

Pontes e passarelas em pFRP: estudo comparativo e análise de processos de montagem

Marcos Vasconcelos Diniz^a, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira^b, Michèle Schubert Pfeil^c

^aSeção de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,
marcosvdiniz@gmail.com

^bSeção de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,
anamajt@gmail.com

^cPrograma de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, mpfeil@coc.ufrj.br

RESUMO: O artigo reúne as principais informações a respeito das pontes desmontáveis existentes no Exército Brasileiro e das pontes em material compósito pultrudado de fibra e resina (pFRP) desenvolvidas ao redor do mundo. Além disso, apresenta os resultados obtidos na montagem e ensaio estático até a ruptura de uma ponte desmontável brasileira de fibra de vidro e resina (GFRP) concebida para o emprego em situações de emergência. Por fim, compara aspectos de montagem e capacidade de resistência das pontes em pFRP e as pontes tradicionais metálicas, indicando as vantagens logísticas de transporte e montagem no campo.

PALAVRAS-CHAVE: Pontes. Materiais Compósitos. pFRP. FRP. GFRP. Estruturas.

ABSTRACT: This paper presents the main information about the brazilian army's military bridges and the Pultruded Fiber Reinforced Polymer (pFRP) bridges developed around the world. Besides, presents the procedures for the assembly and static structural tests of a scaled model brazilian Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bridge, which project has been made for support emmergency situations. Lastly, it compares some assembly aspects and resistance capacity between FRP and military bridges, indicating several advantages, especially regarding transportation and mounting in the field.

KEYWORDS: Bridges. Composites Materials. pFRP. FRP. GFRP. Structures.

1. Introdução

Polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymers*) são constituídos por duas fases distintas: uma estrutura de reforço em fibras e uma matriz polimérica. As fibras, usualmente, são de carbono, aramida ou vidro, enquanto a matriz polimérica, normalmente, é de poliéster, epóxica, fenólica ou éster vinílica [1].

Há diversos processos de fabricação dos polímeros reforçados com fibras, sendo a pultrusão um dos processos mais utilizados devido ao baixo custo e à possibilidade de obtenção de perfis de seções transversais variadas, com quaisquer comprimentos e com elevado teor volumétrico de fibras na direção longitudinal do perfil. O FRP fabricado pelo processo da pultrusão é frequentemente denominado pFRP (*Pultruded Fiber Reinforced Polymer*).

A resistência à tração do pFRP é fortemente influenciada pela resistência das fibras longitudinais, enquanto a resistência ao cisalhamento depende muito da matriz. No processo da pultrusão, os fios de fibras são embebidos na matriz polimérica e puxados através de um molde, adquirindo o formato desejado. O posicionamento das fibras longas na direção longitudinal confere ao pFRP a propriedade de material ortotrópico.

Cabe ressaltar que materiais do tipo FRP já são largamente empregados na engenharia aeronáutica e em tubos e tanques de armazenamento nas áreas de óleo e gás [2].

O interesse pela utilização do FRP na engenharia civil tem aumentado nas últimas décadas devido às suas propriedades físicas e mecânicas, tais como elevada resistência mecânica em relação ao baixo peso específico, elevada energia de absorção de impacto e

imunidade à corrosão e estabilidade dimensional [1], tornando atrativa a utilização desses materiais em pontes e passarelas desmontáveis.

As principais vantagens do emprego de FRP em pontes e passarelas desmontáveis são: redução do peso das estruturas, possibilitando a diminuição dos custos com mão-de-obra para sua montagem; facilidade no transporte e instalação; e possibilidade de fabricação de perfis específicos por diferentes processos, tais como moldagem e pultrusão [3].

Em face do exposto e devido ao caráter inovador e recente da utilização de elementos estruturais de FRP na constituição parcial ou total de pontes e passarelas, este artigo tem por objetivo reunir os principais trabalhos publicados com perfis de FRP na fabricação de estruturas de pontes e passarelas de emprego dual no Brasil e no mundo, apresentando com mais detalhes os resultados do projeto e a montagem de uma ponte desmontável em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) realizadas pelo Instituto Militar de Engenharia, em parceria com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/URFJ).

2. Pontes metálicas militares usadas pelo Exército Brasileiro

O Exército Brasileiro dispõe, atualmente, de quatro modelos de pontes desmontáveis. Essas estruturas, além de serem concebidas para utilização em operações militares, também têm sido empregadas no apoio à Defesa Civil nos casos de calamidade pública em que haja a necessidade de reestabelecer o acesso às localidades atingidas ou o tráfego em vias importantes.

Por serem constituídas de aço ou alumínio, essas pontes são pesadas, demandando grande efetivo de mão-de-obra e equipamentos especializados de engenharia para montagem e desmontagem, e necessidade de logística de transporte mais robusta, com a utilização de caminhões e viaturas concebidas para o transporte de cargas elevadas.

A seguir, são apresentadas as principais características dessas equipagens e as informações referentes ao transporte e montagem.

2.1 Ponte Bailey M2 [4]

A ponte de painéis M2 consiste em uma superestrutura formada por peças padronizadas da equipagem Bailey, constituída por painéis de aço que, ligados entre si, formam vigas longitudinais treliçadas, biapoiadas, vigas transversais e piso de aço e madeira, dentre outros itens.

O material dos painéis, vigas transversais e piso é o aço de liga BS968, de peso específico 79 kN/m³. Cada painel tem 3,084 m de comprimento e 1,5 m de altura (Fig. 1), com peso de 2,62 kN.

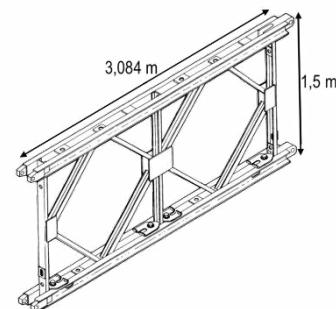


Fig. 1 – Painel Bailey tipo M2. **Fonte:** [4].

