

Flexural behavior of hybrid GFRP – concrete railway sleepers

Comportamento à flexão de dormentes ferroviários híbridos de GFRP – concreto



A. C. L. DE AZEVEDO ^a
carolopesazevedo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3777-8241>

A. M. A. J. TEXEIRA ^a
anam@ime.eb.br
<https://orcid.org/0000-0003-3762-7192>

L. A. V. CARNEIRO ^b
luizcarneiro@id.uff.br
<https://orcid.org/0000-0001-7036-2048>

Abstract

This paper aims to present the flexural behavior of hybrid GFRP (glass fiber reinforced polymer) concrete beams as sleepers to railway application. It was tried to obtain sleepers with adequate mechanical resistance, not susceptible to corrosion, durable and lighter than the sleepers in prestressed concrete. Pultruded fiberglass and polyester resin profiles were filled with high strength concrete and polyolefin fiber in the following proportions by volume: 1% and 2.5%. The beams were 1.06 meters long and had a 76 mm x 76 mm x 6 mm cross section, corresponding to a reduced model in a 1 : 2.64 scale of a 2.80 meters long sleeper. In the bending tests, the load was applied at the center of the sleeper, as provided in the Brazilian standard NBR 11709 (2015) and American standard AREMA (2016). During the tests the applied load, the vertical deflection and the longitudinal tensile and compression deformations were measured in the center of the span. The influence of fiber addition on the strength, rupture mode and flexural modulus of elasticity of the hybrid beams was analyzed. Finally, the hybrid sleeper performance was compared to that of the prestressed concrete monoblock sleeper. The results obtained were satisfactory, indicating that the proposed hybrid sleeper is a constructively and technically feasible alternative.

Keywords: sleeper, concrete, GRFP, polyolefin fiber, experimental analysis.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar o comportamento à flexão de vigas híbridas de GFRP (glass fiber reinforced polymer – polímero reforçado com fibra de vidro) e concreto para aplicação em dormentes ferroviários. Pretendeu-se obter dormentes com adequada resistência mecânica, não susceptíveis à corrosão, duráveis e mais leves que os dormentes em concreto protendido. Foram estudados perfis pultrudados de fibra de vidro e resina de poliéster, preenchidos com concreto de alta resistência e fibras de poliolefina nas seguintes proporções em volume: 1% e 2,5%. As vigas tinham 1,06 metros de comprimento e seção transversal de 76 mm x 76 mm x 6,2 mm, correspondendo a um modelo reduzido em escala 1 : 2,64 de um dormente de 2,80 metros de comprimento. Nos ensaios de flexão, a carga foi aplicada no centro do dormente, conforme previsto nas normas ABNT NBR 11709 (2015) e AREMA (2016). Durante os ensaios foram medidas a carga aplicada, a flecha e as deformações longitudinais de tração e compressão no centro do vão. Foi analisada a influência da adição de fibras na capacidade resistente, no modo de ruptura e no módulo de elasticidade à flexão das vigas híbridas. Por fim, o desempenho do dormente híbrido foi comparado ao do dormente monobloco em concreto protendido. Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que o dormente híbrido proposto é uma alternativa viável construtivamente e tecnicamente.

Palavras-chave: dormente, concreto, GFRP, fibra de poliolefina, análise experimental.

^a Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
^b Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Civil, Niterói, RJ, Brasil.

1. Introdução

Os dormentes são elementos que se posicionam na direção transversal ao eixo da via, sobre os quais se colocam os trilhos. Com o sistema de fixação, constituem o elemento de união entre o lastro e o trilho, formando com este a estrutura da via. As dimensões dos dormentes variam de acordo com a bitola dos trilhos e com sua utilização. As bitolas mais conhecidas são: a larga com 1,60 metros, mais usada no Brasil, a métrica de 1,435 metros e a estreita com 1,00 metro, conforme apresentado na Figura 1. (Revista Ferroviária [1])

Desde as primeiras ferrovias foram adotados dormentes confeccionados em madeira, Figura 2, por ser este um material com elevada resistência mecânica e flexibilidade, o que resulta numa grande capacidade de suportar as vibrações provenientes das ações dinâmicas atuantes na via permanente (Bastos [2]). Com o passar dos anos, no entanto, verificaram-se desvantagens para a utilização da madeira como dormente, tais como: escassez de madeira nobre e elevada necessidade de substituição das peças devido aos danos causados pela ação do tempo e de agentes biológicos. Surgiu assim, a necessidade da busca de novas tecnologias e, foi a partir da 2ª Guerra Mundial, que os países da Europa, com destaque para a Inglaterra, França e Alemanha, começaram a substituir os dormentes de madeira pelos dormentes de concreto (Bastos [2]).

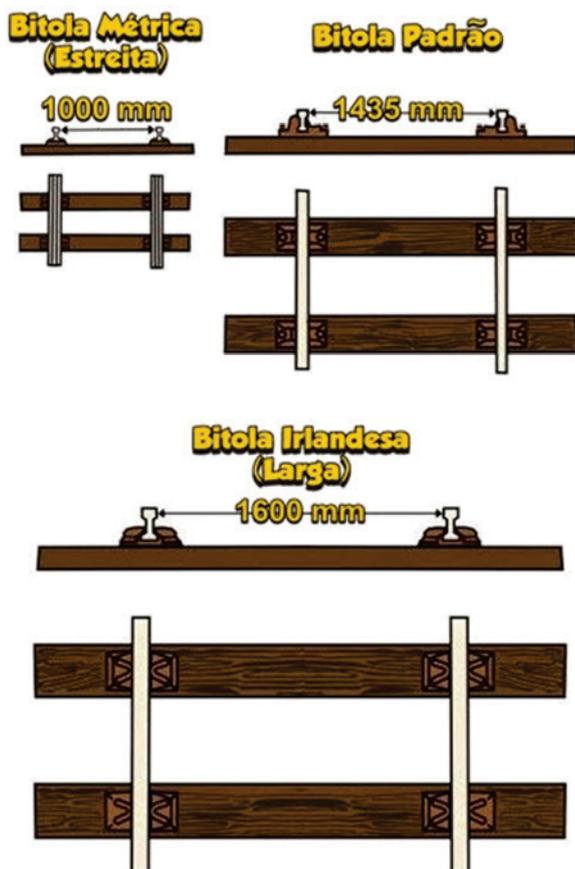


Figura 1
Bitolas ferroviárias mais utilizadas, Planeta Ferrovia [1]

Os dormentes de concreto podem ser classificados, quanto à forma, em monobloco e bibloco, conforme mostrado na Figura 3. Os dormentes bibloco são de concreto armado e interligados por um perfil metálico. Os dormentes monoblocos utilizados, atualmente, são de concreto protendido, pois de modo geral, os testes realizados com dormentes de concreto armado conduziram a resultados insatisfatórios, com exceção do dormente monobloco projetado pela Eternit na Itália, que utilizava cimento com fibras de asbesto (fibrocimento) (Bastos [2]). Os dormentes monobloco resistem a cargas superiores às dos dormentes bibloco e apresentam elevada durabilidade ao tempo e às ações de agentes biológicos, porém, são muito robustos e pesados, geralmente, com mais de 400 kg. Por isso, é necessário o uso de maquinário pesado para o transporte e instalação desses dormentes, além da construção de uma fábrica de dormentes próxima ao local da via férrea, cujos custos de mobilização e desmobilização são bastante elevados. Os dormentes de aço possuem vida útil superior à do dormente de madeira, apresentam elevada resistência mecânica e são leves (pesando em torno de 70 kg) (Trindade [3]). Segundo o DNIT [4], são de fácil assentamento, porém a leveza do dormente é inconveniente para linhas de tráfego pesado. Os dormentes de aço também possuem baixa resistência à corrosão, necessitando de tratamento adequado para a sua mitigação e são condutores elétricos, exigindo a instalação de isolantes na interface trilho/dormente.

O presente trabalho apresenta e analisa os resultados de ensaios de vigas de perfil pultrudado de fibra de vidro e resina de poliéster preenchidas com concreto sem e com adição de fibras de poliolefina à massa, em modelo reduzido com 1,06 metros de comprimento. Os autores também extrapolam os resultados experimentais obtidos para um protótipo de 2,80 metros de comprimento e comparam a sua capacidade resistente e o seu peso com o de um dormente monobloco de concreto protendido usualmente adotado em ferrovias brasileiras.

