

Tabuleiro em material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias

Igor Berta Pitz^a, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira^b, Luiz Antônio Vieira Carneiro^c

^aPrograma de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, igor.pitz@eb.mil.br

^bPrograma de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, anam@ime.eb.br

^cPrograma de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, carneiro@ime.eb.br

RESUMO: O tabuleiro é o componente com maior desgaste em pontes temporárias. O interesse pelo uso de materiais compósitos na engenharia é crescente mundialmente, sendo o de fibra de vidro e resina (GFRP) o com melhor custo benefício. Esta pesquisa, tem por objetivo avaliar, experimentalmente, um tabuleiro em GFRP para aplicação na ponte Bailey. Os painéis avaliados do tabuleiro foram fabricados por pultrusão e laminação manual. O programa experimental consistiu em ensaios de caracterização dos materiais componentes do painel, ensaios de flexão até a ruptura e de fadiga na flexão. A carga-tipo adotada foi correspondente à roda da viatura Astros 2020. Os resultados dos ensaios indicaram elevada resistência à flexão dos tabuleiros, porém grande deformabilidade e baixa resistência ao cisalhamento, esperados para este tipo de material. Os painéis atendem aos limites de flecha e resistência para veículos com carga de serviço de até 25 kN por roda.

ABSTRACT: Decks suffer the greatest deterioration among the various components of a bridge. The interest in using composite materials in engineering applications is increasing worldwide, and Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) offers the best cost-benefit ratio. The aim of this research is to evaluate experimentally the performance of GFRP deck for application in a Bailey bridge. The tested deck panels were manufactured by pultrusion and manual lamination. The experimental program consisted in obtaining physical and mechanical properties of the panels' materials and the bending and fatigue behavior of the panels. The load applied corresponded to the wheel load of an Astros 2020 vehicle. The bending tests revealed that the decks present high bending resistance, great deformability, and low resistance to shear. The panels meet the limit deflection and resistance required for vehicles with service loads up to 25 kN per wheel.

PALAVRAS-CHAVE: Tabuleiro. GFRP. Ponte Bailey.

KEYWORDS: Deck. GFRP. Bailey bridge.

1. Introdução

As pontes temporárias são úteis à sociedade no caso de enchentes e colapsos de pontes e para vencer obstáculos no terreno ou em operações militares. Estas pontes, geralmente, são fabricadas com materiais metálicos, principalmente, aço e alumínio, tendo elevado peso próprio e ficando expostas à corrosão, no caso do aço, o que provoca deterioração prematura de seus componentes. A estrutura de rolamento do tabuleiro de pontes, formada por longarinas metálicas e estrados de aço ou madeira, é o componente com maior desgaste por permanecer exposto ao tempo, ou ainda por estar em contato direto com os veículos que ali trafegam [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Nos Estados Unidos da América, por exemplo, existem mais de 600.000 pontes, nas quais em cerca de 25% delas os tabuleiros são estruturalmente deficientes ou obsoletos [7, 9].

O polímero reforçado com fibras – FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), é um material compósito formado por um reforço em fibras embebido em uma matriz polimérica. As fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono e aramida. As resinas mais comuns são as de poliéster e éster vinílico. O polímero reforçado com fibras de carbono – CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) apresenta maior módulo de elasticidade e maior resistência, porém tem um custo mais elevado. O polímero reforçado com fibras de vidro – GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) apresenta resistência mecânica compatível com as do aço, menor custo, possuindo, portanto, uma maior tendência de uso entre os materiais compósitos para projetos de estrutura na engenharia civil [1].

Suas principais vantagens são: imunidade à corrosão, elevada resistência mecânica em relação ao baixo peso próprio, resistência à fadiga e possibilidade de serem moldados em diferentes formatos [2, 3, 4, 5, 6]. Apesar dos custos iniciais mais elevados em

relação ao de outros materiais convencionais usados na engenharia civil, como concreto e o aço, características dos materiais compósitos como a imunidade à corrosão e menor peso próprio reduzem os custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura [7, 8, 9, 10]. Os materiais compósitos de fibra de vidro podem apresentar desgaste prematuro quando submetidos a raios ultravioleta de forma direta [1, 2, 3, 10].

A primeira ponte inteiramente de GFRP, que se tem notícia, foi construída em 1982 na China [6,11]. Nas últimas décadas, o uso de tabuleiros de GFRP na reabilitação ou construção de pontes aumentou consideravelmente [2, 3, 9, 10, 11]. Nos Estados Unidos da América a pesquisa com este tipo de material iniciou-se em 1980 e, em 1995, passou-se a estudar a aplicação em pontes [9, 12]. Na Europa, desde o início dos anos 2000, houve um grande interesse pela utilização de FRP no piso de rolamento de pontes novas ou já existentes [3]. A Coreia do Sul iniciou pesquisas, financiadas pelo governo, em 2000 [4, 10]. Nestas regiões, há muitas pontes em concreto armado, que sofrem oxidação pelo uso frequente do sal para o degelo das pistas durante o inverno.

Os tabuleiros em FRP são de fácil instalação e apresentam elevada energia de absorção de impacto, garantindo uma vida útil próxima aos 50 ou 60 anos, muito superior aos 15 a 20 anos previstos para as estruturas de concreto nessas regiões [3, 10]. O transporte e manuseio dos tabuleiros é um ponto a ser observado, haja vista a possibilidade de ocorrerem danos ao material durante a realização desses procedimentos [1, 2, 10, 13, 16].

Os tabuleiros de GFRP podem ser classificados em tipo sanduíche ou pultrudado. O primeiro consiste de duas placas de aço, alumínio ou materiais compósitos, “recheadas” com um material mais leve, como espuma (policloreto de vinil, poliuretano e outros polímeros orgânicos), madeira compensada ou mesmo material compósito. O segundo compreende perfis fabricados pelo processo de pultrusão, com formatos triangulares, retangulares, trapezoidais ou hexagonais. [2, 13, 14]. O tabuleiro pode ser fabricado como uma peça única ou os perfis podem ser colados ou parafusados entre si [6, 14]. Tabuleiros híbridos, fabricados com GFRP e aço, por exemplo, já foram estudados [4, 15].

