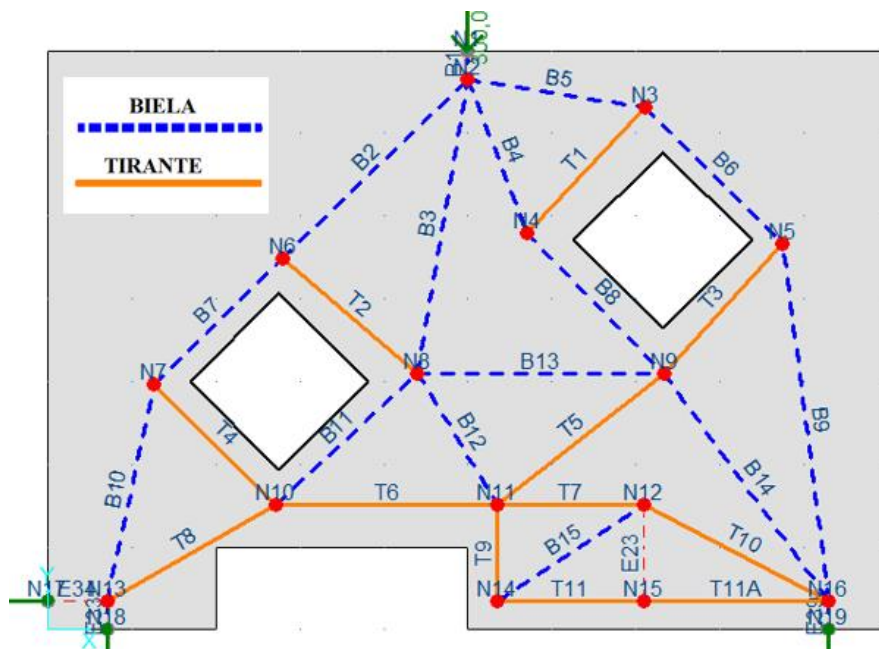


Figura 4. 12 - Modelo de bielas e tirantes da viga-parede DB-H2. Fonte: autor.

Como dito anteriormente, as bielas são representadas pelas linhas azuis tracejadas e os tirantes pelas linhas alaranjadas contínuas. Os pontos vermelhos são os nós e mostram os pontos de união entre as barras da treliça. Buscou-se gerar um modelo que representasse o mais

fielmente possível o caminhamento das tensões na viga-parede e, após várias tentativas, chegou-se no modelo apresentado na Figura 4.12. Nota-se que as zonas de tração e compressão ao redor do furo estão condizentes com o modelo de tensões gerado pelo ForcePAD, bem como a zona tracionada acima e do lado direito da região da reentrância. A Tabela 4.17 mostra o posicionamento dos nós dentro da viga-parede. Como na viga DB-H1, definiu-se que o canto inferior esquerdo seria o (0,0).

Tabela 4. 17 – Propriedades dos nós da viga DB-H2. Fonte: autor.

Identificação do nó	Função	X (mm)	Y(mm)
N1	Ponto de Aplicação da Carga	500	700
N2	Biela e Tirante	500	665
N3	Biela e Tirante	710,7	630,9
N4	Biela e Tirante	570	480
N5	Biela e Tirante	875	466,7
N6	Biela e Tirante	278,6	448,5
N7	Biela e Tirante	126,4	296,4
N8	Biela e Tirante	440	310
N9	Biela e Tirante	732,9	310
N10	Biela e Tirante	271,4	151,4
N11	Biela e Tirante	535	151,4
N12	Biela e Tirante	710	151,4
N13	Biela e Tirante	70	35
N14	Biela e Tirante	535	35
N15	Biela e Tirante	710	35
N16	Biela e Tirante	930	35
N17	Apoio	0	35
N18	Apoio	70	0
N19	Apoio	930	0

Em seguida, a Tabela 4.18 expõe os dados sobre a geometria das barras da treliça:

Tabela 4. 18 - Propriedades geométricas das barras da treliça da viga DB-H2. Fonte:autor.

Identificação da barra	Função	Comprimento (mm)	Direção (°)
B1	Biela	35	270
B2	Biela	309,66	44,36
B3	Biela	360,03	80,41
B4	Biela	197,8	290,73
B5	Biela	213,44	350,81
B6	Biela	232,28	315,02
B7	Biela	215,17	44,98
B8	Biela	235,45	313,78
B9	Biela	435,19	97,26
B10	Biela	267,42	77,82
B11	Biela	231,47	43,25
B12	Biela	184,88	300,92
B13	Biela	292,9	0
B14	Biela	338,34	305,63
B15	Biela	210,18	33,63
E1	Estabilizador	70	180
T1	Tirante	206,32	47
T2	Tirante	212,68	139,37
T3	Tirante	211,54	47,8
T4	Tirante	205,06	135
T5	Tirante	253,61	38,71
T6	Tirante	263,6	0
T7	Tirante	175	0
T8	Tirante	232,62	30,03
T9	Tirante	116,4	270
T10	Tirante	248,9	332,12
T11	Tirante	175	0
T11A	Tirante	220	0

4.3.1. DB-H2-NR

A série de modelos gerados para as vigas-parede de dois furos é análoga aos dos modelos de um furo. As propriedades dos tirantes serão definidos com base na presença de armadura ou reforço na região ao se avaliar o detalhamento das vigas-parede. Este modelo em questão não possui armadura em sua alma e o comparativo entre a sua armação e o modelo de bielas e tirantes para as vigas DB-H2 é mostrado a seguir:

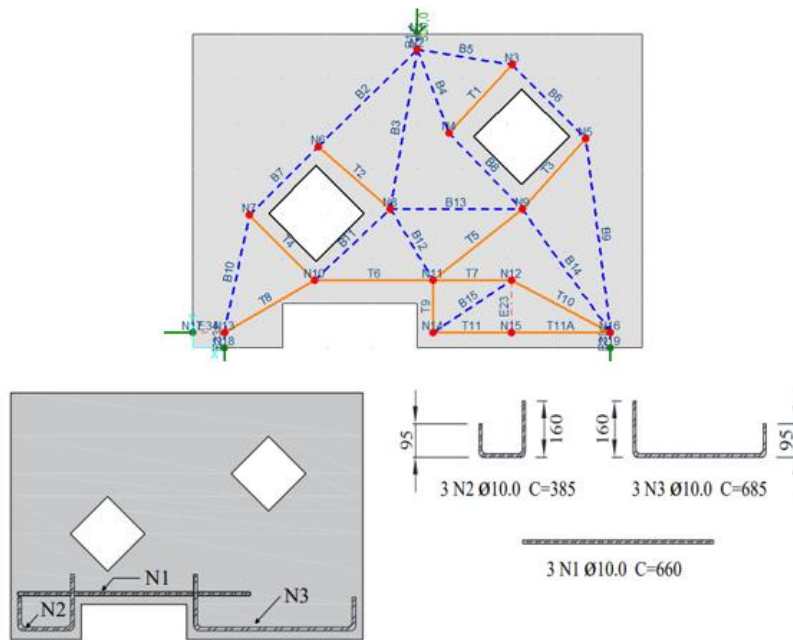


Figura 4. 13 – Comparativo entre o modelo DB-H2 e o detalhamento de armação da viga DB-H2-NR de Neta (2019).

Com base na análise da figura anterior é possível reparar que os tirantes T1, T2, T3, T4 e T5 resistirão aos esforços de tração por meio do concreto. Já os outros tirantes foram modelados com armaduras de aço resistindo a esses esforços de tração. Conferiu-se, em seguida, qual seria o carregamento máximo que esta viga comportaria e qual seria o elemento mais solicitado no carregamento limite. A Figura 4.14 mostra os esforços de tração e compressão em cada um dos elementos de barra da treliça, bem como a sua razão de sollicitação por resistência:

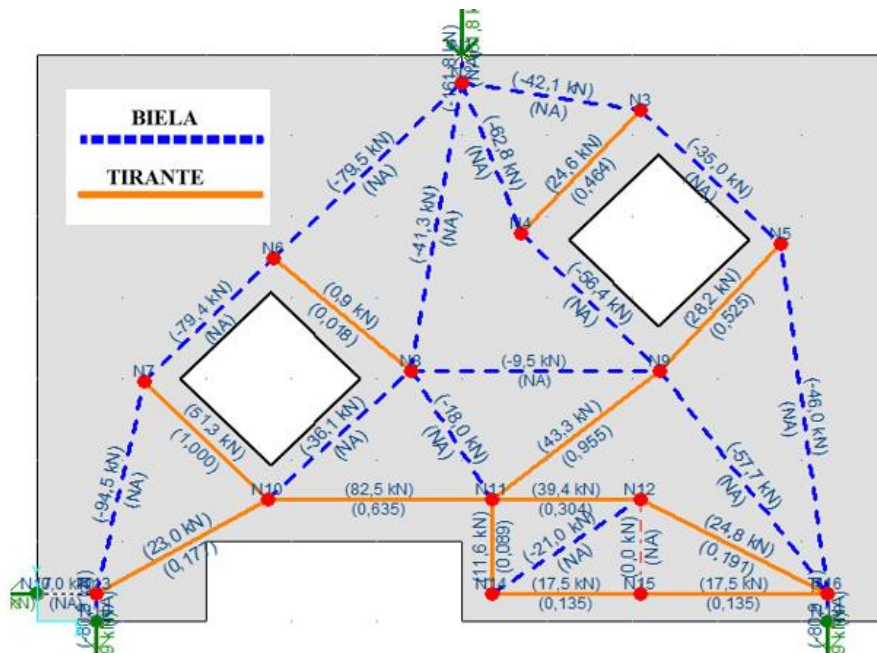


Figura 4. 14 - Força máxima nas barras da treliça DB-H2-NR. Fonte: autor.