A associação entre concreto e perfis pultrudados de fibra de vidro e resina visa reduzir ou até mesmo eliminar os principais problemas dos dormentes ferroviários, que são: o elevado peso,



Figura 2
Dormente de madeira, Mundo das Tribos [20]

no caso de dormentes em concreto protendido, susceptibilidade à corrosão, no caso de dormentes de aço e baixa resistência aos agentes biológicos, no caso de dormentes de madeira. Já a adição de fibras de poliolefina ao concreto tem por objetivo aumentar a resistência à tração e retardar a abertura de fissuras do mesmo. A fibra de poliolefina não está sujeita à corrosão e é mais leve do que a fibra de aço, cuja adição ao concreto já é bastante difundida mundialmente.

Pesquisas encontradas na literatura sobre a associação do concreto ao perfil pultrudado de fibra de vidro e resina para aplicação em vigas e pesquisas sobre a adição de fibras de poliolefina ao concreto são apresentadas a seguir.

2. Referencial teórico

2.1 Polímero reforçado com fibras

O polímero reforçado com fibras é um material compósito formado pela combinação de dois materiais, sendo um o reforço em fibras sintéticas e o outro a matriz polimérica, buscando alcançar propriedades que individualmente os materiais não alcançariam (Gibson [5]).

As principais fibras sintéticas são de vidro, carbono e aramida. As fibras de vidro são as mais baratas e, por isso, as mais utilizadas na fabricação de materiais compósitos. Existem diversos processos de fabricação de materiais compósitos dentre os quais se destaca a pultrusão. Tais processos dão ao produto características distintas, pois, a quantidade e a orientação das fibras têm influência sobre as propriedades físicas e mecânicas do material e sobre o seu custo de produção. A pultrusão é um processo utilizado para confecção de perfis de seção transversal constante. Ela consiste no “puxamento” de fibras impregnadas por resina, através de um molde metálico aquecido, produzindo perfis com elevadas propriedades mecânicas na direção das fibras e a um baixo custo, além de imunes à corrosão.

2.2 Associação entre perfis pultrudados e concreto para aplicação em vigas

Estudos propondo a associação entre perfis pultrudados e concreto, para aplicação em vigas, foram publicados recentemente e vem despertando o interesse de pesquisadores e de empresas. Ferdous *et al.* [6] investigaram a viabilidade de aplicação de uma viga híbrida de perfil pultrudado de GFRP e concreto geopolimérico como dormente para ferrovias. As resistências características à compressão do concreto geopolimérico e do concreto de cimento Portland foram 40 MPa e 57 MPa, respectivamente. Os perfis tubulares quadrados tinham dimensões de 190 mm x 100 mm x 10 mm x 2000 mm de comprimento. Os resultados experimentais e de simulação computacional obtidos mostraram que a ruptura da viga híbrida ocorreu devido ao esmagamento do concreto na região comprimida. Os resultados obtidos de flecha do dormente e de pressão do dormente sobre o lastro foram semelhantes aos obtidos em dormentes tradicionais de madeira, o que aumenta a possibilidade de aceitação desse tipo de dormente em transporte ferroviário leve.

Muttashar *et al.* [7] também estudaram a influência do concreto na flexão de vigas híbridas formadas por perfis tubulares quadrados de GFRP preenchidos de concreto. Os perfis tinham dimensões de 125 mm x 125 mm x 6,5 mm x 2000 mm de comprimento preenchidos por concretos com resistências médias de 10 MPa, 37,5 MPa e 43,5 MPa. Eles verificaram que os perfis preenchidos com concreto resistiram a uma carga 100% a 140% maior que os perfis ociosos e tiveram um aumento de 25% na rigidez. O incremento na resistência à compressão dos concretos (de 10 MPa a 43,5 MPa) aumentou a carga ruptura em 19% e, praticamente, não alterou a rigidez à flexão das peças.

Muttashar *et al.* [8] estudaram o comportamento à flexão de vigas multicelulares de GFRP preenchidas parcialmente de concreto. Para isso, colaram tubos pultrudados quadrados de GFRP com dimensões de 125 mm x 125 mm x 6,5 mm com adesivos epóxi, formando vigas com uma a quatro células, com comprimentos de



(a)



(b)

Figura 3

Via com (a) dormente monobloco PANDROL [20] e (b) dormente bibloco Revista Ferroviária [1]

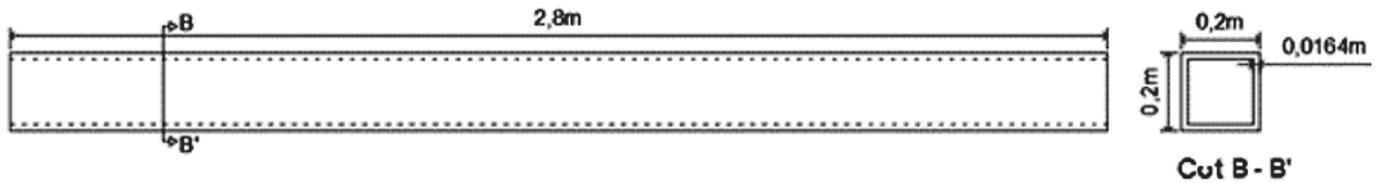


Figura 4

Vista longitudinal da seção transversal do perfil pultrudado de GFRP do protótipo (Autor)

2000 mm (unicelular), 2750 mm (duas células), 3700 mm (três células) e 5000 mm (quatro células). Os autores utilizaram concretos com resistências à compressão de 15 MPa e 32 MPa para preenchimento da célula superior das vigas multicelulares. As vigas foram testadas à flexão e seus comportamentos foram comparados com os de vigas ocas. Os resultados mostraram um aumento de até 27% na resistência das vigas multicelulares, quando comparadas com as vigas de uma única célula. O preenchimento da célula superior das vigas com concreto aumentou a capacidade de carga e a rigidez das vigas. As vigas multicelulares de GFRP preenchidas com concreto na célula superior romperam com uma carga de 38% a 80% maior e apresentaram rigidez de 10% a 22% maior do que as vigas multicelulares ocas correspondentes. O incremento da resistência à compressão do concreto das vigas de 15 MPa para 32 MPa resultou em um aumento de até 14% na carga de ruptura.

2.3 Adição de fibra de poliolefina ao concreto

Gaspar, Carneiro e Teixeira [9] estudaram a adição de fibra de aço e poliolefina em concreto submetido a impacto balístico. Os autores confeccionaram 28 placas quadradas com dimensão de 300 mm x 150 mm, sendo 14 placas com concreto de resistência convencional e outras 14 com concreto de alta resistência, todas com variação do teor volumétrico de fibras (0%, 0,5%, 1,0% e 1,5%). Para o ensaio balístico foram usados projéteis calibre 7,62 mm em cada placa de concreto, para verificar a capacidade de blindagem e o nível de danos causados a elas. Os resultados indicaram que a adição de fibras de aço e poliolefina favoreceu o aumento da resistência inicial do concreto, a capacidade de blindagem e a redução dos níveis de danos causados pelo impacto.

Alberti *et al.* [10] e Alberti *et al.* [11] estudaram a diferença na orientação e densidade das fibras de poliolefina adicionadas ao concreto convencional vibrado e ao concreto auto-adensável. Foram usadas fibras com 60 mm e 48 mm de comprimento, adicionadas ao concreto na proporção de 9 kg/m³, que equivale a 1,0 % em volume. Amostras com dimensões de 150 mm x 150 mm x 600 mm de comprimento foram moldadas e ensaiadas à flexão. A resistência característica à compressão dos concretos das amostras variou de 32,9 MPa a 39,3 MPa. As amostras de concreto auto-adensável apresentaram distribuição mais uniforme das fibras, assim como as amostras com fibras de 48 mm de comprimento apresentaram melhor orientação das fibras. Os autores concluíram que as fibras de poliolefina podem satisfazer os requisitos das normas, que consideram sua contribuição na redução das fissuras pós-pico de carga do elemento estrutural. Eles também verificaram que, enquanto o comprimento da fibra, o tipo de con-

creto e dimensões da amostra influenciam a superfície de fratura, o posicionamento e orientação das fibras em toda a peça pode ser bastante relevante para o desempenho do elemento estrutural.

3. Materiais e métodos

3.1 Projeto do dormente

O projeto de um dormente deve atender aos requisitos previstos em normas técnicas. No cenário internacional, as duas mais importantes instituições de estudam e normalizam o projeto de dormente de concreto são: a American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) e a European Rail Research Institute (ERRI). A metodologia de projeto da ABNT NBR 11709 [12] se assemelha muito ao da AREMA [13]. Isso porque, as características das vias brasileiras, no que se refere ao tipo de transporte e à qualidade da manutenção, apresentam semelhanças em relação às características das vias americanas.