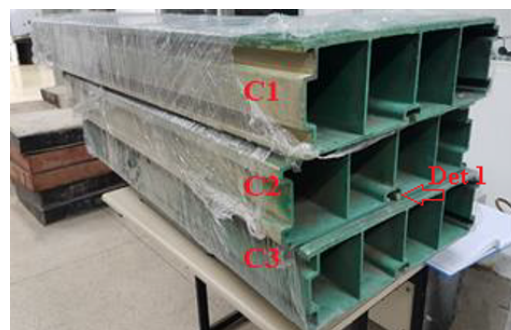


Fig. 1 – Painéis ensaiados nesta pesquisa. Fonte: [1].

Na literatura pesquisada, os autores realizaram ensaios de flexão estática [2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 17] e ensaios dinâmicos de flexão [2, 4, 7, 14, 17]. As falhas mais comumente observadas pelos autores nos tabuleiros de GFRP foram descolamento dos perfis e delaminação do material [1, 2, 4, 6, 7, 10, 13, 18]. Resultados experimentais confirmam que a flecha e a resistência ao cisalhamento são os parâmetros mais críticos em tabuleiros de GFRP [4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 16].

Uma das primeiras utilizações de tabuleiros em materiais compósitos para aplicações militares foi na *Composite Army Bridge* em 1999 [19, 20]. O Exército Brasileiro estabeleceu como um de seus objetivos estratégicos o desenvolvimento de uma ponte desmontável de emprego dual. As pontes fabricadas no Brasil ainda são das décadas de 1940 e 1970, sendo, principalmente, de aço e, por isso, pesadas e suscetíveis à corrosão.

As pesquisas disponíveis na literatura sobre tabuleiros de ponte em materiais compósitos apresentam informações limitadas. Não existe exploração científica acerca do uso de tabuleiros de materiais compósitos ou da fabricação de componentes para esta finalidade no Brasil. Então, esta é uma pesquisa pioneira nacionalmente sobre o assunto, que tem como objetivo principal avaliar o comportamento experimental de um tabuleiro de polímero reforçado com fibra de vidro e resina (GFRP) em substituição às longarinas metálicas e estrados de madeira de pontes Bailey.

2. Painel de tabuleiro proposto e ponte Bailey

Os painéis avaliados nesta pesquisa foram fabricados pela empresa italiana Top Glass, cedidos para a pesquisa pela empresa Cogumelo, localizada na cidade do Rio de Janeiro– RJ. Estes painéis são inteiramente pultrudados, formando uma única peça (**figura 1**), e foram fabricados com resina de poliéster e fibras de vidro tipo “E”.

A aplicação original deste painel de tabuleiro era para o emprego como heliponto, sendo os painéis encaixados um no outro e parafusados (**v. det 1 na figura 1**) no encaixe inferior abaixo da alma interna central. Para a presente pesquisa objetivou-se a utilização dos painéis para comporem o tabuleiro de pontes temporárias, com largura variável, de acordo com a necessidade.

As medidas dos painéis são de 500 mm de largura e 153 mm de altura. Foram testados dois painéis com 1280 mm de comprimento, um com 1600 mm de comprimento e um com 960 mm de comprimento. Os três painéis mais longos foram ensaiados à flexão e o painel mais curto foi utilizado na confecção das amostras utilizadas nos ensaios de caracterização física e mecânica do material. As dimensões do painel são apresentadas na **figura 2**. A mesa superior possui uma camada de 3 mm de material antiderrapante.

O Exército Brasileiro possui diversas equipagens de pontes, com destaque para a *Logistic Support Bridge*, M4T6 e Bailey [1]. O tabuleiro em estudo se aplica às pontes temporárias como a ponte Bailey, e tem a função de substituir as longarinas metálicas e os estrados de madeira desta ponte, conforme apresentado na **figura 3**.

A ponte Bailey teve origem ainda na Segunda Guerra Mundial, podendo ser montada de forma biapoçada ou sobre suportes flutuantes. Os painéis que compõem as vigas longitudinais são treliçados, podendo a estrutura ser montada por até três linhas com até três andares de altura cada. Assim, as pontes podem ser montadas como simples-simples até tripla-tripla. A **figura 3** apresenta uma ponte dupla simples. A distância entre travessas é de 1.524 mm e a largura da sua mesa superior,

que serve de apoio para as longarinas metálicas do tabuleiro, é de 114 mm. A ponte é desmontável, projetada para uso militar e para vencer vãos de até 64 metros, com capacidade de até 333 kN de carga [21, 22, 23].

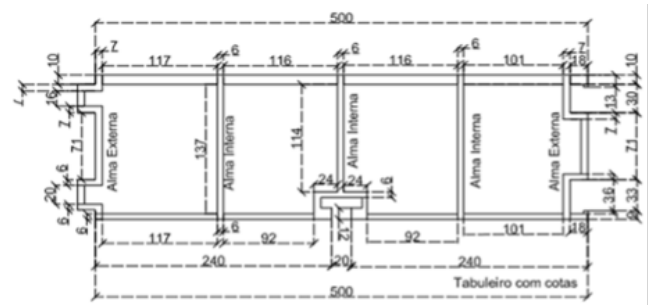


Fig. 2 – Geometria dos painéis ensaiados (cotas em mm). Fonte: [1].