Assim como ocorreu com a viga de um furo análoga à DB-H2-NR os tirantes de concreto (por conta da ausência de armadura na alma) são uns dos elementos mais solicitados. Por conta disso, a ruptura ocorreu em um desses tirantes de concreto, o T4. A carga máxima aplicada na viga foi de 161,76 kN. Nota-se que este valor é inferior ao valor encontrado à viga similar com apenas um furo (209,13kN). Isto já era esperado por conta da adição do novo furo que acaba por dificultar o trajeto das tensões e consequentemente a sua capacidade portante. A Tabela 4.19 exibe os fatores de utilização das bielas e dos tirantes:

Tabela 4. 19- Fatores de utilização das barras da treliça da viga DB-H2-NR. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm²)	f_{res} (kN/cm²)	f_{ef}/f_{res}
B1	Prismática	161,76	14,00	0,83	3,28	25,18%
B2	Prismática	79,53	9,79	0,58	3,28	17,71%
B3	Prismática	41,34	13,80	0,21	3,28	6,53%
B4	Prismática	62,77	13,09	0,34	3,28	10,45%
B5	Prismática	42,06	2,24	1,34	3,28	40,99%
T1	Tirante de Concreto	24,59	10,24	0,17	0,37	46,36%
B6	Prismática	35,00	9,90	0,25	3,28	7,70%
B7	Prismática	79,43	9,90	0,57	3,28	17,49%
T2	Tirante de Concreto	0,86	9,12	0,01	0,37	1,83%
B8	Prismática	56,32	10,11	0,40	3,28	12,14%
T3	Tirante de Concreto	28,20	10,37	0,19	0,37	52,49%
B9	Prismática	45,94	13,89	0,24	3,28	7,21%
B10	Prismática	94,53	13,68	0,49	3,28	15,05%
T4	Tirante de Concreto	51,28	9,90	0,37	0,37	100,00%
B11	Prismática	36,07	9,59	0,27	3,28	8,20%
B12	Prismática	33,40	12,01	0,20	3,28	6,06%
B13	Prismática	9,49	14,00	0,05	3,28	1,48%
T5	Tirante de Concreto	43,30	8,76	0,35	0,37	95,47%
B14	Prismática	57,70	11,38	0,36	3,28	11,05%
T6	Tirante de Aço	82,50	-	35,02	55,23	63,40%
T7	Tirante de Aço	39,42	-	16,73	55,23	30,29%
T8	Tirante de Aço	23,02	-	9,77	55,23	17,69%
T9	Tirante de Aço	11,59	-	4,92	55,23	8,91%
B15	Prismática	20,98	7,75	0,19	3,28	5,90%
T10	Tirante de Aço	24,86	-	10,55	55,23	19,10%
T11	Tirante de Aço	17,47	-	7,42	55,23	13,43%

E, a Tabela 4.20 apresenta os fatores de utilização dos nós dessa treliça:

Tabela 4. 20 - Fatores de utilização dos nós do modelo da viga DB-H2-NR. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	161,76	14,00	0,83	3,28	25,18%
		B2	79,53	9,79	0,58	3,28	17,71%
		B3	41,34	13,80	0,21	3,28	6,53%
		B4	62,77	13,09	0,34	3,28	10,45%
		B5	42,06	2,24	1,34	3,28	40,99%
		P	161,76	14,00	0,83	3,28	25,18%
N3	CCT	B5	42,06	2,24	1,34	2,78	48,39%
		T1	24,59	10,24	0,17	2,78	6,18%
		B6	35,00	9,90	0,25	2,78	9,09%
N4	CCT	B4	62,77	13,09	0,34	2,78	12,33%
		T1	24,59	10,24	0,17	2,78	6,18%
		B8	56,32	10,11	0,40	2,78	14,33%
N5	CCT	B6	35,00	9,90	0,25	2,78	9,09%
		T3	28,20	10,37	0,19	2,78	7,00%
		B9	45,94	13,89	0,24	2,78	8,51%
N6	CCT	B2	79,53	9,79	0,58	2,78	20,90%
		T2	0,86	9,12	0,01	2,78	0,24%
		B7	79,43	9,90	0,57	2,78	20,65%
N7	CCT	B7	79,43	9,90	0,57	2,78	20,65%
		T4	51,28	9,90	0,37	2,78	13,33%
		B10	94,53	13,68	0,49	2,78	17,77%
N8	CCT	T2	0,86	9,12	0,01	2,78	0,24%
		B3	41,34	13,80	0,21	2,78	7,70%
		B11	36,07	9,59	0,27	2,78	9,67%
		B12	33,40	12,01	0,20	2,78	7,15%
		B13	9,49	14,00	0,05	2,78	1,74%
N9	CTT	T3	28,20	10,37	0,19	2,78	7,00%
		B8	56,32	10,11	0,40	2,78	14,33%
		B13	9,49	14,00	0,05	2,78	1,74%
		T5	43,30	8,76	0,35	2,78	12,72%
		B14	57,70	11,38	0,36	2,78	13,04%
N10	CTT	T4	51,28	9,90	0,37	2,78	13,33%
		B11	36,07	9,59	0,27	2,78	9,67%
		T6	82,50	6,00	0,98	2,78	35,37%
		T8	23,02	6,00	0,27	2,78	9,87%

Tabela 4. 20- Fatores de utilização dos nós do modelo da viga DB-H2-NR. Fonte: autor. (continuação)

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N11	TTT	B12	33,4	12,01	0,2	2,31	8,59%
		T5	43,3	6	0,52	2,31	22,28%
		T7	39,42	6	0,47	2,31	20,28%
		T9	11,59	6	0,14	2,31	5,97%
		T6	82,5	6	0,98	2,31	42,45%
N12	CTT	T7	39,42	6	0,47	2,78	16,90%
		T10	24,86	6	0,3	2,78	10,66%
		B15	20,98	7,75	0,19	2,78	6,96%
N13	CCT	B10	94,53	13,68	0,49	2,78	17,77%
		T8	23,02	6	0,27	2,78	9,87%
		REAÇÃO 1	80,88	14	0,41	2,78	14,86%
N14	CTT	T9	11,59	6	0,14	2,78	4,97%
		B15	20,98	7,75	0,19	2,78	6,96%
		T11	17,47	6	0,21	2,78	7,49%
N16	CTT	T11	17,47	6	0,21	2,78	7,49%
		T10	24,86	6	0,3	2,78	10,66%
		B14	57,7	11,38	0,36	2,78	13,04%
		B9	45,94	13,89	0,24	2,78	8,51%
		REAÇÃO 2	80,88	14	0,41	2,78	14,86%

A capacidade máxima de carregamento da viga foi atingida por conta da resistência máxima a tração do tirante de concreto T4. A ausência de armadura ao redor das aberturas faz com que a viga tenda a sofrer com tensões cisalhantes nessa região que fazem com que os tirantes de concreto sejam bastante solicitados como visto nas tabelas anteriores. Por conta disso é previsto uma ruptura do tipo frágil. No Estudo Preliminar realizado por Neta(2019) as duas vigas DB-H2-NR apresentaram o seguinte comportamento, na ruína, exibido na Figura 4.15:

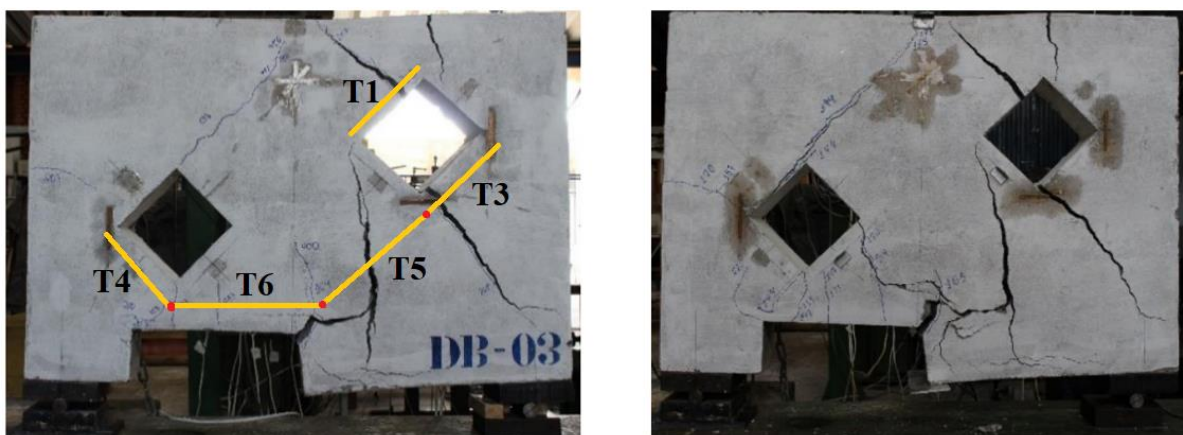


Figura 4. 15 – Modo de ruptura das duas vigas DB-H2-NR de Neta (2019).

As vigas de Neta (2019) apresentaram um padrão de fissuração semelhantes entre si, como se nota na Figura 4.15. Comparando as vigas ensaiadas com o modelo de bielas e tirantes proposto é possível averiguar que nas regiões dos tirantes de concreto T1, T3 e T5 que estão localizadas as maiores trincas. Para o modelo proposto o tirante de concreto T4 que leva a viga-parede a ruptura, algo que não é observado nas vigas ensaiadas. Na região do tirante T4 não se verifica a formação de fissuras. Isso pode ter ocorrido por alguns motivos: as barras longitudinais de flexão auxiliaram na absorção de esforços de tração nessa região, falta de simetria na aplicação do carregamento, concepção equivocada do modelo de bielas e tirantes, entre outros. Contudo, não se pode descartar a utilidade do modelo pois os elementos da treliça mais carregados são justamente os tirantes que se encontram nas regiões mais solicitadas da viga. A Tabela 4.21 mostra o comparativo numérico de carga média máxima ensaiada ($P_{u,média}$) e carga máxima encontrada no modelo ($P_{u,MBT}$):

Tabela 4. 21.- Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H2-NR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.

$P_{u,média}$ (kN)	$P_{u,MBT}$ (kN)	Diferença (%)
233,74	161,76	-30,79%

A carga última do modelo de bielas e tirantes proposto - $P_{u,MBT}$ - apresentou um resultado numérico distante das vigas ensaiadas por Neta (2019), $P_{u,média}$. Isso mostra o modelo para essa viga poderia ser adaptado de forma a conseguir representar, de maneira mais satisfatória, o resultado experimental numérico bem como o comportamento esperado da viga na ruína.

4.3.2. DB-H2-NR-S

A viga-parede DB-H2-NR-S, ao contrário da viga antecessora, é reforçada com tiras de CFRP que combatem o cisalhamento e flexão. Na Figura 4.16 é mostrado a proposta de reforço da viga, sua armadura e o modelo de bielas e tirantes proposto:

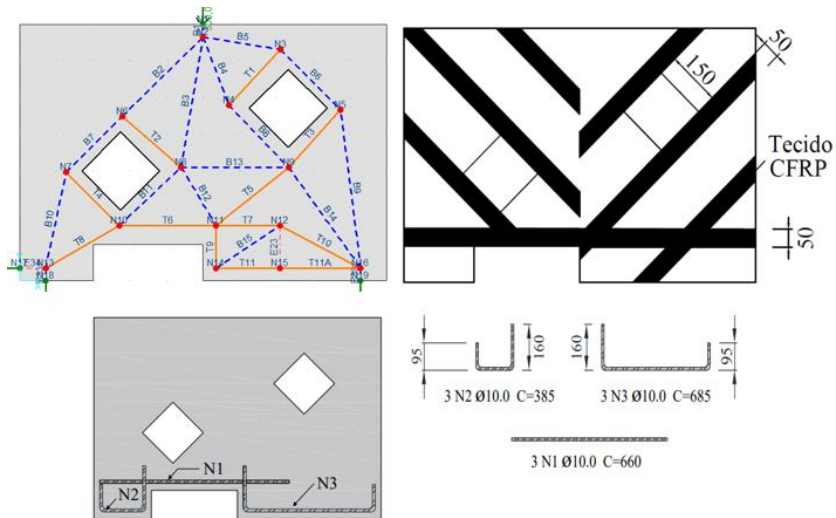


Figura 4. 16 - Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga DB-H2-NR-S. Fonte: autor.

Percebe-se que os tirantes de concreto agora contam com o auxílio das tiras de CFRP na tração. Os tirantes de aço, presentes na parte inferior da viga, também ganham um acréscimo de resistência à tração pelo mesmo motivo. Dessa forma, é possível nota que praticamente todos os tirantes coincidem com a direção das tiras de CFRP o que indica que o posicionamento delas para resistir a esses esforços foi correta. Assim, Tabela 4.22 e 4.23 mostram os fatores de utilização dos elementos de barras e dos elementos de nós na treliça para a carga máxima encontrada no modelo, respectivamente:

Tabela 4. 22 - Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-NR-S. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{m\acute{a}x,a\grave{c}o}$ (kN)	$V_{m\acute{a}x,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{m\acute{a}x,a\grave{c}o}+V_{m\acute{a}x,FRP}}{For\grave{c}a}$
B1	Prismática	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%	-	-	-
B2	Prismática	164,35	9,79	1,20	3,28	36,59%	-	-	-
B3	Prismática	85,43	13,80	0,44	3,28	13,49%	-	-	-
B4	Prismática	129,70	13,09	0,71	3,28	21,59%	-	-	-
B5	Prismática	86,91	2,24	2,78	3,28	84,71%	-	-	-
T1	Tirante de FRP Inclinado	50,81	10,24	-	-	-	0	362,80	14,00%
B6	Prismática	72,31	9,90	0,52	3,28	15,92%	-	-	-
B7	Prismática	164,13	9,90	1,18	3,28	36,14%	-	-	-
T2	Tirante de FRP Inclinado	1,78	9,12	-	-	-	0	362,80	0,49%
B8	Prismática	116,38	10,11	0,82	3,28	25,09%	-	-	-
T3	Tirante de FRP Inclinado	58,27	10,37	-	-	-	0	362,80	16,06%
B9	Prismática	94,93	13,89	0,49	3,28	14,90%	-	-	-
B10	Prismática	195,33	13,68	1,02	3,28	31,10%	-	-	-
T4	Tirante de FRP Inclinado	105,96	9,90	-	-	-	0	362,80	29,21%
B11	Prismática	74,54	9,59	0,56	3,28	16,93%	-	-	-
B12	Prismática	33,40	12,01	0,20	3,28	6,06%	-	-	-
B13	Prismática	19,61	14,00	0,10	3,28	3,05%	-	-	-
T5	Tirante de FRP Inclinado	89,47	8,76	-	-	-	0	362,80	24,66%
B14	Prismática	119,22	11,38	0,75	3,28	22,83%	-	-	-
T6	Tirante de Aço + FRP Horizontal	170,48	-	55,10	55,10	-	129,81	288,84	40,72%
T7	Tirante de Aço + FRP Horizontal	81,45	-	34,57	55,10	-	129,81	288,84	19,46%

Tabela 4. 22 - Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-NR-S. Fonte: autor. (continuação)

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{m\acute{a}x,a\acute{c}o}$ (kN)	$V_{m\acute{a}x,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{m\acute{a}x,a\acute{c}o}+V_{m\acute{a}x,FRP}}{For\acute{c}a}$
T8	Tirante de Aço + FRP Inclinado	47,57	-	20,19	55,1	-	129,81	362,8	9,66%
T9	Tirante de Aço + FRP Vertical	23,95	-	10,16	55,1	-	129,81	288,84	5,72%
B15	Prismática	43,34	7,75	0,39	3,27	12,18%	-	-	-
T10	Tirante de Aço + FRP Inclinado	51,36	-	21,8	55,1	-	129,81	362,8	10,43%
T11	Tirante de Aço + FRP Horizontal	36,1	-	15,32	55,1	-	129,81	288,84	8,62%