3.2 Projeto do protótipo do dormente

O protótipo do dormente é composto por um tubo pultrudado de GFRP preenchido por concreto com resistência média a compressão de 73 MPa. Considerando-se as dimensões das ombreiras do dormente em concreto protendido, optou-se por perfis com dimensões de 200 mm x 200 mm x 16,4 mm, conforme apresentado na Figura

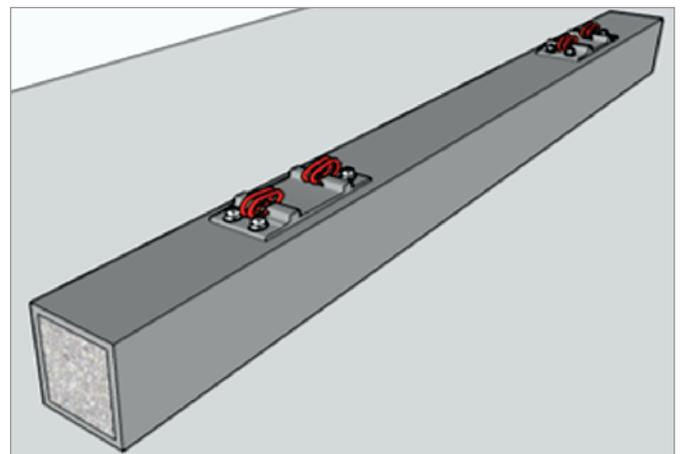


Figura 5

Desenho esquemático do dormente híbrido GFRP/concreto (Autor)

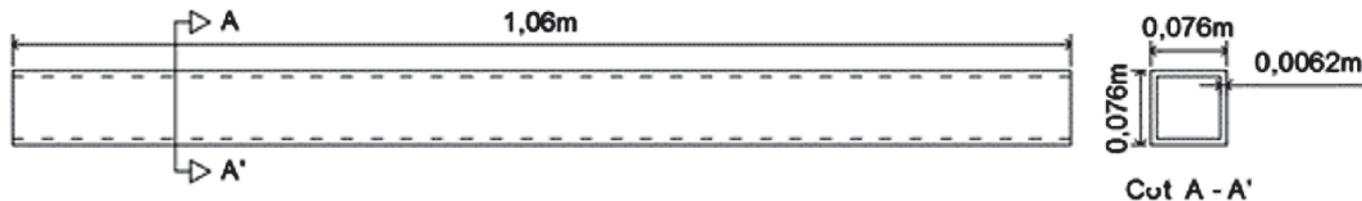


Figura 6
Vista longitudinal e seção transversal do perfil pultrudado de GFRP do modelo reduzido (Autor)

4. O comprimento de 2,80 metros é usual para dormente de concreto protendido no Brasil, por isso foi adotado neste projeto. A Figura 5 mostra o desenho esquemático do dormente híbrido de GFRP/concreto. Deve-se ressaltar que, conforme a ABNT NBR 11709 [12], a resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) de dormentes em concreto protendido não pode ser inferior a 45 MPa.

Os perfis pultrudados de GFRP apresentam elevada resistência à tração na direção das fibras e baixo peso específico. O preenchimento dos perfis pultrudados de GFRP com concreto visa aumentar a rigidez e a resistência à flexão e ao cisalhamento da viga. Por isso, a associação entre o perfil pultrudado e o concreto pode ser uma boa alternativa para obtenção de dormentes monoblocos mais leves do que os dormentes monoblocos de concreto protendido.

Os perfis de GFRP são usualmente fabricados e comercializados no mercado brasileiro com seções tubulares quadradas, porém com dimensões de seções transversais menores do que 200 mm x 200 mm. Por isso, decidiu-se estudar um modelo reduzido de dormente, usando as dimensões de perfis disponíveis no mercado.

3.3 Projeto do modelo reduzido do dormente

Para o projeto do modelo reduzido do dormente, aplicou-se a teoria da semelhança dos modelos físicos, que permite que um modelo reduzido de estrutura reproduza o comportamento do protótipo. Para tal, fez-se a análise dimensional do problema de deformação conforme Carneiro [14] e obtiveram-se os seguintes números π representativos para o problema, que devem ser iguais no modelo reduzido e no protótipo.

$$\Pi_1 = \frac{F}{EI^2} = N_{Ho} \tag{1}$$

$$\Pi_2 = \frac{\gamma l}{E} = N_{Gal} \tag{2}$$

$$\Pi_3 = \frac{\delta}{l} \tag{3}$$

Tabela 1

Fatores de escala a serem considerados no modelo reduzido

Grandeza	Fator de escala
Flecha	$1/2,64$
Área dos perfis	$1/(2,64)^2$
Peso próprio	$1/(2,64)^3$
Carregamento aplicado	$1/(2,64)^2$
Massa adicional	$1,64$

Onde:

F é a força aplicada;

E é a módulo de elasticidade longitudinal do material;

l é a comprimento do dormente;

γ é o peso específico do material e;

δ é a flecha do dormente.

O parâmetro π_1 , designado como número de Hooke, aplica-se a materiais com comportamento elástico linear em que as tensões são proporcionais às deformações, conforme Teixeira [15]. Com o número π_1 , obtém-se a força no protótipo a partir da força no modelo reduzido, equação (5).

Como o material do modelo reduzido é igual ao material do protótipo, não é possível atender diretamente o número π_2 . Para atendê-lo indiretamente, é necessário adicionar massa ao modelo reduzido, de modo que o peso específico do protótipo (γ_p) seja igual ao peso específico aparente do modelo reduzido (γ_m) multiplicado pela relação entre o comprimento do modelo reduzido e o comprimento do protótipo, conforme a equação (6). Então, a massa a ser

adicionada no modelo reduzido deverá ser igual a $\left(\frac{l_p}{l_m} - 1\right)$ vezes a massa do modelo reduzido.

Número π_3 obtém-se a flecha no protótipo, que será a flecha do modelo reduzido multiplicada pela relação entre o comprimento do protótipo e o comprimento do modelo reduzido, conforme a equação (4).

$$\delta_p = \frac{\delta_m l_m}{l_p} \tag{4}$$

Onde:

δ_p é a flecha do protótipo;

δ_m é a flecha do modelo reduzido;

l_p é o comprimento do protótipo e;

l_m é o comprimento do modelo reduzido.

$$F_p = \frac{F_m l_p^2}{l_m^2} \tag{5}$$

Onde:

F_p é a força do protótipo e

F_m é a força do modelo reduzido.

$$\gamma_p = \frac{\gamma_m l_m}{l_p} \tag{6}$$

Onde:

γ_p é o peso específico do protótipo e;

γ_m é o peso específico do modelo reduzido.

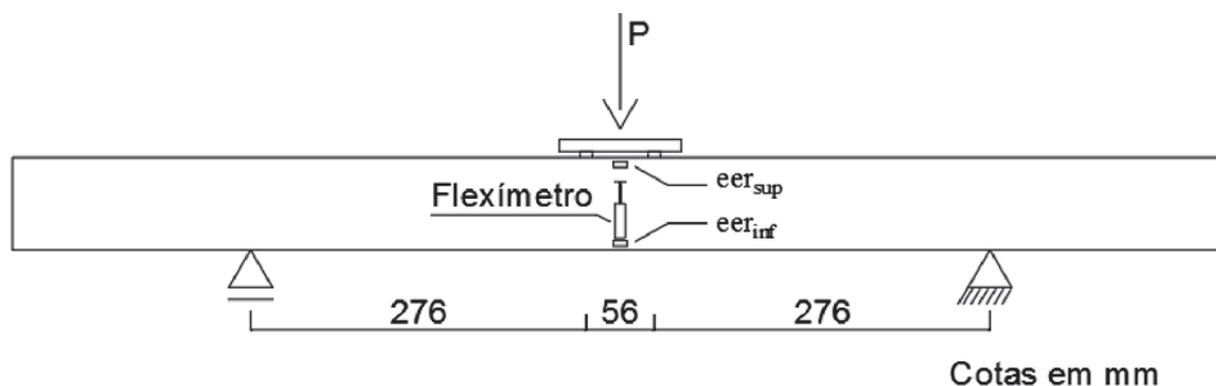


Figura 7
Esquema estrutural e instrumentação da viga (Autor)

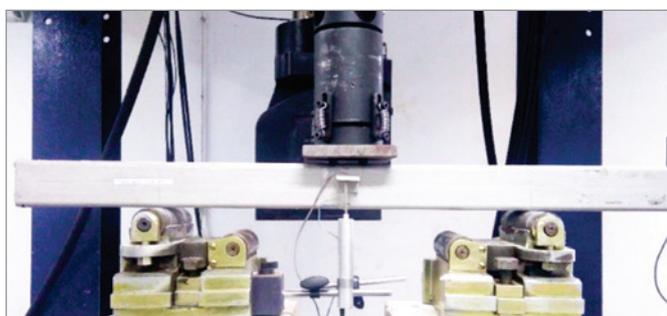


Figura 8
Modelo reduzido do dormente híbrido no início do ensaio

A escala do modelo reduzido foi definida a partir da disponibilidade de perfis no mercado brasileiro. Adotou-se o maior perfil quadrado disponível, que possuía 76 mm x 76 mm x 6,2 mm, conforme mostrado na Figura 6, resultando em um fator de escala geométrica entre o protótipo e o modelo reduzido (l_p / l_m) de 2,63.