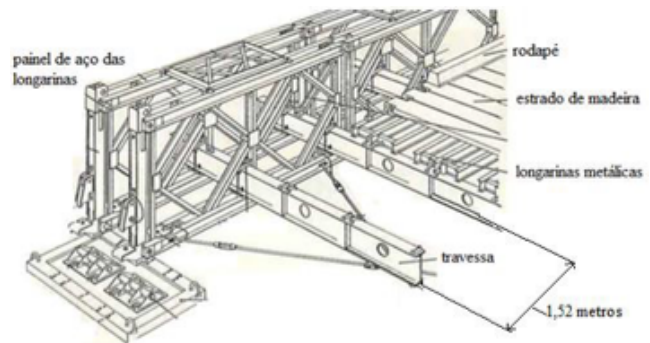


Fig. 3 – Principais elementos constituintes

A **figura 4** mostra uma ponte Bailey apoiada em uniflotes. Sua construção não exige equipamentos especiais ou pesados. Seu conhecimento e montagem fazem parte do currículo escolar de todos os militares de carreira (oficiais e sargentos) da arma de Engenharia. O tabuleiro da ponte sofre um desgaste elevado, devido ao apodrecimento dos pranchões de madeira e consequente corrosão dos painéis de tabuleiro metálicos [1, 21-23].

As Forças Armadas Brasileiras, possuem diversas viaturas militares, sendo a Astros 2020 a mais pesada sobre rodas, e que será adotada no presente estudo.

A viatura é composta por seis rodas, sendo 48,9 kN a carga máxima por roda e 326 mm x 345 mm a área de contato de suas rodas com o solo, sendo essa a área para realização do ensaio de flexão

3. Programa experimental

O programa experimental constou de ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais componentes dos painéis, ensaios de flexão estáticos e de fadiga na flexão dos painéis.

3.1 Ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas



Fig. 4 – Ponte Bailey (apoiada em uníflotes). Fonte: [23].

Foram realizados os seguintes ensaios: peso específico [24], percentual de fibras [24], tração [25, 26], cisalhamento, [27, 28] compressão longitudinal às fibras [29] e compressão transversal às fibras [29], conforme a *American Society of Testing and Materials (ASTM)* e *International Organisation for Standardization (ISO)*, pois não existem normas similares estabelecidas pela ABNT para os materiais compósitos.

As amostras foram divididas em três grupos: mesa superior, mesa inferior e alma interna. A **tabela 1** apresenta o resumo dos resultados de percentual de fibras totais, percentual de fibras longas, peso específico (γ) módulo de elasticidade longitudinal na tração (E_t), coeficiente de Poisson na tração (ν_t), resistência à tração (f_t), resistência ao cisalhamento transversal às fibras (σ_{23}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (σ_{12}), resistência à compressão longitudinal às fibras (f_{cl}), resistência à compressão transversal às fibras (f_{ct}), módulo de elasticidade na compressão longitudinal às fibras (E_{cl}) e coeficiente

de Poisson na compressão longitudinal às fibras (ν_{cl}). As amostras de tabuleiro da empresa C foram fabricadas a partir de uma seção transversal do painel com 960 mm de comprimento, conforme mostrado na **figura 5**.

Da análise da **tabela 1**, temos que o percentual de fibras longas é elevado em relação ao de fibras totais nas almas e nas mesas. Os parâmetros de γ , E_t , ν_t , f_t , σ_{23} , σ_{12} e f_{cl} são inferiores aos encontrados em [1, 5, 13], o que evidencia uma qualidade inferior do material analisado.

3.2 Metodologia dos ensaios de flexão

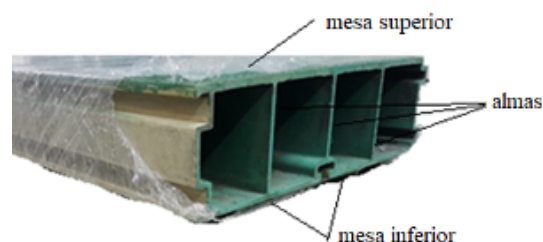


Fig. 5 – Divisão dos grupos das amostras do painel ensaiado. Fonte: [1].

Os painéis apresentados na **figura 1** foram apoiados em perfis “I” metálicos em uma largura de 114 mm, simulando as travessas da ponte Bailey (**v. figura. 3**). As **figuras 6 e 7** apresentam o esquema do ensaio realizado. Os perfis “I” foram fixados em dois blocos de concreto armado (350 mm x 350 mm x 1000 mm) por meio de parafusos. O painel C1 foi ensaiado com vão de 1.450 mm e os painéis C2 e C3 com vão de 1.220 mm. A carga foi aplicada centralizada no painel, em uma área de 345 mm x 326 mm. Utilizou-se uma chapa de aço com espessura de 25,4 mm sobre uma placa de neoprene de 9 mm de espessura.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME. Foi utilizado um atuador hidráulico da marca MTS, com capacidade de 1000 kN. Para aquisição dos dados de deformação e deslocamento, foi utilizado o sistema de aquisição de dados modelo ADS 2000, da marca Lynx, conectado a um computador.

Tab. 1 – Propriedades físicas e mecânicas do material composto dos tabuleiros.

Perfil	Alma	Mesa Superior	Mesa Inferior
% de fibras totais	59,0% ± 0,9%	49,2% ± 1,3%	62,1% ± 1,8%
% de fibras longas	52,2% ± 1,2%	45,5% ± 1,4%	54,8% ± 1,7%
γ (N/m ³)	23,6	19,6	21,4
E_t (GPa)	26,4	28,7	28,3
ν_t	0,28	0,29	0,28
f_t (MPa)	384,5	389,8	345,7
σ_{23} (MPa)	22,1	15,0	22,0
σ_{12} (MPa)	9,2	5,3	8,6
f_{ct} (MPa)	325,5	281,1	248,7

Os painéis foram instrumentados com quatro extensômetros elétricos de resistência no sentido longitudinal do painel e dois LVDT, todos na parte inferior do painel. A Fig. 8 mostra a disposição dos extensômetros e LVDT na parte inferior do tabuleiro e a **figura 9** mostra o painel instrumentado sobre os apoios.