Tabela 4. 23- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-NR-S. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força(kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%
		B2	164,35	9,79	1,20	3,28	36,59%
		B3	85,43	13,80	0,44	3,28	13,49%
		B4	129,70	13,09	0,71	3,28	21,59%
		B5	86,91	2,24	2,78	3,28	84,71%
		P	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%
N3	CCT	B5	86,91	2,24	2,78	2,78	100,00%
		T1	50,81	6,00	0,60	2,78	21,79%
		B6	72,31	9,90	0,52	2,78	18,79%
N4	CCT	B4	129,70	13,09	0,71	2,78	25,48%
		T1	50,81	6,00	0,60	2,78	21,79%
		B8	116,38	10,11	0,82	2,78	29,62%
N5	CCT	B6	72,31	9,90	0,52	2,78	18,79%
		T3	58,27	6,00	0,69	2,78	24,99%
		B9	94,93	13,89	0,49	2,78	17,59%
N6	CCT	B2	164,35	9,79	1,20	2,78	43,20%
		T2	1,78	6,00	0,02	2,78	0,76%
		B7	164,13	9,90	1,18	2,78	42,67%
N7	CCT	B7	164,13	9,90	1,18	2,78	42,67%
		T4	105,96	6,00	1,26	2,78	45,43%
		B10	195,33	13,68	1,02	2,78	36,72%
N8	CCT	T2	1,78	6,00	0,02	2,78	0,76%
		B3	85,43	13,80	0,44	2,78	15,92%
		B11	74,54	9,59	0,56	2,78	19,99%
		B12	33,40	12,01	0,20	2,78	7,15%
		B13	19,61	14,00	0,10	2,78	3,60%
N9	CTT	T3	58,27	6,00	0,69	2,78	24,99%
		B8	116,38	10,11	0,82	2,78	29,62%
		B13	19,61	14,00	0,10	2,78	3,60%
		T5	89,47	6,00	1,07	2,78	38,36%
		B14	119,22	11,38	0,75	2,78	26,95%
N10	CTT	T4	105,96	6,00	1,26	2,78	45,43%
		B11	74,54	9,59	0,56	2,78	19,99%
		T6	170,48	6,00	2,03	2,78	73,10%
		T8	47,58	6,00	0,57	2,78	20,40%

Tabela 4. 23- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-NR-S. Fonte: autor. (continuação)

Nó	Tipo	Interface	Força(kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N11	TTT	B12	33,4	12,01	0,2	2,31	8,59%
		T5	89,47	6	1,07	2,31	46,04%
		T7	81,45	6	0,97	2,31	41,91%
		T9	23,96	6	0,29	2,31	12,33%
		T6	170,48	6	2,03	2,31	87,72%
N12	CTT	T7	81,45	6	0,97	2,78	34,92%
		T10	51,37	6	0,61	2,78	22,02%
		B15	43,34	7,75	0,4	2,78	14,38%
N13	CCT	B10	195,33	13,68	1,02	2,78	36,72%
		T8	47,58	6	0,57	2,78	20,40%
		REAÇÃO 1	167,13	14	0,85	2,78	30,71%
N14	CTT	T9	23,96	6	0,29	2,78	10,27%
		B15	43,34	7,75	0,4	2,78	14,38%
		T11	36,1	6	0,43	2,78	15,48%
N16	CTT	T11	36,1	6	0,43	2,78	15,48%
		T10	51,37	6	0,61	2,78	22,02%
		B14	119,22	11,38	0,75	2,78	26,95%
		B9	94,93	13,89	0,49	2,78	17,59%
		REAÇÃO2	167,13	14	0,85	2,78	30,71%

As tabelas mostradas anteriormente expõem que o elemento de treliça que faz com que a viga-parede DB-H2-NR-S atinja sua máxima capacidade portante é o nó N3 por meio da sua interface com a biela B5. As vigas ensaiadas (não reforçadas com CFRP) mostradas na Figura 4.15 que a região do nó N3 é passível de criação de trincas. Assim, espera-se que o reforço dê mais capacidade de suporte à viga que e a sua ruptura ocorra em uma região de zona nodal próxima à parte superior do furo direito. Outros elementos de nó encontram-se bastante carregados em relação à sua capacidade o que mostra que a viga-parede pode sofrer com vários pontos de fissuração antes de atingir a sua carga máxima gerada pelo modelo. A Tabela 4.24 mostra o comparativo entre modelos, por meio do ganho de capacidade máxima portante, que essa viga-parede tem em relação à não reforçada:

Tabela 4. 24- Comparativo entre os modelos das vigas DB-H2-NR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.

$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H2-NR (kN)	$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-NR-H2-S (kN)	Aumento de resistência entre modelo reforçado e não reforçado (%)
161,76	334,27	106,65%

4.3.3. DB-H2-WR

A viga-parede DB-H2-WR possui armadura na alma ao contrário das vigas anteriores. Desse modo, é esperado que ela tenha um comportamento mais dúctil, bem como uma carga portante máxima maior do que a viga sem armadura na alma e sem reforço (DB-H2-NR). A Figura 4.17 apresenta o comparativo entre o modelo gerado e a armação desta viga:

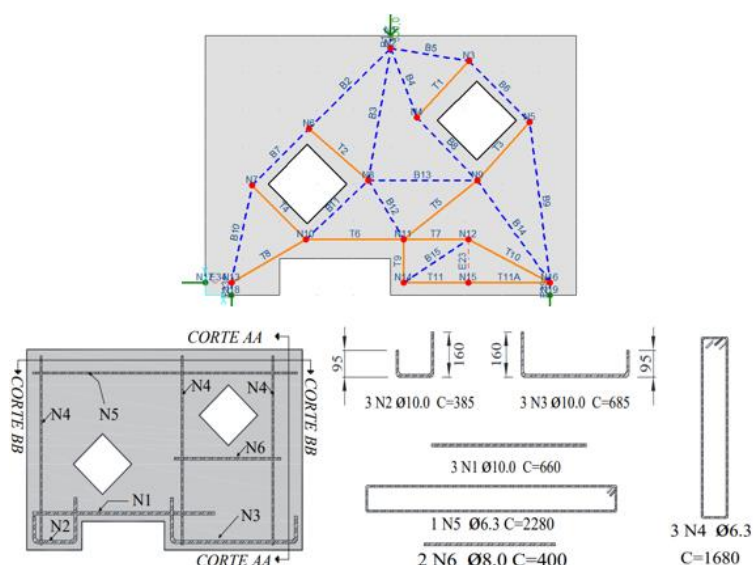


Figura 4. 17- – Comparativo entre o modelo de bielas e tirantes DB-H2 e a armação da viga DB-H2-WR de Neta (2019).

Ao se observar a Figura 4.17 é possível perceber que os tirantes T1, T3, T4, e T5 não coincidem exatamente com os centroides das armaduras presentes na alma da viga mas, para o modelo, serão considerados como tirantes de aço. Já o tirante T2 será considerado como um tirante de concreto. Assim, após caracterização dos elementos de barra e das zonais nodais, foi descoberta a solicitação que, de acordo com o modelo de bielas e tirantes, levará o modelo a ruptura. As forças no membros da treliça, para a carga de ruína, são apresentadas na Figura 4.18:

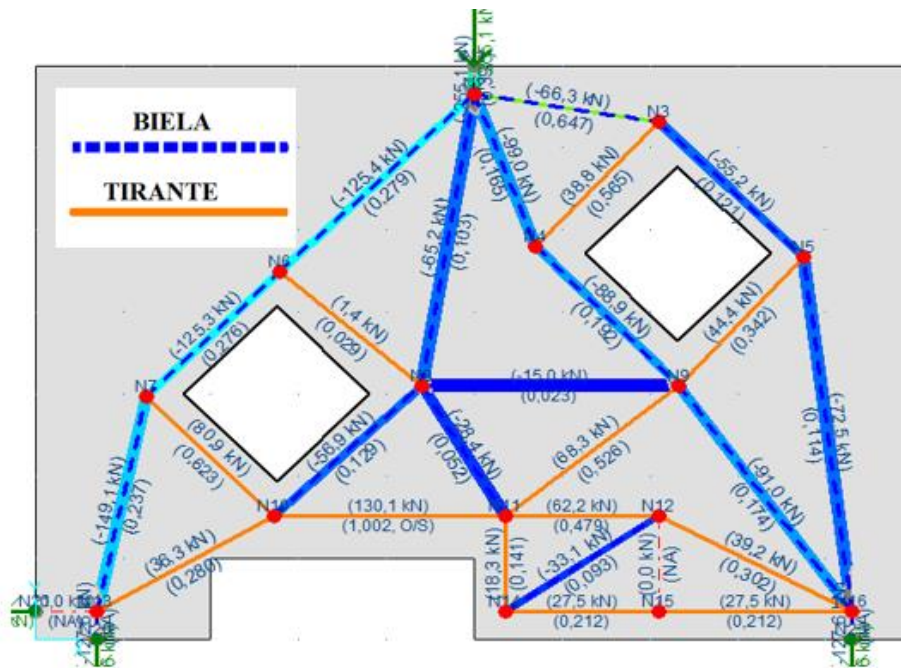


Figura 4. 18 - Forças nas barras da treliça DB-H2-WR. Fonte: autor.