Os fatores de escala do modelo reduzido em relação ao protótipo são apresentados na Tabela 1.

3.4 Programa experimental

Foram preparadas sete vigas híbridas GFRP/concreto, sendo duas vigas híbridas com concreto sem fibras, quatro vigas híbridas de concreto com adição de fibras de poliolefina com 25 mm de comprimento (duas com 1% em volume e duas com 2,5% em volume) e uma viga híbrida de concreto com 1% de adição em volume de fibras de poliolefina com 35 mm de comprimento.

Além das vigas, foram concretados 12 corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 150 mm x 300 mm, sendo três sem fibras, sete com adição de fibras de poliolefina com 25 mm de comprimento (quatro com 1% em volume e três com 2,5% em volume) e dois com 1% de adição em volume de fibras de poliolefina com 35 mm de comprimento. Também foi moldado um corpo de prova com dimensões de 100 mm x 200 mm, com 1% de adição de fibras de poliolefina com 25 mm de comprimento.

Juntamente com as vigas híbridas GFRP/concreto e com os corpos de prova cilíndricos, foram confeccionadas quatro vigas de concreto com 1% e 2,5% de fibras de 25 mm de comprimento e três vigas sem fibras e com 1% de fibras de 35 mm de comprimento. As vigas de concreto com variação volumétrica de fibras foram moldadas com o mesmo comprimento do modelo reduzido do dormente e com as dimensões internas do perfil pultrudado (63,6 mm x 63,6 mm x 1060 mm).

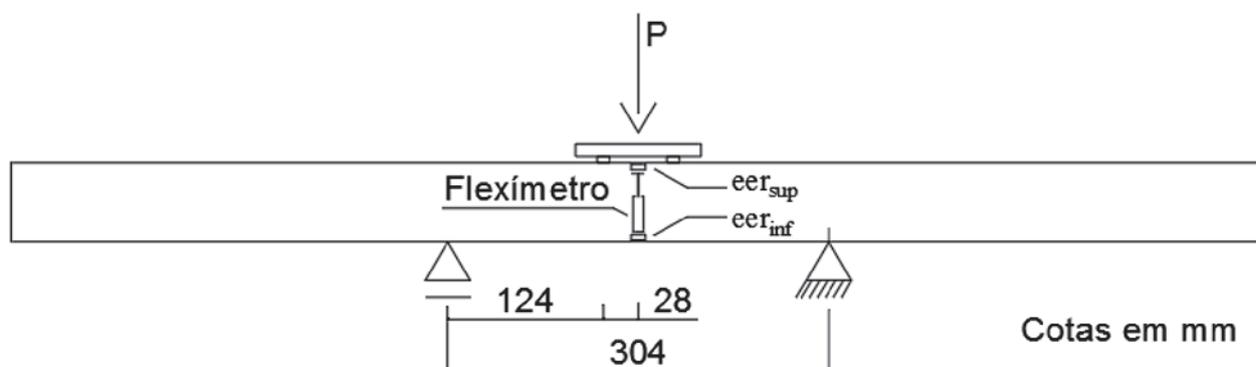


Figura 9
Esquema estrutural e de instrumentação das vigas de concreto



Figura 10
Viga preparada para ensaios de flexão

Foram preparadas amostras de GFRP para ensaio de tração e para determinação do peso específico e da fração mássica de fibras. As amostras de GFRP, os corpos de prova de concreto e as vigas híbridas foram preparados e ensaiados no laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia (IME). Os ensaios das amostras de GFRP foram realizados conforme as normas ASTM D297 [16] e ASTM D3039/D3039M [17]. Os ensaios de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos foram realizados conforme a norma ABNT NBR 5739 [18].

As vigas híbridas foram instrumentadas com dois extensômetros elétricos de resistência do tipo KFG-5-120-C1-11, da marca Kyowa, nos bordos superior e inferior do perfil de GFRP, no centro do vão de ensaio. Também foi utilizado um flexímetro do tipo DTH-A-50, com 50mm de curso, da marca Kyowa, para medição da flecha no centro do vão. O esquema estrutural e de instrumentação das vigas é mostrado na Figura 7.

As vigas foram ensaiadas à flexão e nos apoios foram adotados roletes de aço, conforme apresentado na Figura 8. A carga foi aplicada a uma taxa de 22 kN/min por meio de um atuador hidráulico da marca MTS, com capacidade para 1000 kN. A aquisição das cargas

Tabela 2
Resultados dos ensaios nas amostras de GFRP

Amostras	Vf totais %	Vf longas %	γ (N/m ³)	σ_{rup} (MPa)	E (MPa)
Tipo 1	64,12	51,93	18,48	372,01	31614
Tipo 2	64,12	51,93	18,48	447,63	-

Tabela 3
Resultados dos ensaios de compressão axial

% de fibras	CP	Área (mm)	Tensão média de ruptura (MPa)	E _{ci} (MPa)
Sem fibras	1			33467
	2	176,7	76,52	-
	3			-
1 - 25 mm	1			31702
	2	176,7		-
	3		70,40	-
	4	78,5		-
2,5 - 25 mm	5	176,7		30255
	1			-
	2	176,7	73,41	37252
1 - 35 mm	3			38678
	1			32932
	2	176,7	56,70	27400

e das flechas ao longo dos ensaios foi realizada por meio do programa Flextest, também da MTS, e a aquisição das deformações específicas foi feita por meio do sistema ADS 2000, da marca Lynx. As vigas de concreto com variação volumétrica de fibras foram instrumentadas com dois extensômetros elétricos de resistência (eersup e eerinf) do tipo KC - 80 - 120 - A1 - 11, da marca Kyowa, e ensaiadas à flexão com um atuador hidráulico com capacidade para 50 kN, conforme as Figuras 9 e 10, e um sistema de aquisição de cargas e deslocamentos da marca MTS. A aquisição das deformações foi feita por meio do equipamento ADS 2000, da marca Lynx.

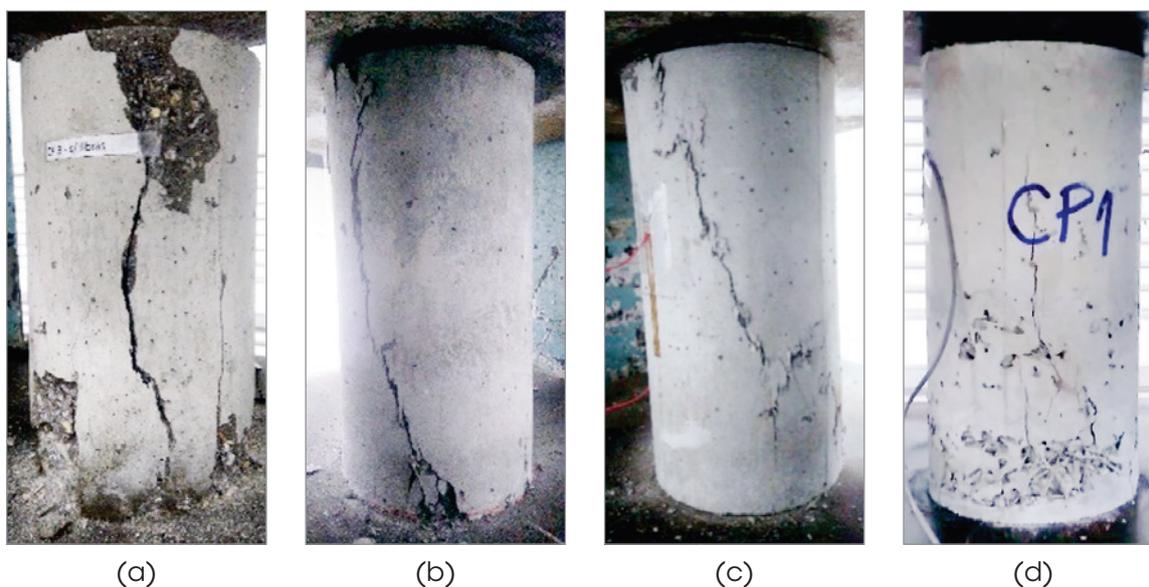


Figura 11
Corpos de prova cilíndricos após ensaio de compressão simples (a) sem fibras, (b) com 1% de fibras (25 mm), (c) com 2,5% de fibras (25 mm) e 1% de fibras (35 mm)