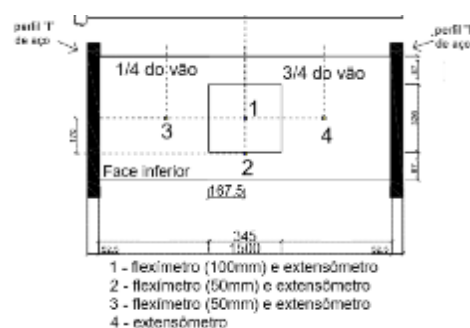


Fig. 8 – Instrumentação dos painéis. Fonte: [1].

Haja vista não existir uma normatização para a realização de ensaios em tabuleiros de GFRP, procurou-se embasar o ensaio na literatura estudada [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 30, 31], com adaptações para as condições e objetivos desta pesquisa. Desta maneira, optou-se por um carregamento a uma velocidade constante de 5 kN/min, e dividido em patamares de 15 kN, 25 kN e 35 kN. Quando o carregamento atingia um

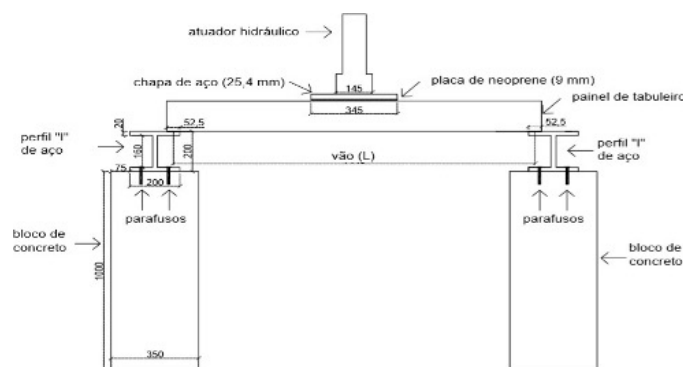


Fig. 6 – Esquema de ensaio adotado (cotas em mm). Fonte: [1].

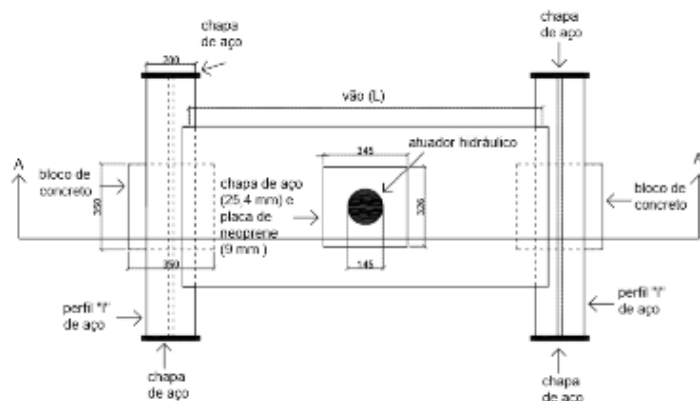


Fig. 7 – Vista superior do esquema de ensaio adotado. (cotas em mm). Fonte: [1].

destes patamares, a carga da amostra era mantida constante e o painel era inspecionado antes da continuação do ensaio. Após o último patamar (35 kN), as amostras foram carregadas até a ruptura.

4. Resultados e análise dos ensaios de flexão

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios estáticos e de fadiga.

4.1 Ensaios estáticos de flexão

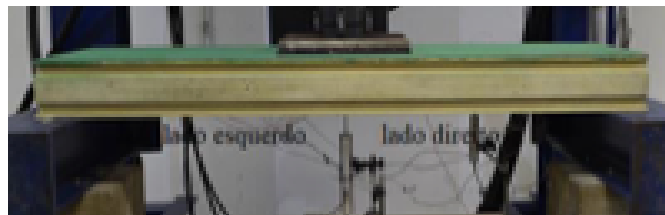


Fig. 9 – Visão frontal do ensaio estático. Fonte: [1].

Os painéis C1 e C2 foram submetidos a ensaios estáticos de flexão em vãos de, respectivamente, 1.450 mm e 1.220 mm. Ambos os painéis suportaram bem todos os três patamares de carga aplicados, não apresentando nenhum sinal de dano visível ou audível. Ao atingirem a carga de 48,9 kN, correspondente à carga por roda da viatura Astros 2020, a flecha na posição 1 foi de, aproximadamente, 8,86 mm (L/157) para C1 e 7,22



(a)



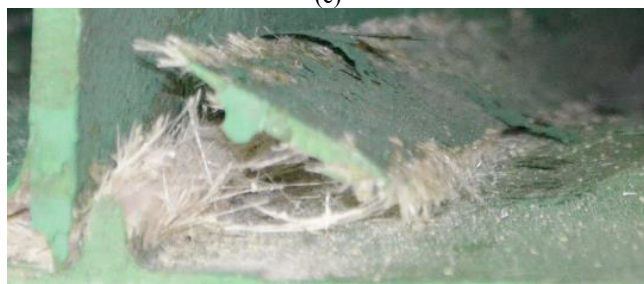
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 10 – Painéis após a ruptura: (a) painel C1; (b) painel C2; (c) cisalhamento da alma interna e (d) da ligação para o parafuso na alma interna central; (e) delaminação da mesa inferior; e (f) cisalhamento da alma externa. Fonte: [1].