O tirante T6 foi o elemento da treliça que atingiu sua máxima capacidade resistente para a carga máxima aplicada na viga-parede de 255,14 kN. Os fatores de utilização das bielas e tirantes são apresentadas na Tabela 4.25:

Tabela 4. 25 – Fatores de utilização das barras da treliça da viga-parede DB-H2-WR. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm²)	f_{res} (kN/cm²)	f_{ef}/f_{res}
B1	Prismática	255,14	14,00	1,30	3,28	39,71%
B2	Prismática	125,44	9,79	0,92	3,28	27,93%
B3	Prismática	65,21	13,80	0,34	3,28	10,29%
B4	Prismática	99,00	13,09	0,54	3,28	16,48%
B5	Prismática	66,34	2,24	2,12	3,28	64,65%
T1	Tirante de Aço	38,78	-	31,10	55,23	56,32%
B6	Prismática	55,20	9,90	0,40	3,28	12,15%
B7	Prismática	125,28	9,90	0,90	3,28	27,59%
T2	Tirante de Concreto	1,36	9,12	0,01	0,37	2,88%
B8	Prismática	88,83	10,11	0,63	3,28	19,15%
T3	Tirante de Aço	44,48	10,37	27,29	55,23	49,41%
B9	Prismática	72,46	13,89	0,37	3,28	11,37%
B10	Prismática	149,09	13,68	0,78	3,28	23,74%
T4	Tirante de Aço	80,88	-	34,27	55,23	62,05%
B11	Prismática	56,90	9,59	0,42	3,28	12,93%
B12	Prismática	33,40	12,01	0,20	3,28	6,06%
B13	Prismática	14,97	14,00	0,08	3,28	2,33%
T5	Tirante de Aço	68,29	-	41,90	55,23	75,86%
B14	Prismática	91,00	11,38	0,57	3,28	17,43%
T6	Tirante de Aço	130,12	-	55,23	55,23	100,00%
T7	Tirante de Aço	62,17	-	26,39	55,23	47,78%
T8	Tirante de Aço	36,32	-	15,41	55,23	27,91%
T9	Tirante de Aço	18,29	-	7,76	55,23	14,05%
B15	Prismática	33,08	7,75	0,30	3,28	9,30%
T10	Tirante de Aço	39,21	-	16,64	55,23	30,13%
T11	Tirante de Aço	27,56	-	11,70	55,23	21,18%

E, a Tabela 4.26 mostra os fatores de utilização dos nós dessa treliça:

Tabela 4. 26 - Fatores de utilização dos nós da viga DB-H2-WR. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	255,14	14,00	1,30	3,28	39,71%
		B2	125,44	9,79	0,92	3,28	27,93%
		B3	65,21	13,80	0,34	3,28	10,29%
		B4	99,00	13,09	0,54	3,28	16,48%
		B5	66,34	2,24	2,12	3,28	64,65%
		P	255,14	14,00	1,30	3,28	39,71%
N3	CCT	B5	66,34	2,24	2,12	2,78	76,33%
		T1	38,78	6,00	0,46	2,78	16,63%
		B6	55,20	9,90	0,40	2,78	14,34%
N4	CCT	B4	99,00	13,09	0,54	2,78	19,45%
		T1	38,78	6,00	0,46	2,78	16,63%
		B8	88,83	10,11	0,63	2,78	22,61%
N5	CCT	B6	55,20	9,90	0,40	2,78	14,34%
		T3	44,48	10,37	0,31	2,78	11,03%
		B9	72,46	13,89	0,37	2,78	13,42%
N6	CCT	B2	125,44	9,79	0,92	2,78	32,97%
		T2	1,36	9,12	0,01	2,78	0,38%
		B7	125,28	9,90	0,90	2,78	32,57%
N7	CCT	B7	125,28	9,90	0,90	2,78	32,57%
		T4	80,88	6,00	0,96	2,78	34,68%
		B10	149,09	13,68	0,78	2,78	28,03%
N8	CCT	T2	1,36	9,12	0,01	2,78	0,38%
		B3	65,21	13,80	0,34	2,78	12,15%
		B11	56,90	9,59	0,42	2,78	15,26%
		B12	33,40	12,01	0,20	2,78	7,15%
		B13	14,97	14,00	0,08	2,78	2,75%
N9	CTT	T3	44,48	10,37	0,31	2,78	11,03%
		B8	88,83	10,11	0,63	2,78	22,61%
		B13	14,97	14,00	0,08	2,78	2,75%
		T5	68,29	6,00	0,81	2,78	29,28%
		B14	91,00	11,38	0,57	2,78	20,57%
N10	CTT	T4	80,88	6,00	0,96	2,78	34,68%
		B11	56,90	9,59	0,42	2,78	15,26%
		T6	130,12	6,00	1,55	2,78	55,79%
		T8	36,32	6,00	0,43	2,78	15,57%

Tabela 4. 26- Fatores de utilização dos nós da viga DB-H2-WR. Fonte: autor.(continuação)

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N11	TTT	B12	33,4	12,01	0,2	2,31	8,59%
		T5	68,29	6	0,81	2,31	35,14%
		T7	62,17	6	0,74	2,31	31,99%
		T9	18,29	6	0,22	2,31	9,41%
		T6	130,12	6	1,55	2,31	66,95%
N12	CTT	T7	62,17	6	0,74	2,78	26,66%
		T10	39,21	6	0,47	2,78	16,81%
		B15	33,08	7,75	0,3	2,78	10,98%
N13	CCT	B10	149,09	13,68	0,78	2,78	28,03%
		T8	36,32	6	0,43	2,78	15,57%
		REAÇÃO 1	127,57	14	0,65	2,78	23,44%
N14	CTT	T9	18,29	6	0,22	2,78	7,84%
		B15	33,08	7,75	0,3	2,78	10,98%
		T11	27,56	6	0,33	2,78	11,82%
N16	CTT	T11	27,56	6	0,33	2,78	11,82%
		T10	39,21	6	0,47	2,78	16,81%
		B14	91	11,38	0,57	2,78	20,57%
		B9	72,46	13,89	0,37	2,78	13,42%
		REAÇÃO2	127,57	14	0,65	2,78	23,44%

Como o tirante T6 é o elemento mais carregado, em função da sua resistência própria, espera-se que parte da ruína será por conta da flexão na região deste tirante. Assim como aconteceu com a viga-parede análoga de 1 furo (DB-H1-WR) o elemento a atingir sua capacidade máxima foi a armadura de aço posicionada acima da reentrância. Isso pode indicar que essa região foi pouco armada e que, caso fosse necessário que a viga suportasse a cargas maiores, esses pontos da viga-parede necessitariam de mais área de aço. Por meio da Figura 4.19 é possível ver como se deu a ruína das vigas ensaiadas por Neta (2019):



Figura 4. 19 – Modo de ruptura das vigas DB-WR-H2 de Neta (2019).

Como era de se esperar, as vigas DB-H2-WR apresentaram um comportamento mais dúctil e apresentaram uma carga resistente maior do que a DB-H2-NR que não possui armadura na alma. Ademais, percebe-se que a distribuição de carregamento ocorreu de modo mais equilibrado do que nas vigas DB-H2-NR, pois é possível verificar a formação de fissuras nos lados esquerdo e direito da viga, enquanto na viga sem armadura na alma as fissuras concentraram-se no lado direito. Além disso, o modelo apresentou uma carga resistente menor do que a sua viga análoga de apenas 1 furo (DB-H1-WR), também como esperado.

Fazendo um comparativo das vigas experimentais com o modelo verifica-se que, na parte superior do losango esquerdo, há a formação de uma grande trinca na região do tirante de concreto T2. Apesar deste tirante ser idealizado por um material que não é resistente aos esforços de tração o tirante T2 não é muito solicitado no modelo (fator de utilização de 2,88%). Desse modo, é possível afirmar que o modelo proposto não consegue representar fielmente a quantidade de esforços que agem nesse tirante tendo em vista que, de acordo com o mapa de fissuras, são de expressiva quantidade.