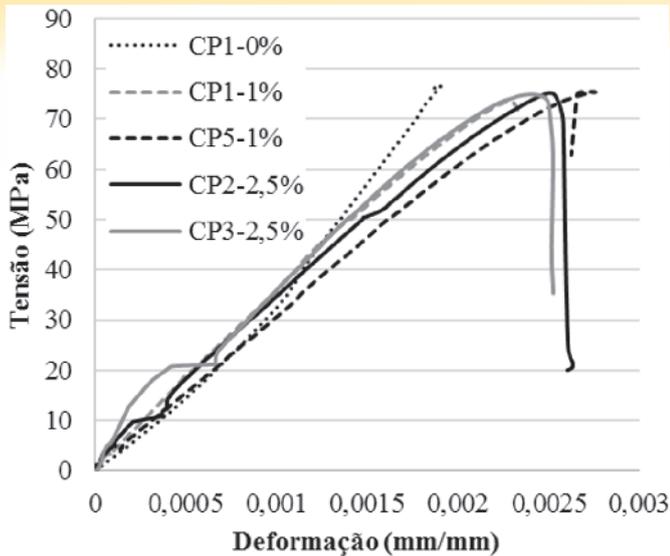
**Figura 12**

Gráfico tensão x deformação dos corpos de prova cilíndricos após ensaio de compressão simples (a) sem fibras, (b) com 1% de fibras (25 mm), (c) com 2,5% de fibras (25 mm)

4. Resultados e análises

4.1 Resultados dos ensaios do modelo reduzido

A Tabela 2 apresenta as frações mássicas de fibras totais (V_f totais %) e fibras longas (V_f longas %), o peso específico, a tensão de ruptura (σ_{rup}), a deformação de ruptura (ϵ_{rup}) e o módulo de elasticidade na tração paralelas às fibras obtidos nos ensaios realizados com amostras de GFRP. O perfil pultrudado de GFRP apresenta comportamento linear tensão x deformação até a ruptura do material por tração e ruptura frágil.

Tabela 4

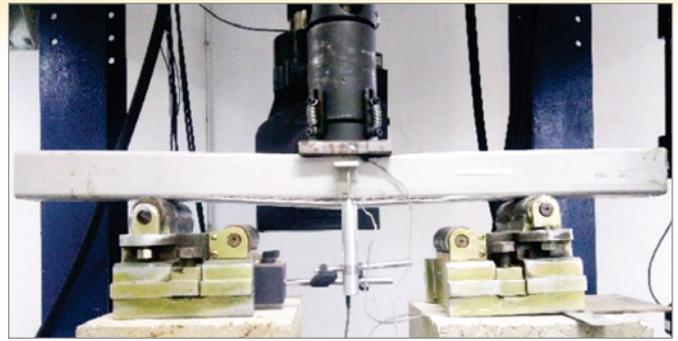
Valores médios dos resultados dos ensaios das vigas de concreto

%de fibras	P_{rup} (kN)	δ_{rup} (mm)	σ_{sup} (MPa)	σ_{inf} (MPa)	f_{cm} (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
0	6,33	0,19	7,23	11,07	76,52	-
1 25 mm	5,89	0,09	7,22	9,94	70,04	-
2,5 25 mm	6,15	0,08	7,53	9,69	73,41	6,11
1 35 mm	6,35	0,31	-	-	50,70	6,08

Tabela 5

Resultados obtidos nos ensaios das vigas híbridas

% de fibras	Viga	P_{rup} (kN)	$P_{rup\ med}$ (kN)	δ_{rup} (mm)	$\epsilon_{rup\ sup}$ GFRP	$\epsilon_{rup\ inf}$ GFRP
0	MODRED2	36,92	37,1	6,03	0,0035	0,0046
	MODRED3	37,31		6,35	0,0032	0,0045
1 - 25 mm	MODRED3	37,80	37,5	7,17	0,0039	0,0044
	MODRED4	37,13		7,56	0,0027	0,0038
2,5 - 25 mm	MODRED6	39,14	40,5	7,24	0,0030	0,0055
	MODRED7	41,90		7,61	0,0042	0,0070
1 - 35 mm	MODRED1	39,56	39,6	11,88	0,0023	0,0042

**Figura 13**

Modelo reduzido do dormente híbrido após ensaio no centro do dormente

A Tabela 3 mostra as tensões médias de ruptura e o módulo de elasticidade dos concretos sem fibras e com 1% e 2,5% em volume de fibras de poliolefina com 25 mm de comprimento e 1% em volume de fibras de poliolefina com 35 mm, obtidos a partir dos ensaios de compressão. Observa-se que a adição de fibras influenciou a resistência à compressão dos corpos de prova, reduzindo-a. Além disso, a ruptura dos corpos de prova com fibras ocorreu de forma mais dúctil do que o observado para os corpos de prova sem adição de fibras, conforme se verifica nas fotos da Figura 11 e no gráfico tensão x deformação da Figura 12. Também se pode observar que a resistência do corpo de prova com 1% de fibras de 35 mm foi bem menor quando comparada ao seu semelhante com fibras de 25 mm. Isso ocorreu devido ao grande número de vazios da amostra, conforme se verifica Figura 11.

A Tabela 4 apresenta os valores médios de carga, flecha e tensões normais na ruptura e módulo de elasticidade das vigas de concreto com variação volumétrica de fibras ensaiadas.

Os resultados de carga, flecha e deformações específicas nos bordos superior e inferior do perfil de GFRP obtidos na ruptura das vigas são apresentados na Tabela 5 e uma foto típica da viga híbridas após o ensaio é apresentada na Figura 13.

A ruptura das vigas híbridas ocorreu no bordo inferior e foi devida

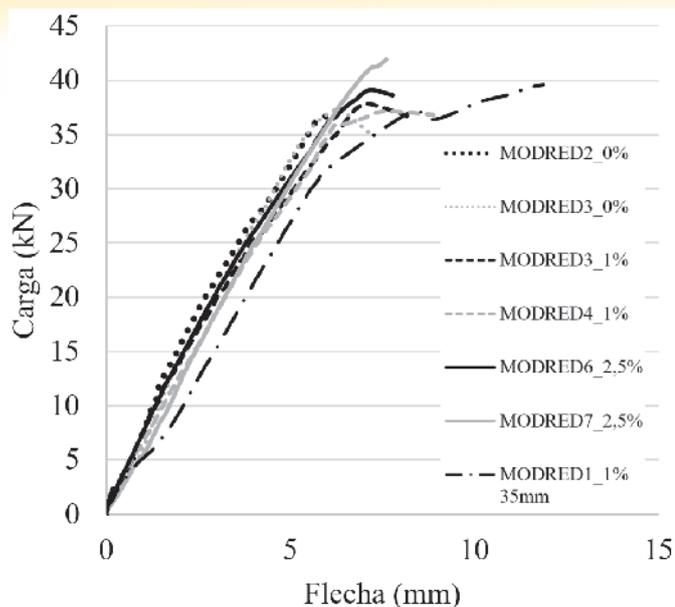


Figura 14
Gráficos carga x flecha das vigas híbridas com concreto sem fibra, com 1% e 2,5 % de fibra com 25 mm

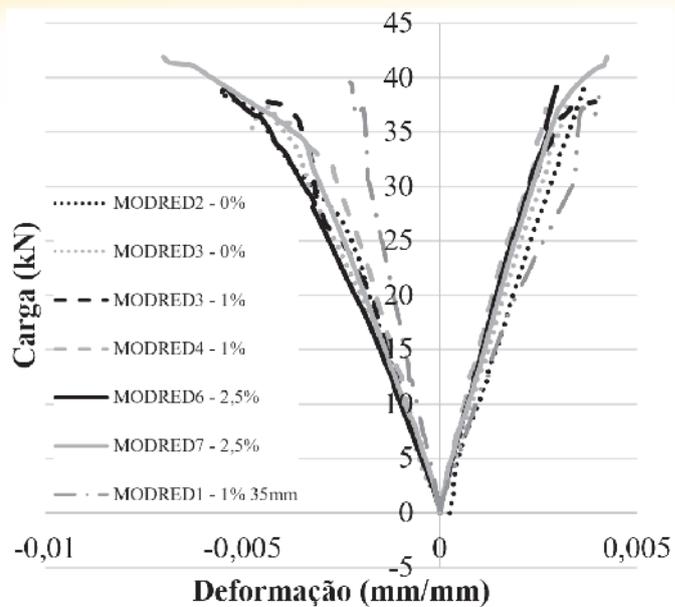
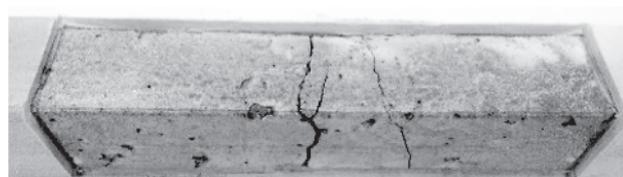