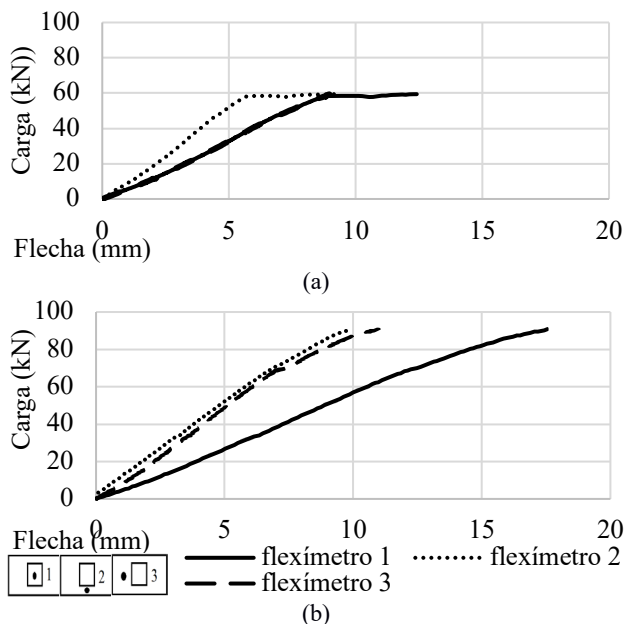


Fig. 11 – Curvas carga x flecha dos painéis (a) C2 e (b) C1. Fonte: [1].

mm (L/169) para C2. A **figura 10** apresenta os painéis C1 e C2 após a ruptura.

A partir da carga de 60 kN começou-se a ouvir estalos com o painel C1. Primeiramente, houve o aparecimento de um corte cisalhamento na ligação para o parafuso na alma interna central. Este efeito foi aumentando até a ruptura do tabuleiro, que ocorreu ante a carga de 90,8 kN, com uma flecha de aproximadamente 17,58 mm (L/82). A ruptura caracterizou-se pelo cisalhamento da primeira alma interna próxima a mesa inferior e da ligação para o parafuso na alma interna central e pela delaminação da mesa inferior próxima a terceira alma.

Já no ensaio com o painel C2, os primeiros danos tornam-se audíveis ante a carga de 50 kN, embora não fosse observado nenhum dano aparente. A ruptura ocorreu ante a carga de 59,4 kN, com uma flecha no vão central de 12,41 mm (L/112). A ruptura caracterizou-se pelo cisalhamento das três almas internas, inclusive da ligação para o parafuso na alma interna central. Observa-se que houve distorção da seção até a ruptura, causada por falha da alma por flexão transversal.

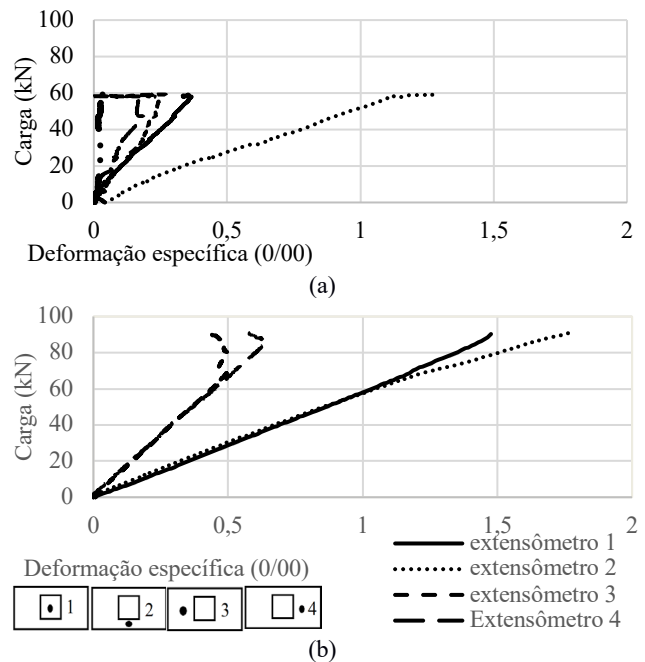


Fig. 12 – Curvas carga x deformação dos painéis (a) C2 e (b) C1. Fonte: [1].

A **tabela 2** apresenta as cargas, flechas e deformações de ruptura dos painéis C1 e C2. As posições 1, 2, 3 e 4 correspondem às mesmas apresentadas na **figura 9**.

A **figura 11** apresenta as curvas carga x flecha dos painéis. Verifica-se uma ligeira perda de rigidez do painel C1 a partir da carga de 68,9 kN. O painel C2, pouco antes da ruptura, ante a carga de 58,4 kN, os LVDT 1 e 2 saltaram de 8,8 mm e 5,73 mm para, respectivamente, 11,0 mm e 7,7 mm, indicando a ocorrência de dano no painel. A carga de ruptura foi de 59,4 kN. As curvas de carga x flecha dos painéis mostram que a alma central absorve mais carregamento que as demais.

A **figura 12** apresenta as curvas carga x deformação específica dos painéis C1 e C2. O painel C1 apresentou comportamento linear até a carga de 68,9 kN, quando os extensômetros 2 e 3 sofrem mudança de curso, indicando a ocorrência de danos no material e ratificando a perda de rigidez do tabuleiro já verificada nas curvas de carga x deslocamento. Ante a carga de 86,3 kN, o extensômetro 4 sofreu alteração de curso, indicando séria ocorrência de falha na estrutura.

4.2 Ensaio de Fadiga na Flexão

O ensaio de fadiga na flexão foi realizado no painel C3 com vão de 1.220 mm. A frequência adotada foi de 3 Hz, até 2,11 milhões de ciclos de carregamento. A carga máxima de ensaio foi definida a partir do desempenho dos painéis C1 e C2, considerando-se a flecha limite em serviço de $L/250$. No painel C1, esta carga correspondeu a 30,3 kN, e no painel C2 correspondeu a 29,9 kN. Assim, a carga média dos ensaios foi majorada em 10%, resultando em 33 kN, que correspondeu a 36% da carga de ruptura do painel C1 e 55% da carga de ruptura do painel C2. A força mínima aplicada foi de 10% da força máxima (3,3 kN). O carregamento aplicado foi do tipo senoidal.