Algo que o modelo gerado é capaz de representar bem é a expectativa de ruptura da armadura presente na região do tirante T6. Nas duas vigas ensaiadas é notório que há a formação de trincas verticais, causadas por um misto de flexão e cisalhamento, nesse setor da viga. O modelo também é capaz de gerar uma carga máxima de ruptura que se aproxima do verificado experimentalmente como apresentado pela Tabela 4.27:

Tabela 4. 27- Comparativo de carga última entre as vigas-parede DB-H2-WR ensaiadas e o modelo de bielas e tirantes. Fonte: autor.

$P_{u,média}$ (kN)	$P_{u,MBT}$ (kN)	Diferença (%)
307,06	255,14	-16,91

A carga última do modelo de bielas e tirantes proposto - $P_{u,MBT}$ - apresentou um resultado numérico razoavelmente preciso, com uma cara 16,91% inferior em relação às vigas ensaiadas por Neta (2019), $P_{u,média}$. Apesar disso, de modo geral, ao se analisar o modo de ruptura esperado a partir do modelo com o modo de ruptura das vigas ensaiadas nota-se que o comportamento esperado é parecido ao que foi observado no experimento do Estudo Preliminar de Neta (2019).

4.3.4. DB-H2-WR-S

A viga parede DB-H2-WR-S caracteriza-se por ter armadura na alma e por ser reforçada com tiras de CFRP. A Figura 4.20 mostra o modelo gerado e os detalhamentos de reforço e armadura para essa viga-parede.

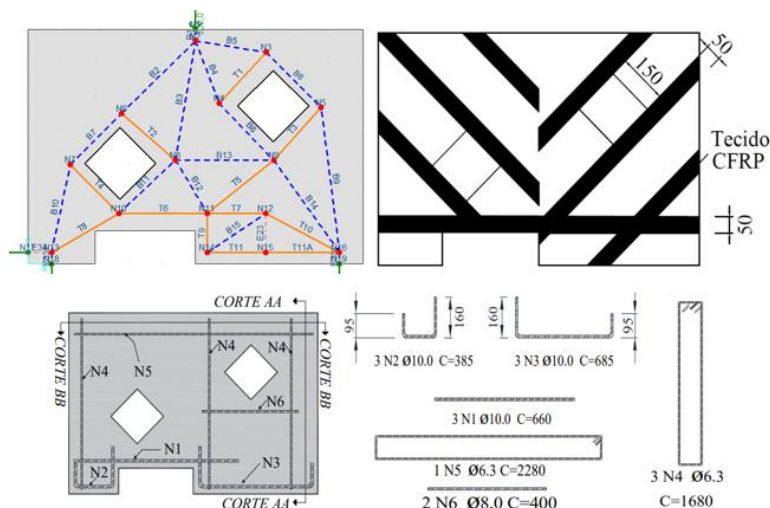


Figura 4. 20 - Modelo de bielas e tirantes, armadura e reforço da viga-parede DB-WR-H2-S. Fonte: autor.

Esta viga-parede será ensaiada por Neta (2019) na parte final de seu doutoramento. Busca-se então, como em todas as outras vigas reforçadas citadas neste trabalho, descobrir o ganho de resistência que pode ser fornecido pelo reforço de CFRP para as vigas. Para as vigas-parede com dois furos (DB-H2) é desta que se espera a maior carga última. Assim, foi modelada a viga, com as propriedades de cada elemento de barra e dos nós e o resultado das forças resultantes em bielas e tirantes, assim como os fatores de utilização das zonas nodais estão apresentados nas Tabelas 4.28 e 4.29 a seguir:

Tabela 4. 28 - Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-WR-S. Fonte: autor.

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{máx,aço}$ (kN)	$V_{máx,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{máx,aço}+V_{máx,FRP}}{Força}$
B1	Prismática	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%	-	-	-
B2	Prismática	164,35	9,79	1,20	3,28	36,59%	-	-	-
B3	Prismática	85,43	13,80	0,44	3,28	13,49%	-	-	-
B4	Prismática	129,70	13,09	0,71	3,28	21,59%	-	-	-
B5	Prismática	86,91	2,24	2,78	3,28	84,71%	-	-	-
T1	Tirante de Aço +FRP Inclinado	50,81	-	40,75	55,23	-	68,86	362,80	11,77%
B6	Prismática	72,31	9,90	0,52	3,28	-	-	-	-
B7	Prismática	164,13	9,90	1,18	3,28	36,14%	-	-	-
T2	Tirante de FRP Inclinado	1,78	9,12	-	-	-	0,00	362,80	0,49%

Tabela 4. 28- Tabela com os fatores de utilização das bielas e tirantes do modelo da viga DB-H2-WR-S. Fonte: autor. (continuação)

Bielas e Tirantes	Tipo	Força (kN)	Ws (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}	$V_{máx,aço}$ (kN)	$V_{máx,FRP}$ (kN)	$\frac{V_{máx,aço}+V_{máx,FRP}}{Força}$
B8	Prismática	116,38	10,11	0,82	3,28	25,09%	-	-	-
T3	Tirante de Aço +FRP Inclinado	58,27	-	46,74	55,23	-	68,86	362,8	13,50%
B9	Prismática	94,93	13,89	0,49	3,28	14,90%	-	-	-
B10	Prismática	195,33	13,68	1,02	3,28	31,10%	-	-	-
T4	Tirante de Aço +FRP Inclinado	105,96	-	44,9	55,23	-	130,34	362,8	21,49%
B11	Prismática	74,54	9,59	0,56	3,28	16,93%	-	-	-
B12	Prismática	33,4	12,01	0,2	3,28	6,06%	-	-	-
B13	Prismática	19,61	14	0,1	3,28	3,05%	-	-	-
T5	Tirante de Aço +FRP Inclinado	89,47	-	54,89	55,23	-	90,02	362,8	19,76%
B14	Prismática	119,22	11,38	0,75	3,28	22,83%	-	-	-
T6	Tirante de Aço +FRP Horizontal	170,48	-	55,23	55,23	-	130,12	288,84	40,69%
T7	Tirante de Aço +FRP Horizontal	81,45	-	34,57	55,23	-	130,12	288,84	19,44%
T8	Tirante de Aço +FRP Inclinado	23,26	-	9,87	55,23	-	130,12	362,8	4,72%
T9	Tirante de Aço +FRP Vertical	23,96	-	10,17	55,23	-	130,12	288,84	5,72%
B15	Prismática	43,34	7,75	0,4	3,28	12,18%	-	-	-
T10	Tirante de Aço +FRP Inclinado	51,37	-	31,51	55,23	-	90,02	362,8	11,34%
T11	Tirante de Aço +FRP Horizontal	36,1	-	15,32	55,23	-	130,12	288,84	8,62%

Tabela 4. 29- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-WR-S. Fonte: autor.

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N2	CCC	B1	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%
		B2	164,35	9,79	1,20	3,28	36,59%
		B3	85,43	13,80	0,44	3,28	13,49%
		B4	129,70	13,09	0,71	3,28	21,59%
		B5	86,91	2,24	2,78	3,28	84,71%
		P	334,27	14,00	1,71	3,28	52,03%
N3	CCT	B5	86,91	2,24	2,78	2,78	100,00%
		T1	50,81	6,00	0,60	2,78	21,79%
		B6	72,31	9,90	0,52	2,78	18,79%
N4	CCT	B4	129,70	13,09	0,71	2,78	25,48%
		T1	50,81	6,00	0,60	2,78	21,79%
		B8	116,38	10,11	0,82	2,78	29,62%
N5	CCT	B6	72,31	9,90	0,52	2,78	18,79%
		T3	58,27	6,00	0,69	2,78	24,99%
		B9	94,93	13,89	0,49	2,78	17,59%
N6	CCT	B2	164,35	9,79	1,20	2,78	43,20%
		T2	1,78	9,12	0,01	2,78	0,50%
		B7	164,13	9,90	1,18	2,78	42,67%
N7	CCT	B7	164,13	9,90	1,18	2,78	42,67%
		T4	105,96	6,00	1,26	2,78	45,43%
		B10	195,33	13,68	1,02	2,78	36,72%
N8	CCT	T2	1,78	9,12	0,01	2,78	0,50%
		B3	85,43	13,80	0,44	2,78	15,92%
		B11	74,54	9,59	0,56	2,78	19,99%
		B12	33,40	12,01	0,20	2,78	7,15%
		B13	19,61	14,00	0,10	2,78	3,60%
N9	CTT	T3	58,27	6,00	0,69	2,78	24,99%
		B8	116,38	10,11	0,82	2,78	29,62%
		B13	19,61	14,00	0,10	2,78	3,60%
		T5	89,47	6,00	1,07	2,78	38,36%
		B14	119,22	11,38	0,75	2,78	26,95%
N10	CTT	T4	105,96	6,00	1,26	2,78	45,43%
		B11	74,54	9,59	0,56	2,78	19,99%
		T6	170,48	6,00	2,03	2,78	73,10%
		T8	23,26	6,00	0,28	2,78	9,97%