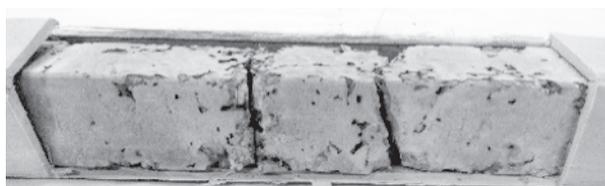
Figura 15
Gráficos carga x deformações das vigas híbridas com concreto sem fibras, com 1% e 2,5% de fibras de 25 mm e 1% de fibras de 35 mm



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 16
Fissuras no concreto das vigas híbridas sem fibras (a) e com fibra de poliolefina: 1% de 25 mm (b), 2,5% de 25 mm (c) e 1% de 35 mm (d), após os ensaios de flexão no centro

Tabela 6

Resultados calculados a partir dos ensaios das vigas híbridas

% de fibras	Viga	$\sigma_{rup\ sup\ GFRP}$	$\sigma_{rup\ inf\ GFRP}$
0	MODRED2	80,80	106,20
	MODRED3	82,03	115,35
1 - 25 mm	MODRED3	80,79	91,15
	MODRED4	81,63	114,89
2,5 - 25 mm	MODRED6	84,23	154,41
	MODRED7	91,53	152,56
1 - 35 mm	MODRED1	85,20	155,58

Tabela 7

Resultados calculados a partir dos ensaios das vigas híbridas

% de fibras	Viga	$\epsilon_{rup\ sup\ concreto}$	$\sigma_{rup\ sup\ concreto}$
0	MODRED2	0,0028	93,70
	MODRED3	0,0026	87,01
1 - 25 mm	MODRED3	0,0032	99,13
	MODRED4	0,0022	68,15
2,5 - 25 mm	MODRED6	0,0023	87,31
	MODRED7	0,0033	125,28
1 - 35 mm	MODRED1	0,0018	54,29

à ruptura do concreto por cisalhamento seguida pela ruptura do perfil de GFRP paralelamente às fibras. A menor carga da ruptura na viga híbrida com 1% de fibras de 25 mm de comprimento deve-se à menor resistência à compressão do concreto da mesma.

Os gráficos das Figura 14 e Figura 15 apresentam as curvas carga x flecha e tensão x deformação das amostras, respectivamente. Verifica-se que todas as vigas híbridas apresentaram rigidez semelhante, sendo que as vigas com adição de fibras apresentaram maior ductilidade próximo à ruptura.

Ao longo dos ensaios notou-se uma boa aderência na interface perfil/concreto, ocorrendo o descolamento entre o perfil e o concreto somente após a ruptura do concreto, culminando no modo de ruptura anteriormente descrito.

A adição de fibras ao concreto contribuiu para o aumento da carga de ruptura das vigas híbridas devido ao incremento da resistência

à tração dos concretos. O preenchimento do perfil de GFRP com concreto impediu a flambagem local das almas do perfil de GFRP. A menor carga da ruptura na viga híbrida com 1% de fibras de 25 mm de comprimento deveu-se à menor resistência à compressão do concreto da mesma.

Os valores de flecha no centro das vigas híbridas sem e com adição de fibras variaram de L/101 (vigas com 1% de fibras com 35 mm de comprimento) a L/51 (vigas com 1% de fibras com 35 mm de comprimento), sendo L o comprimento do vão.

A Figura 16 mostra as fissuras padrão nos concretos das vigas híbridas sem fibra e com fibras. Pode-se notar que a adição de fibras de poliolefina reduziu a abertura das fissuras nas vigas com 2,5% em peso de fibras com 25 mm de comprimento e com 1% em peso de fibras de 35 mm de comprimento. Os concretos com adição de fibras também apresentaram maior número de vazios. Em nenhum dos ensaios ocorreu esmagamento do concreto comprimido.

A Tabela 6 apresenta as tensões normais nos bordos superior e inferior do perfil de GFRP obtidas a partir das equações (7) e as tensões normais no bordo inferior do perfil de GFRP obtida pela Lei de Hooke. Verifica-se uma boa aproximação dos resultados.

As tensões nos bordos superior e inferior do perfil de GFRP, equações (7) e (8), foram calculadas a partir do momento fletor e da posição da linha neutra, equação (9), na seção do meio do vão. A posição da linha neutra foi obtida a partir das deformações específicas nos perfis de GFRP medidas nos ensaios, desprezando-se o concreto tracionado e considerando-se uma seção homogênea equivalente do concreto.

$$\sigma_{supGFRP} = \frac{M \cdot y}{I} \cdot n \tag{7}$$

Onde:

- $\sigma_{sup\ GFRP}$ é a tensão no bordo superior do perfil de GFRP;
- M é momento fletor;
- y é a altura da linha neutra;
- I é o momento de inércia da seção homogênea equivalente de concreto mostrada na Figura 17;
- n é a relação entre os módulos de elasticidade do GFRP e do concreto.

$$\sigma_{infGFRP} = \frac{M \cdot (h - y)}{I} \cdot n \tag{8}$$

Onde:

- $\sigma_{inf\ GFRP}$ é a tensão no bordo inferior do perfil de GFRP;
- M é momento fletor;
- y é a altura da linha neutra;
- h é a altura do perfil;

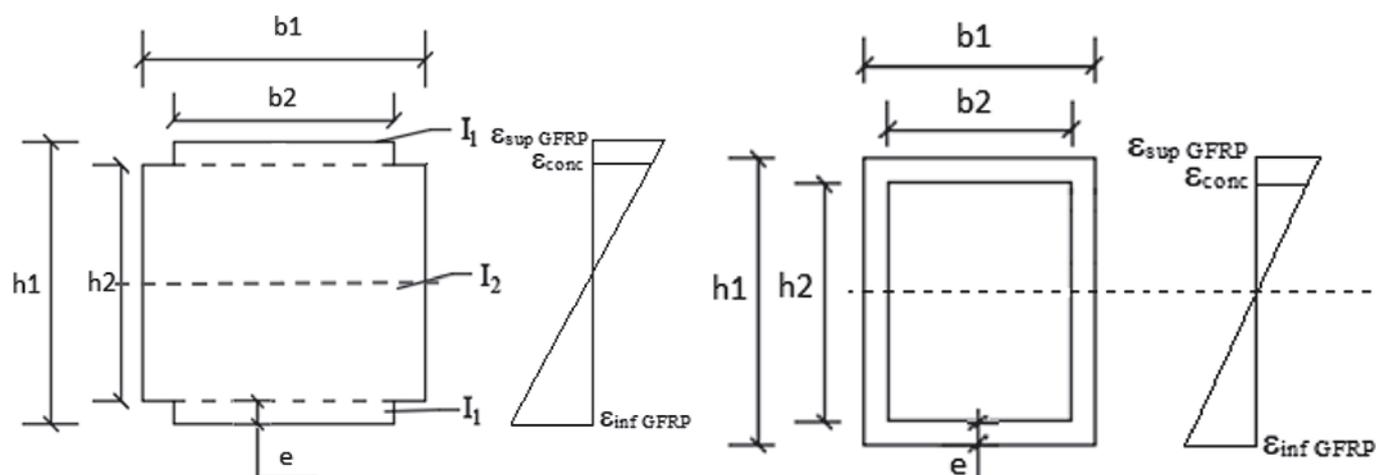


Figura 17
Seção homogênea equivalente de concreto

Tabela 8

Valores de V_c calculados para cada percentual volumétrico de fibras

% de fibras	f_{ctm}	f_{ctd}	V_c (kN)
0	11,07	7,75	18,81
1 - 25 mm	9,94	6,96	16,24
2,5 - 25 mm	10,39	7,27	17,64
1 - 35 mm	8,99	6,29	15,26

I é o momento de inércia da seção homogênea equivalente de concreto mostrada na Figura 17.

$$y = \frac{\epsilon_{supGFRP} \cdot b}{\epsilon_{supGFRP} + \epsilon_{infGFRP}} \quad (9)$$

onde:

y é a altura da linha neutra;

$\epsilon_{supGFRP}$ é deformação específica no bordo superior do perfil de GFRP;

b é a largura da base do perfil de GFRP;

$\epsilon_{infGFRP}$ é deformação específica no bordo inferior do perfil de GFRP. A Tabela 7 apresenta as deformações específicas e tensões normais de ruptura no bordo superior do concreto da viga, calculadas conforme as equações (10) e (11), considerando a aderência perfeita entre GFRP/concreto e os módulos de elasticidade médios obtidos nos ensaios de compressão axial (Tabela 3), com exceção para o concreto com fibras em que se obteve apenas um resultado de módulo de elasticidade.

$$\epsilon_{conc} = \frac{\epsilon_{supGFRP} \cdot (y - e)}{y} \quad (10)$$

Onde:

ϵ_{conc} é deformação específica no concreto;

$\epsilon_{supGFRP}$ é deformação específica no bordo superior do perfil de GFRP;

y é a altura da linha neutra;

e é a espessura do perfil de GFRP.

$$\sigma_{conc} = \frac{M \cdot y}{I} \quad (11)$$

onde:

σ_{conc} é a tensão no concreto;

M é momento fletor;

y é a altura da linha neutra;

I é o momento de inércia da seção homogênea equivalente de concreto mostrada na Figura 17.