Amos- tra	P_{rup} (kN)	Vão (m)	Flecha _{rup} (mm)			Deformação(‰)			
			1	2	3	1	2	3	4
C1	90,8	1,45	17,6	9,9	11,0	15	18	4	6
C2	59,4	1,22	12,4	9,2	-	4	13	3	2

Tab. 2 – Cargas, flechas e deformações de ruptura.

Os LVDT foram retirados no ciclo de 113.313 por receio de danos no equipamento devido à carga cíclica e a uma possível ruptura do painel. A Fig. 13 apresenta as curvas carga x flecha do LVDT na posição 1 (v. Fig. 8). Da análise das curvas, verifica-se que não houve perda de rigidez do painel C3 devido ao ensaio de fadiga até o ciclo 113.313.

Os extensômetros não apresentaram nenhum aumento considerável de deformação ao longo do ensaio. O painel foi inspecionado durante o ensaio e nenhum sinal de dano visível foi verificado. Uma inspeção detalhada foi realizada ao final do ensaio, e também nenhum dano foi encontrado.

Após a realização do ensaio de fadiga, foi realizado o ensaio de ruptura do painel à flexão. Neste ensaio foram utilizados LVDT nas posições 1 e 2 (v. figura 8). Os patamares de carga adotados foram os mesmos dos demais painéis. O painel suportou bem todos os patamares, não mostrando nenhum sinal de dano visível e não tendo sido ouvido nenhum estalo do material. Na carga tipo de 48,9 kN, a flecha registrada

foi de, aproximadamente, 6,36 mm, correspondendo a $L/192$, tendo sido 11,7% menor do que a flecha obtida no ensaio do painel C2 para o mesmo vão e carga.

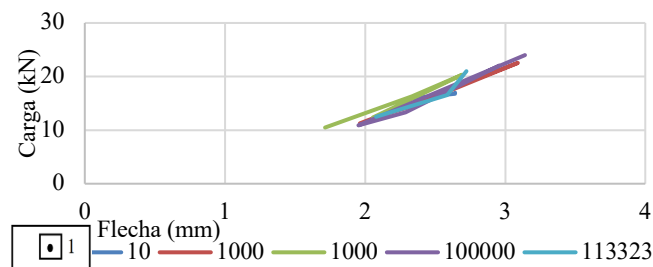


Fig. 13 – Curvas carga x flecha do painel C3 com o LVDT na posição 1. Fonte: [1].

Os LVDT foram mantidos até o fim do ensaio. A partir da carga de 50 kN começaram-se a ouvir estalos do material, mas sem danos visíveis no mesmo. A carga de ruptura foi de 77,8 kN, valor superior ao obtido no ensaio do painel C2. A flecha registrada foi de, aproximadamente, 10,06 mm, valor inferior ao obtido no painel C2.

A figura 14 mostra o painel após a realização do ensaio. A segunda e quarta almas internas romperam por cisalhamento, e houve delaminação da mesa inferior próxima a elas. Também pode-se observar que as rupturas por cisalhamento das almas externas, além da ruptura do engate do parafuso, abaixo da alma interna intermediária.

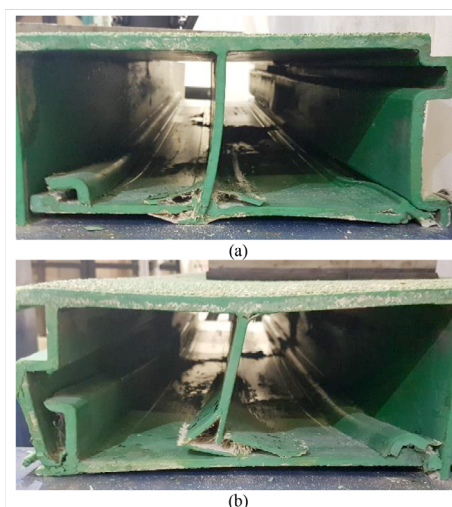


Fig. 14 – Painel C3 após a ruptura: (a) vista das primeira e segunda células, (b) vista das terceira e quarta células.

A **figura 15** compara as curvas carga x flecha dos LVDT 1 e 2 e carga x deformação do extensômetro 2 obtidas nos painéis C2 e C3. Verifica-se que as curvas carga x flecha e carga x deformação do painel C3 possuem uma inclinação maior que as do painel C2, indicando comportamento mais rígido do painel C3.

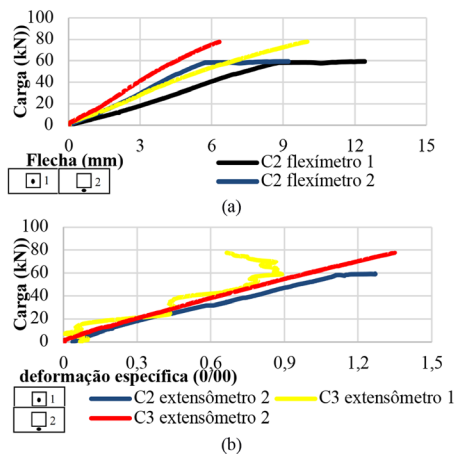


Fig. 15 – Curvas (a) carga x flecha e (b) carga x deformação, referentes a comparação entre os ensaios estáticos dos painéis C2 e C3.

Pela comparação entre os painéis C2 e C3, pode-se concluir que o desempenho do painel C3 foi superior, indicando que a carga máxima no ensaio de fadiga pode ser aumentada, haja vista que nenhum dano foi observado no painel.

4.3 Análise dos resultados

Os resultados experimentais obtidos, apesar da pequena quantidade de amostras, permitiram algumas análises interessantes. Os painéis suportaram a carga da roda da viatura Astros 2020 (48,9 kN), embora não se recomende a adoção destes painéis para a passagem deste veículo, haja vista que a razão entre a carga da roda e a de ruptura (59,4 kN) no painel C2 foi 1,21, menor do que o padrão de 1,39 recomendado pelo EUROCOMP [30], conforme se verifica na **tabela 3**.