Tabela 4. 29- Fatores de utilização dos nós da viga-parede DB-H2-WR-S. Fonte: autor. (continuação)

Nó	Tipo	Interface	Força (kN)	Ws ou Wt (cm)	f_{ef} (kN/cm ²)	f_{res} (kN/cm ²)	f_{ef}/f_{res}
N11	TTT	B12	33,4	12,01	0,2	2,31	8,59%
		T5	89,47	6	1,07	2,31	46,04%
		T7	81,45	6	0,97	2,31	41,91%
		T9	23,96	6	0,29	2,31	12,33%
		T6	170,48	6	2,03	2,31	87,72%
N12	CTT	T7	81,45	6	0,97	2,78	34,92%
		T10	51,37	6	0,61	2,78	22,02%
		B15	43,34	7,75	0,4	2,78	14,38%
N13	CCT	B10	195,33	13,68	1,02	2,78	36,72%
		T8	23,26	6	0,28	2,78	9,97%
		REAÇÃO 1	167,13	14	0,85	2,78	30,71%
N14	CTT	T9	23,96	6	0,29	2,78	10,27%
		B15	43,34	7,75	0,4	2,78	14,38%
		T11	36,1	6	0,43	2,78	15,48%
N16	CTT	T11	36,1	6	0,43	2,78	15,48%
		T10	51,37	6	0,61	2,78	22,02%
		B14	119,22	11,38	0,75	2,78	26,95%
		B9	94,93	13,89	0,49	2,78	17,59%
		REAÇÃO2	167,13	14	0,85	2,78	30,71%

Pelas tabelas mostradas conclui-se que o elemento limitante de resistência da viga é o nó N3 em sua interface com a biela B5. A carga máxima portante dessa viga-parede, de acordo com o modelo, é de 334,27 kN. É importante pontuar que essa carga máxima e esse elemento de treliça que limita a carga resistente da viga (nó N3) são os mesmos da viga DB-NR-H2-S. Ou seja, mesmo havendo armadura na alma, a viga DB-H2-WR-S não é capaz de aumentar a sua capacidade resistente. Isso ocorre por que, de acordo com o modelo gerado, esse aumento de armadura na alma não é capaz de aumentar a resistência da zona nodal de N3. Por fim, a Tabela 4.30 mostra o ganho de resistência esperado para viga DB-WR-H2-S em comparação com a sua similar sem reforço (DB-WR-H2):

Tabela 4. 30- Comparativo entre os modelos das vigas DB-H2-WR com reforço e sem reforço. Fonte: autor.

$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H2-WR (kN)	$P_{u,MBT}$ aplicada na viga DB-H2-WR-S (kN)	Aumento de resistência entre modelo reforçado e não reforçado (%)
255,14	334,27	31,01

5. CONCLUSÃO

Por meio do referencial bibliográfico é possível perceber a relevância do método de bielas e tirantes ao se analisar elementos de concreto armado que possuem descontinuidades. E, até mesmo para regiões contínuas dentro da estrutura, em que são válidas as hipóteses de Bernoulli, esse método é aplicável. Entretanto, há desvantagens significativas para o uso do método: configuração geométrica da treliça, valores máximos resistentes dos elementos de nós e bielas, correto entendimento do caminhamento das solicitações e experiência do usuário.

Para auxiliar na construção de modelos de bielas e tirantes tem-se dois softwares, de fácil manuseio e interface amigável, ForcePAD e CAST, que auxiliam e aceleram os processos de concepção e análise das treliças. A utilização desses dois softwares em conjunto foi importante para o desenvolvimento deste trabalho já que com o ForcePAD foi possível ver o caminho das tensões principais. Depois de entendido o caminho das tensões em regiões altamente descontínuas, como nas vigas analisadas neste trabalho, tornou-se mais simples o posicionamento geométrico de nós, bielas e tirantes. Dessa forma, foi possível enxergar múltiplas soluções para o mesmo problema e afiná-las de modo a utilizar o modelo que mais se aproximasse da realidade.

Na etapa de análise, em que se analisaram as vigas sem reforço, observou-se que a maioria dos modelos foram calibrados de modo satisfatório. O modo de ruptura esperado, em relação ao que ocorreu no Estudo Preliminar de Neta (2019), foi condizente com os ensaios. As regiões nas quais os elementos das treliças mostravam-se mais carregados condiziam com as partes das vigas ensaiadas mais fissuradas. Com relação à carga última que levou as vigas-parede à ruína a margem de diferença do resultado experimental para os modelos variou de 4% a 40%.

Na etapa de previsão de carga, fez-se algo inovador com relação ao pesquisado nas referências bibliográficas: inseriu-se o reforço de CFRP nos cálculos de tirante para vigas-parede com regiões descontínuas. Com as devidas adequações, utilizou-se as equações de

Dhahir (2018) para essa inserção. Para as vigas estudadas, obteve-se um aumento de até 80% na carga máxima portante para as vigas analisadas com as características estabelecidas.

É importante ressaltar que mesmo com os resultados dos ensaios realizados no estudo preliminar de Neta (2019) teve-se dificuldades para encontrar o modelo de bielas e tirantes que representasse tais vigas. Além disso, o método de bielas e tirantes não considera o histórico de carregamento e nem as redistribuições de tensões quando se há fissuras no elemento estrutural. De forma geral, pelos resultados obtidos, observou-se que quanto mais complexa é a estrutura, menor é a capacidade de previsão de carga de ruptura da estrutura e mais o método de bielas e tirantes torna-se conservador. Para se refinar os modelos gerados neste trabalho, de modo tentar diminuir as discrepâncias entre resultados do ensaio e dos modelos, poder-se-ia considerar bielas em forma de leque ou garrafa, por exemplo.

Dessa forma, é possível concluir que o trabalho conseguiu atingir seus objetivos. Conseguiu-se construir modelos de bielas e tirantes que representassem o comportamento de vigas-parede com geometrias não convencionais já ensaiadas. Além disso, foi possível construir modelos de bielas e tirantes, para vigas-parede com geometrias não convencionais, que possuíssem tirantes de aço e de CFRP. E, por fim, fez-se a previsão de carga máxima para vigas-parede reforçadas para que os resultados obtidos no ensaio possam ser comparados a posteriori.

6. BIBLIOGRAFIA

ABDUJALIL, B. S. Shear Resistance Of Reinforced Concrete Deep Beams With Opening Strengthened by CFRP Strip. **Journal of Engineering and Development**, Bagdá, Iraque, v. 18, n. 1, p. 19, Janeiro 2014. ISSN 1813-7822.

ABNT. **NBR 6118 : Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. ABNT. [S.l.], p. 238. 2014. (ISBN).

ACI. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318)**. American Concrete Institute. [S.l.], p. 522. 2014.

AGUIAR , C. C. P. D. **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS ESPECIAIS DE CONCRETO ARMADO PELO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica -Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, p. 113. 2018.

AL-BAYATI, N. A.; MUHAMMED, B. R.; ODA, M. F. Effect of Shear Span to Effective Depth Ratio on the Behavior of SelfCompacting Reinforced Concrete Deep Beams Containing

Openings Strengthened with CFRP. **Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences**, Baghdad , Iraque, v. 1, p. 9, Março 2019. ISSN DOI : 10.33261.

AMASH, H. K. New shear strength model of simply supported reinforced concrete deep beams. **Kufa Journal Of Engineering**, Iraque, v. 3, n. 1, p. 125-144, jun. 2011. ISSN ISSN.

ATTIYA, M. A.; ABBAS, H. N. Non-Linear Analysis Of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams With Openings Strengthened Using CFRP Sheets. **International Journal of Scientific & Technology Research**, Kufa , Iraque, v. 9, n. 1, p. 2350 - 2354, Janeiro 2020. ISSN ISSN 2277-8616.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 258. 2003.

BIRRCHEER, D. et al. **STRENGTH AND SERVICEABILITY DESIGN OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS**. Center for Transportation Research - University of Texas at Austin. Texas, Estados Unidos, p. 376. 2009.

BORDA, R. A. A. **Análise Experimental de vigas parede de concreto reforçado com bambu**. Dissertação de Mestrado- Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 123. 2013.