Verifica-se que as tensões calculadas se aproximaram das tensões resistentes de compressão obtidas nos ensaios dos corpos de prova cilíndricos. As tensões médias de tração nos tubos de GFRP das vigas híbridas corresponderam de 23,72 % a 41,82 % da tensão média obtida no ensaio de tração de tiras do perfil de GFRP, Tabela 2.

Conforme relatado anteriormente, a ruptura do perfil de GFRP de todas as vigas híbridas ocorreu por cisalhamento do concreto, o que se confirma por meio do cálculo da parcela da força cisalhante suportada apenas pelo concreto, V_c , pela equação [12] para cada percentual volumétrico de fibras. No cálculo considerou-se f_{ctd} como sendo 70% de f_{ctm} (Tabela 4) obtido dos ensaios das vigas de concreto apresentados anteriormente. Os valores de f_{ctd} e V_c são apresentados na Tabela 8.

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (12)$$

onde:

V_c é força de cisalhamento

b_w é a largura de concreto das vigas híbridas;

d é a altura de concreto.

Pode-se perceber que as forças cortantes das vigas híbridas, correspondentes a $P_{rup}/2$ (Tabela 5) obtidas nos ensaios em laboratório, ficaram bem próximas da parcela da força cisalhante suportada apenas pelo concreto, ratificando a ruptura da viga por cisalhamento.

Tabela 9

Peso específico e massa estimada nos protótipos de dormente

% de fibras	Vigas	$\gamma_{médio}$ (kN/m³)	Protótipo	
			Massa (kg)	Massa média (kg)
0	MODRED2	21,6	246,19	247,0
	MODRED3		248,76	-
1 - 25 mm	MODRED3	21,4	246,92	245,0
	MODRED4		241,77	-
2,5 - 25 mm	MODRED6	20,1	228,16	230,5
	MODRED7		223,74	-
1 - 35mm	MODRED3	19,4	221,90	221,9

Tabela 10

Cargas de ruptura estimadas nos protótipos de dormente

% de fibras	Vigas	Protótipo	
		P_{rup} (kN)	$P_{méd rup}$ (kN)
0	MODRED2	255,82	257,17
	MODRED3	258,52	
1 - 25 mm	MODRED3	261,95	259,63
	MODRED4	257,31	
2,5 - 25 mm	MODRED6	271,40	281,03
	MODRED7	290,65	
1 - 35mm	MODRED3	274,37	-

Tabela 11

Flechas de ruptura obtidas nos protótipos de dormente

% de fibras	Vigas	Protótipo		$\frac{L}{\delta}$
		δ_{rup} (mm)	$\delta_{méd rup}$ (mm)	
0	MODRED2	15,92	16,34	L/98
	MODRED3	16,76		
1 - 25 mm	MODRED3	18,93	19,45	L/82
	MODRED4	19,96		
2,5 - 25 mm	MODRED6	19,11	19,60	L/82
	MODRED7	20,09		
1 - 35mm	MODRED3	31,36	-	L/51

4.2 Resultado no protótipo

Utilizando a Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos Carneiro [14] Teixeira [15] e considerando os resultados dos ensaios dos modelos reduzidos, pode-se estimar os valores de carga e flecha de ruptura e massas dos dormentes em verdadeira grandeza, que são apresentadas nas Tabelas 9, 10 e 11.

Verifica-se que o aumento do volume de fibras no dormente reduziu a massa do mesmo. Os dormentes com 1% de fibras de 25 mm, 2,5% de fibras de 25 mm e 1% de fibras de 35 mm de comprimento ficaram 0,81%, 6,68% e 10,16% mais leves que os dormentes sem fibras. Comparando com o dormente de concreto protendido, os dormentes híbridos eles apresentaram uma redução de peso de 36,7%, 37,3%, 41,1% e 43,1%, para sem fibras, 1% de fibras de 25 mm, 2,5% de fibras de 25 mm e 1% de fibras de 35 mm, respectivamente.

As cargas de ruptura estimadas no protótipo foram superiores à carga de ruptura de 120 kN obtidas por Bastos [2] nos ensaios de momento negativo no centro do dormente de concreto protendido. Os valores foram 114,3%, 116,4%, 134,2% e 128,6% superiores à carga de ruptura do dormente protendido, respectivamente, nos

dormentes híbridos sem fibras, com 1% de fibras de 25 mm de comprimento, com 2,5% de fibras de 25 mm de comprimento e 1% de fibras de 35 mm de comprimento. Isto ocorreu mesmo sendo o momento de inércia do dormente híbrido proposto correspondente a 41,6% do momento de inércia do dormente em concreto protendido usual, cuja seção transversal no centro do dormente é apresentada na Figura 18. As cargas de ruptura no protótipo foram estimadas subtraindo-se da carga de ruptura do modelo reduzido o peso que teve que ser adicionado ao mesmo e multiplicando-se o valor obtido pelo fator de escala do carregamento aplicado. A carga adicional ao modelo reduzido foi calculada pela equação (13) e a carga de ruptura do protótipo foi calculada pela equação (14). A Tabela 12 apresenta as cargas de ruptura e adicionais do modelo reduzido e as cargas médias estimadas nos protótipos.

$$P_{ad} = 1,64 \cdot \gamma \cdot V_{med} \quad (13)$$

Onde:

γ é peso específico da viga;

V_{med} é o volume médio do protótipo.