A flecha recomendada pela FHWA [31] é de $L/800$. Este parâmetro considera aspectos como o conforto do usuário e a velocidade de tráfego, sendo, portanto, elevado para os padrões de pontes temporárias, cujas principais finalidades seriam o emprego militar ou

humanitário, situações em que o conforto do usuário e a velocidade de tráfego são secundárias.

O EUROCOMP [30] recomenda uma flecha máxima de $L/300$ para carga do veículo considerada como de curta duração. Desprezou-se o peso próprio do painel, pois ele corresponde a menos de 1% do peso do veículo. As flechas obtidas nos painéis C1 e C2 foram maiores que $L/300$ (**v. tabela 3**) indicando a grande flexibilidade do material. As cargas correspondentes a flecha de $L/300$ foram 25,6 e 25,5 kN, respectivamente, para os painéis C1 e C2.

O ensaio de fadiga mostrou que o tabuleiro de GFRP suportou os 2,11 milhões de ciclos de carga sem sofrer danos, corroborando resultados já destacados na literatura [2, 4, 7, 14, 17]. A curva carga x flecha do painel C3 se aproximou da carga obtida para o painel C1.

O painel C3 teve um desempenho superior, mesmo após o ensaio de fadiga, em relação à amostra C2, que foi ensaiada apenas estaticamente, indicando que o material apresenta boa resistência à fadiga.

Tab. 3 – Resultados dos ensaios estáticos dos painéis C1 e C2.

Painel	C1	C2
Vão (mm)	1.450	1.220
P _{tip} (kN)	48,9	48,9
δ_{tip} (mm)	L/164	L/169
P _{rup} (kN)	90,8	59,4
P _{rup} / P _{tip}	1,86	1,21
Peso próprio (kg)	42,8	33,8
σ (MPa)	29,7	19,4
FS (P _{rup} /P _{tip})	1,9	1,2

Tab. 4 – Dimensão e peso do tabuleiro C

Dimensões (H x L) (mm)	153 x 500
Peso do painel (N)	388,3
Peso por seção (A = 12,8m ²) (N)	6628,6
Peso por m ² (N/m ²)	517,8

A utilização de LVDT durante todo o ensaio é fundamental para uma análise mais detalhada do comportamento dos tabuleiros. A utilização de extensômetros elétricos de resistência em locais internos, como as almas internas, partes internas das mesas e placas, permitiria uma melhor investigação acerca das formas de ruptura. Salienta-se que isto não

foi realizado nesta pesquisa pelo fato de as amostras estarem prontas, sendo impraticável e pouco eficaz a colocação de extensômetros nestes locais. Foi verificado que o uso de extensômetros transversais ao sentido das fibras é dispensável, uma vez que estes são submetidos a esforços quase nulos. Todavia, tal afirmação carece de maior estudo para ser conclusiva.

Todas as amostras apresentaram ruptura na parte inferior. Os painéis C apresentaram ruptura por cisalhamento das almas e delaminação da mesa inferior, ocasionada pela instabilidade da estrutura, que sofreu torção devido à pequena espessura das almas.

A **tabela 4** apresenta as dimensões do painel C. O tabuleiro da ponte Bailey apresenta uma massa total de 1262 kg. Se a ponte fosse completamente preenchida por painéis C, possuiria um peso total por seção de 665,1 kg (considerando uma área de 4.200 mm de largura por 3.048 mm de comprimento), o que corresponderia a uma redução de 47,3% em relação ao peso do tabuleiro original da ponte *Bailey*.

Embora outros aspectos tenham de ser levados em consideração, como a colocação de engates metálicos ou ainda a remoção dos engates para os painéis de tabuleiros nas travessas, pode-se concluir que os tabuleiros de GFRP permitiriam uma redução substancial no peso estrutural do tabuleiro da ponte *Bailey*.

5. Conclusões

Este trabalho propôs o emprego de um tabuleiro de GFRP para utilização em pontes temporárias. Escolheu-se a ponte *Bailey* como parâmetro de dimensões, haja vista possuir a menor distância entre travessas e ter o seu tabuleiro original de aço e madeira, bem como ser a ponte de uso militar de maior emprego dentro do Exército Brasileiro.

Os painéis C possuem um peso próprio correspondente a 0,46% da carga de ruptura do painel

C1 e 0,56% do painel C2. O painel com menor vão obteve carga de ruptura menor, o que evidencia a necessidade de mais ensaios. As tensões de tensão na flexão foram baixas na ruptura, quando comparadas com os resultados dos ensaios de tração. A ruptura caracterizou-se por instabilidade da estrutura, ocasionando em corte nos apoios e cisalhamento na alma das vigas.

O ensaio dinâmico foi realizado sem qualquer dano aparente. Foi observada uma elevada carga de ruptura após o ensaio de fadiga, caracterizando um resultado superior em relação ao ensaio de flexão estática conduzido em condições similares.

Da análise dos resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos, obteve-se que o tabuleiro C pode ser utilizado em pontes temporárias sujeitas a cargas de serviço de até 25 kN por roda. Embora todas as amostras tenham apresentado ruptura superior à carga tipo, ele não atende aos critérios de coeficiente de segurança e flecha ($L/300$) estabelecidos no EUROCOMP [30].

A rigidez dos painéis é bem inferior à da maioria dos tabuleiros apresentados na revisão bibliográfica. Estes trabalhos evidenciam os anos de pesquisa e de aperfeiçoamento da geometria dos tabuleiros, visando o aumento de resistência e rigidez e a redução de peso.

Devido a elevada deformabilidade do GFRP fabricado por pultrusão, esse parâmetro acaba sendo restritivo a carga. Por fim, os tabuleiros de GFRP estudados são de 49% a 62% mais leves do que o tabuleiro original da Ponte *Bailey*, sendo a sua utilização uma grande vantagem construtiva.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa Cogumelo pelo fornecimento dos painéis que permitiram a realização desta pesquisa e ao Exército Brasileiro pelo financiamento e fomento à pesquisa proporcionado.