BROWN, M. D. et al. **Design for Shear in Reinforced Concrete Using Strut-and-Tie**. Ferguson Structural Engineering Lab - University of Texas. Austin, Estados Unidos, p. 330. 2006.

CEN. **Eurocode 2 - Design of concrete structures**. Comitê Europeu de Normatização. [S.l.], p. 225. 2004.

CHANTELOT, G.; MATHERN, A. **Strut-and-tie modelling of reinforced concrete pile caps**. Department of Civil and Environmental Engineering - Chalmers university of Technology. Tese de Mestrado. Göteborg, Suécia, p. 233. 2010.

CHIN, S. C. et al. Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites. **Trans Tech Publications**, Suíça, v. 1025-1026, p. 938-943, Julho 2014.

CHINNARAJ, C. et al. STUDY OF CRACK DEVELOPMENT ON DEEP BEAMS WITH AND WITHOUT FRP. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 19, p. 14350 - 14355, 2015. ISSN ISSN 0973-4562.

COSTA, D. B. D. **Análise de Furos em Vigas de Concreto Armado pelo Modelo de Bielas e Tirantes**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 78. 2013.

DHAHIR, M. K. Strut and Tie Modeling of Deep Beams Shear Strengthened With FRP Laminates. **Composite Structures**, Babylon, Iraque, v. 193, p. 247 - 259, Março 2018. ISSN DOI : 10.1016/j.compstruct.2018.03.073.

EL-MAADDAWY, T.; EL-ARISS, B. Behaviour of Concrete with Short Shear Span and Web Opening Strengthened in Shear with CFRP Composites. **Journal of Composites for Construction** , p. 47-59, Fevereiro 2012. ISSN DOI: 10.1061.

FADHIL, A. T. Experimental Evaluation of the Strut-and-Tie Model Applied to Deep Beam with Near-Load Openings. **Journal Of Engineering**, Bagdad, Iraque, v. 23, n. 10, p. 14, Outubro 2017.

FORCEPAD. **ForcePAD Homepage**, 2017. Disponível em: <<http://forcepad.sourceforge.net/>>. Acesso em: 03 Março 2021.

GAMINO, A. L. **Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 285. 2007.

GARBER, D. B. et al. Experimental Evaluation of Strut-and-Tie Model of Indeterminate Deep Beam. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 4, p. 873-880, Julho/Agosto 2014. ISSN DOI : 10.14359/51686738.

GUAN, H.; DOH, J.-H. Development of Strut-and-Tie Models in Deep Beams with Web Openings. **Advances in Structural Engineering**, Queensland - Austrália, v. 10, n. 6, p. 697-711, Dezembro 2007. ISSN DOI: 10.1260/136943307783571427.

GUERRA, M. B. B. F.; GRECO, M. Modelos de concepção para estruturas de concreto armado com comportamento não linear obtidos pelo método de bielas e tirantes e otimização topológica. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural - Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural (ASAE)**, Passo Fundo, RS - Brasil, v. 14, n. 1, p. 59-78, jan./abr. 2017.

HANOON, A. N. et al. Strut-and-tie model for externally bonded CFRP-strengthened reinforced concrete deep beams based on particle swarm optimization algorithm: CFRP debonding and rupture. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 428 - 447, Abril 2017.

HEIZA, K. M.; MELEKA, N. N.; ELWKAD, N. Y. Behavior and Analysis of Self-Consolidated Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened in Shear. **International Scholarly Research Network**, Shenin El-kom, Egito, v. 2012, p. 14, Novembro 2011. ISSN DOI : 10.5402/2012/202171.

HWANG, S. J.; TSENG, C. C. **SHEAR STRENGTH PREDICTION OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS WITH WEB OPENINGS**. National Conference on Earthquake Engineering, Tenth U.S. Anchorage, Alaska: Frontiers of Earthquake Engineering. 2014. p. 11.

IBRAHIM, M. A. et al. Proposed formula for design of deep beams with shear openings. **Housing and Building National Research Center - HRBC Journal**, Egito, p. 450-465, Junho 2018. ISSN ISSN:1687-4048.

KONG, F. K.; CHEMROUK, M. Reinforced Concrete Deep Beams. In: KONG, F. K. **Reinforced Concrete Deep Beams**. 1. ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 2002. Cap. 1, p. 299.

KOTSOVOS, M. D. Strength and behaviour of deep beams. In: BRAESTRUP, M. W., et al. **Reinforced Concrete Deep Beams**. 1. ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 2002. Cap. 2, p. 299.

KUCHMA, D. A.; TJHIN, T. N. **CAST (Computer Aided Strut-And-Tie) Design Tool**. Universidade de Illinois. Illinois, EUA, p. 7. 2001.

KUMAR, H. G. **Experimental and Numerical Studies on Behaviour of FRP Strengthened Deep Beams with Openings**. Departamento de Engenharia Civil do Instituto Nacional de Tecnologia. Rourkela, Índia, p. 74. 2012.

LAFTA, Y. J.; YE, K. Specification of Deep Beams Affect the Shear Strength Capacity. **Civil and Environmental Research**, v. 8, n. 2, p. 56-68, 2016. ISSN ISSN.

LINDEMANN, J.; SANDBERG, G.; K., O. An approach to teaching architectural and engineering students utilizing computational mechanics software ForcePAD. **Journal of Information Technology in Construction**, Lund - Suécia, v. 9, n. 1, p. 10, Julho 2004.

MÖRSCH, E. **Concrete-Steel Construction**. The engineering News publishing company. [S.l.]. 1909.

MUTTONI, A.; RUIZ, M. F.; NIKETÍC, F. Design versus Assessment of Concrete Structures Using Stress Fields and Strut-and-Tie Models. **ACI STRUCTURAL JOURNAL**, Farmington Hill, USA, v. 112, n. 5, p. 605-616, 2015. ISSN DOI 10.14359/51687710.

NETA, I. C. D. A. **Análise Experimental e Numérica de Estruturas de Concreto Armado com Geometrias Não Convencionais Reforçadas Com Fibras**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 127. 2019.

NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design Of Concrete Structures**. 14^a. ed. Nova York: McGraw-Hill, v. 4, 2010.

PALIGA, C. M.; FILHO, A. C.; REAL, M. V. Modelo de elementos finitos para análise numérica de estruturas de concreto armado reforçadas. **Revista IBRACON de Estruturas**, v. 3, n. 2, p. 177-200, Junho 2007. ISSN ISSN 1809-1121.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 2^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., v. 1, 1993.

RIBEIRO, A. D. S.; FILHO, A. C.; PACHECO, A. R. Modelo de Elementos Finitos para o Estudo de Estruturas Segmentadas. **Revista IBRACON de Estruturas**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, v. 2, n. 2, p. 187-227, Junho 2006. ISSN ISSN 1809-1121.

RITTER, W. **Die bauweise hennebique (The hennebique construction method)**. Schweizerische Bauzeitung. [S.l.]. 1899.

RUSSO, G.; VENIR, R.; PAULETTA, M. Reinforced Concrete Deep Beams - Shear Strength Model and Design Formula. **ACI Structural Journal**, v. 102, p. 429-437, Maio-Junho 2005.

SANTOS, D. D. **Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo (EESC-USP). São Carlos, p. 171. 2006.

SANTOS, D. P. et al. Optimized design of RC deep beams based on performance metrics applied to strut and tie model and in-plane stress conditions. **Latin American Journal of Solids and Structures**, n. 212, p. 19, Julho 2019. ISSN ISSN 1679-7825.

SANTOS, G. G. M. **Análise Sistemática de vigas-parede biapoiadas de concreto armado.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, p. 150. 1999.

SATO, H. T. **Dimensionamento de regiões D através do método dos elementos finitos e do método de bieais e tirantes aliado à otimização topológica - Dissertação de Mestrado.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, p. 119. 2015.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K. Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. **The Structural Engineer**, Universidade de Stuttgart, Alemanha, v. 69, n. 1, p. 13, Março 1991.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. **Toward a Consistent Design of Structural Concrete.** PCI Journal. [S.l.], p. 75-150. 1987.

SHAABAN, I. G. et al. Effect of Partial Replacement of Coarse Aggregate by Polystyrene balls on the Shear Behaviour of Deep Beams with Web Openings. **Elsevier - Case Studies in Construction Materials**, p. 42, Dezembro 2019. ISSN CSCM 328.

VAZ, L.. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas.** 1ª. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier editora Ltda, v. 1, 2011.

VIEIRA, A. A. **ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGAS PAREDE COM GEOMETRIAS NÃO CONVENCIONAIS DE CONCRETO ARMADO.** Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, p. 90. 2018. (E.TD-004A/18).