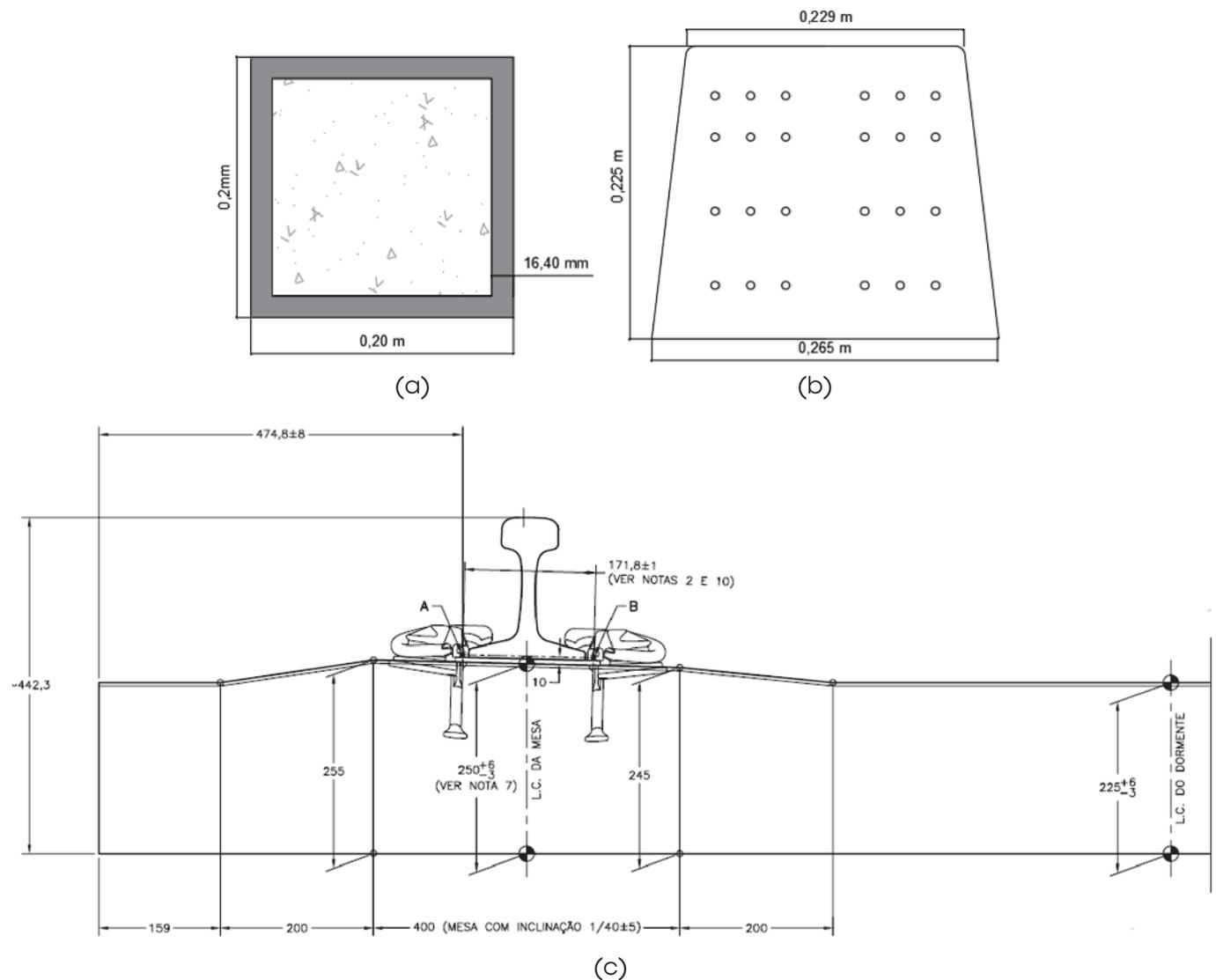


Figura 18

Seção transversal no centro do dormente: (a) híbrido, (b) de concreto protendido e (c) seção simétrica do dormente monobloco de concreto DORBRÁS [19]

Tabela 12

Cargas de ruptura e cargas adicionais dos modelos reduzidos e cargas de ruptura dos protótipos (carregamento no centro do dormente)

% de fibras	Vigas	Modelo reduzido			Protótipo	
		P_{rup} (kN)	$P_{méd\ rup}$ (kN)	Peso adicional (kN)	P_{rup} (kN)	$P_{méd\ rup}$ (kN)
0	MODRED2	36,92	37,12	0,215	255,82	257,17
	MODRED3	37,31		0,218	258,52	
1 (25 mm)	MODRED3	37,80	37,46	0,216	261,95	259,63
	MODRED4	37,13		0,211	257,31	
2,5 (25 mm)	MODRED6	39,14	40,52	0,199	271,40	281,03
	MODRED7	41,90		0,197	290,65	
1 (35 mm)	MODRED3	39,56	39,56	0,194	274,37	274,37

$$P_{rup\ prot} = (P_{rup\ mod} - P_{ad}) \cdot 2,64^2 \quad (14)$$

Onde:

$P_{rup\ mod}$ é a carga de ruptura do modelo reduzido;

P_{ad} é a carga adicional do modelo reduzido.

Porém, deve-se ressaltar que as dimensões da seção transversal do dormente híbrido proposto (200 mm x 200 mm) são inferiores às do dormente em concreto protendido usual (225 mm x 265 mm x 250 mm - base menor x base maior x altura).

As flechas de ruptura médias estimadas nos protótipos de dormente variaram de L/51 a L/82. Esses valores foram inferiores ao valor de L/41 obtido por Muttashar [7], indicando um bom desempenho do dormente híbrido proposto.

5. Conclusão

A adição de fibras ao concreto pouco aumentou a carga de ruptura das vigas e possibilitou maiores tensões de tração no bordo inferior do tubo de GFRP, sugerindo uma maior deformação de tração do concreto com fibras em relação ao concreto sem fibras até a ruptura.

A adição de fibras de poliolefina também contribuiu com a diminuição das larguras da fissuras nos concretos com 2,5% em volume de fibras de 25 mm de comprimento e 1% em volume de fibras de 35 mm de comprimento.

Nos ensaios com carregamento no centro do dormente, a ruptura de todas as vigas híbridas ocorreu no bordo inferior devida à ruptura do concreto por cisalhamento seguida pela ruptura do perfil de GFRP paralelamente às fibras. Em nenhum dos ensaios ocorreu a ruptura do concreto comprimido.

Os valores de flecha no dormente proposto variaram de L/101 a L/51, tendo sido ligeiramente inferiores aos valores obtidos por Gibson [5] e se aproximando dos valores obtidos para dormentes de madeira, conforme mencionado por este mesmo autor.

Os dormentes propostos com 1% de fibras de 25 mm, 2,5% de fibras de 25 mm e 1% de fibras de 35 mm de comprimento ficaram 0,81%, 6,68% e 10,16% mais leves que os dormentes sem fibras, respectivamente. As cargas de ruptura média dos dormentes híbridos foram 114,3%, 116,4%, 134,2% e 128,6% superiores à carga de ruptura do dormente protendido, respectivamente, para os dormentes híbridos sem fibras, com 1% de fibras de 25 mm de

comprimento e com 2,5% de fibras de 25 mm de comprimento, nos ensaios de momento negativo no centro do dormente.

Por fim, pode-se concluir que os desempenhos dos dormentes propostos foram bastante satisfatórios em termos de resistência e peso, comparando-os com dormentes em concreto protendido, sendo uma alternativa viável tecnicamente. Como recomendação para trabalhos os autores sugerem a realização de ensaios de fadiga e ensaios em um dormente na escala do protótipo.

6. Referências bibliográficas

- [1] PLANETA FERROVIA - Bitolas Ferroviárias, 2014. Available in: <http://planetaferrovia.blogspot.com/2014/01/bitolas-ferrovias.html>, Access in July 2018.
- [2] BASTOS, S, S, Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçado com fibras de aço, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 1999.
- [3] TRINDADE, E. J. Análise sobre a utilização de dormentes de concreto como solução alternativa para a via permanente na MRS Logística S. A. Trabalho Final de Curso, Programa de Especialização de Transporte Ferroviário, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- [4] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT, PIM - Procedimento de Inspeção de Material, Dormente de Aço para Via Férrea. Available in: www.dnit.gov.br/...e...para.../PIM%20016%20-%20Dormente%20de%20Aço.pdf, acesso em abril de 2018.
- [5] GIBSON, R. F., Principles of Composite Material Mechanics, Ed, McGraw-Hill, 1994.
- [6] FERDOUS, W., KHENNANE, A., KAYALI, O., Hybrid FRP-concrete railway sleeper, University of New South Wales, Canberra, Australia, 2013.
- [7] MUTTASHAR, M., MANOLO, A., KARUNASENA, W., LOKUGE, W., Influence of infill concrete strength on the flexural behaviour of pultruded GFRP square beams, Composite Structures, v. 145, p. 58-67, 2016.
- [8] MUTTASHAR, M., MANOLO, A., KARUNASENA, W., LOKUGE, W., Flexural behaviour of multi-celled GFRP composite beams with concrete infill: Experiment and theoretical analysis, Composite Structures, v. 159, p. 21-33, 2017.
- [9] GASPAR, D. H., CARNEIRO, L. A. V., TEIXEIRA, A. M. A. J.,

- Estudo de placas de concreto com fibras de aço e de poliolefinas submetidas a impacto balístico. REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, v. XXXIII, p. 57-62, 2016.
- [10] ALBERTI, M. G., ENFADAQUE, A., GÁLVEZ, J. C., AGRAWAL, V., Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures, Composite Structures, v. 140, p. 506-524, 2016.
- [11] ALBERTI, M. G., ENFADAQUE, A., GÁLVEZ, J. C., AGRAWAL, V., Fibre distribution and orientation of macro-synthetic polyolefin fibre reinforced concrete elements, Construction and Building Materials, v. 122, p. 505-517, 2016.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes. - NBR 11709, Rio de Janeiro, 2015.
- [13] AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE ASSOCIATION. Manual for Railway Engineering - Concrete Ties. - AREMA, v.1, cap 30, 2016.
- [14] CARNEIRO, F. L., Análise dimensional e teoria das semelhanças e dos modelos físicos, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 256p, 1996.
- [15] TEIXEIRA, A. M. A. J., Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [16] AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis. - ASTM D297, Philadelphia, PA, 2013.
- [17] AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. - ASTM D3039/D3039M, Philadelphia, PA, 2008.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.
- [19] COMPANIA BRASILEIRA DE DORMENTES – DORBRÁS. Available in: <http://dorbras.com.br>. Acesso em agosto 2016.
- [20] MUNDO DAS TRIBOS, Dormente de Madeira. Rio de Janeiro. Available in: <http://www.mundodastribos.com/dormentes-de-madeira-precos.html> Acesso em jan de 2017.
- [21] PANDROL, Track Report, France, 1996, Available in: <http://www.pandrol.com/download/pandrol-track-report-1996/>. Acesso em: maio de 2017.