Referências

- [1] PITZ, I. B. Tabuleiros de material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias. 2018. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [2] PARK, K. T. KIM, S. H., LEE, Y. H., HWANG, Y. K. Pilot test on a developed GFRP bridge deck. *Composite Structures*, Gyonggi-Do, KOR, n. 70, 2005. p.48-59.
- [3] TEIXEIRA, A. M. A. J. Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- [4] KIM, H. Y.; LEE, Y. H.; LEE, S. Y. Ultimate strength of a GFRP deck panel for temporary structures. *Composite Structures*, Gyeonggi-Do-KOR, n. 93, 2011. p. 528-537.
- [5] TOMÁS, E., SÁ, M. F., CORREIA, J. R., GOMES, A. M., SILVESTRE, N. Comportamento estrutural em flexão de painéis multicelulares pultrudidos de GFRP com aplicação em tabuleiros de pontes pedonais. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Lisboa, POR, n. 21, 2013. p. 51-62.
- [6] XIN, H., MOSALLAM, A., LIU, Y., WANG, C., ZHANG, Y. Analytical and Experimental evaluation of flexural behavior of FRP pultruded composite profiles for bridge deck structural design. *Construction and Building Materials*, California, USA, n. 150, 2017. p. 123-149.
- [7] BROWN, D. L.; BERMAN, J. W. Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks. *Journal of Bridge Engineering*, Seattle, USA, n. 15 (3) maio-junho, 2010. p. 290-301.
- [8] STANKIEWICZ, B. GFRP Deck for bridging structures. *Procedia Engineering*, Opole-POL, n. 40, 2012. p.423-427.
- [9] ZHU, J.; LOPEZ, M. M. Performance of a lightweight GFRP composite bridge deck in positive and negative bending regions. *Composite Structures*, Pennsylvania, USA, n. 113, 2014. p. 108-117.
- [10] PARK, S. Z.; HONG, K. J.; LEE, S. W. Behavior of an adhesive joint under weak-axis bending in a pultruded. *Composites: Part B*, Seul-KOR, n. 63, 2014. p.123-140.
- [11] HE, J., LIU, Y. CHEN, A., DAI, L. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck. *Construction and Building Materials*, Xangai, CHN, n. 26, 2012. p. 49-64.
- [12] BROWN, D. L.; BERMAN, J. W. Fatigue and Ultimate Testing Comparison of Two Fiber Reinforced Polymer Bridge Decks. *Structures Congress*, Seattle, USA, 2008. 7p.
- [13] VOVEZNÝ, R., ROTTER, T. GFRP bridge deck panel. *Steel Structures and Bridges*, Praga - RCH, n. 40, 2012. p. 492-497.
- [14] ARMAS, S. Y.; CASTRO, J.; KELLER, T. Energy dissipation and recovery in web-flange junctions of pultruded GFRP decks. *Composite Structures*, Lausanne-CHE, 2016. p.168-180.
- [15] JI, H. J., BYUN, J. K., LEE, C. S., SON, B. J., MA, Z. J. Structural performance of composite sandwich bridge decks with hybrid GFRP-steel core. *Composite Structures*, Seul, KOR, n. 93, 2011. p. 430-442.
- [16] ALAGUSUNDARAMOORTHY, P.; REDDY, R. V. S. Testing and evaluation of GFRP composite deck panels. *Ocean Engineering*, Madras, IND, n. 35, 2008. p. 287-293.
- [17] SÁ, M. F. GOMES, A. M., CORREIA, J. R., SILVESTRE, N. Flexural creep response of pultruded GFRP deck panels: Proposal for obtaining full-section viscoelastic moduli and creep coefficients. *Composites Part B*, Lisboa-PRT, n. 98, 2016. p. 213-224.
- [18] HING, C. L. C.; HALABE, U. B. Nondestructive Testing of GFRP Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography. *Journal of Bridging Engineering*, Arlington, USA, n. 15, 2010. p. 391-398.
- [19] KOSMATKA, J. B. Structural testing of DARPA/BIR composite army bridge treadway. *Composite Structures*, n. 4, 1999. p. 99-115.
- [20] OSEI-ANTWI, M. CASTRO, J., VASSILOPOULOS, A. P., KELLER, T. FRP- Balsa Composite Sandwich Bridge Deck with Complex Core Assembly. *Journal of Composite Construction*, Lausanne, CHE, 2013. 9p.
- [21] ESTADOS UNIDOS. FM 5-277 Bailey Bridge. Washington, EUA: Headquarters Department of the Army, 1986.
- [22] BRASIL. Exército Brasileiro. Ponte de Painéis tipo Bailey M2, 1ª Parte, Montada sobre Suportes Fixos. Manual Técnico T5-277. Brasília: EGGCF, 1ª edição, 1979.
- [23] PAOLI, P. C. Manual do Pontoneiro. Rio de Janeiro: 2009.
- [24] ASTM D297 -13. Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis, Philadelphia, EUA, 2013.
- [25] ASTM D3039/D3039M - 08. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Philadelphia, EUA, 2008.
- [26] DIN EN ISO 527-4. Determination of tensile properties of plastics Part 4: Test conditions for isotropic and

- orthotropic fibre-reinforced plastic composites. Berlin, RFA, 1997.
- [27] ASTM D2344 - 06 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, Philadelphia, EUA, 2006.
- [28] ASTM D5379M.-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, Philadelphia, EUA, 2006.
- [29] ASTM D3410/D3410M – 03.Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, Philadelphia, EUA, 2008.
- [30] EUROCOMP DESIGN CODE AND HANDBOOK. Structural Design of Polymer Composites, John L. Clarke Ed., Londres, Reino Unido, 1996.