A ponte Bailey pode ser montada em configurações com uma ou até três linhas de vigas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado e até três alturas de vigas (tripla-simples, tripla-dupla ou tripla-tripla). A largura total do tabuleiro é de 4,34 m e a largura útil para viaturas é de 3,81 m. A Fig. 2 mostra uma ponte Bailey M2 dupla-simples com 22 m de comprimento.



Fig. 2 – Ponte Bailey dupla-simples. **Fonte:** [4].

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Bailey é de, aproximadamente, 64 m de comprimento para um trem tipo de 333 kN na configuração tripla-simples e o trem tipo máximo de 1120 kN para um vão de 25 m na configuração dupla-simples.

O transporte dos elementos constituintes da ponte, do ferramental e dos elementos de apoio exige a utilização de viaturas especializadas de engenharia. O Manual T5-275 [4] prevê a organização de todo o material para a montagem da ponte em conjuntos pré-determinados com volume e peso compatíveis com as viaturas especializadas de transporte. São as chamadas “cargas-tipo”, que variam conforme a configuração e comprimento de ponte a ser montada. A Fig. 3 mostra um esquema de carga-tipo de transporte de painéis de ponte na carroceria de um caminhão basculante.

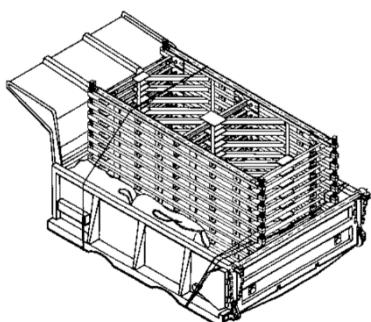


Fig. 3 – Carga-tipo de painéis na carroceria de um caminhão basculante. **Fonte:[4].**

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 209 kN e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 68 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 280 kN, aproximadamente.

A estrutura da ponte é montada sobre roletes de aço em uma das margens e empurrada manualmente para a margem oposta. As seções das pontes são montadas sucessivamente com o posicionamento dos painéis, colocação das vigas transversais e instalação dos contraventamentos horizontais e verticais. Após

o assentamento da ponte nos apoios, feito com o auxílio de macacos hidráulicos, é colocado o piso e são montadas as rampas de acesso.

Para a montagem manual de uma ponte simples-simples de 15,42 m, é necessário o emprego de 33 pessoas para um tempo total de 8 horas. A Fig. 4 mostra o esquema de montagem da ponte.

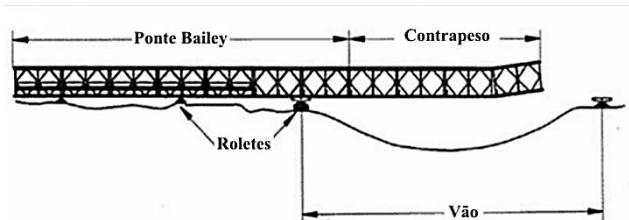


Fig. 4 – Vista longitudinal da ponte lançada sobre o vão. **Fonte:[4].**

2.2 Ponte M4T6 [5]

Aponte M4T6, de fabricação inglesa, é constituído por vigas tipo caixão e vigas transversais em duralumínio. A estrutura pode ser montada sobre suportes flutuantes de borracha, sobre cavaletes intermediários de alumínio ou biapoiada sobre sapatas de aço.

Nesta última configuração, o vão máximo é de 13,71 m de comprimento para um trem tipo de até 390 kN, sendo sua capacidade máxima de suporte de 1.127 kN para um vão de 4,57 m.

A Fig. 5 mostra as vigas componentes da ponte M4T6 e a Fig. 6 apresenta uma ponte biapoiada durante a montagem.

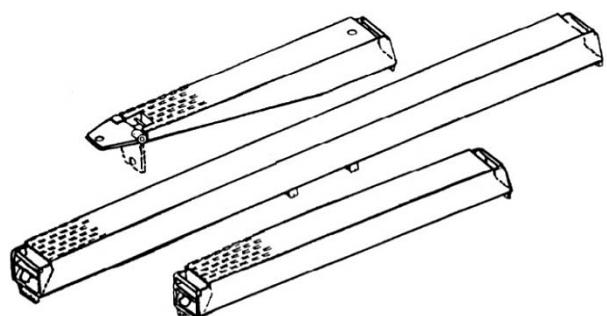


Fig. 5 – Vigas componentes da ponte M4T6. **Fonte:[5].**



Fig. 6 – Ponte M4T6 durante a montagem. **Fonte:** Acervo dos autores.

O transporte dos elementos constituintes da ponte M4T6 não exige veículos especializados e a carga a ser transportada, incluindo ferramental, é de 73,66 kN para a construção de uma ponte com 13,71 m de comprimento, cujo peso próprio é de 54,72 kN.

A montagem da estrutura pode ser feita apenas com ferramental simples ou ainda utilizar guindaste para a colocação da estrutura sobre o vão. São necessárias 15 pessoas para a montagem dessa ponte, num tempo total de 2 horas e meia.

2.3 Ponte Compact 200 [6]

Esta ponte, de fabricação inglesa, foi adquirida pelo Exército Brasileiro em 1997 e consiste na evolução do projeto da ponte Bailey. O sistema estrutural é formado por painéis ligados entre si por meio de pinos, formando vigas longitudinais treliçadas nas quais são apoiadas as vigas transversais e piso, tudo de aço.

Os painéis são fabricados em aço galvanizado tipo BS 4360, com peso específico de 77 kN/m³. Cada painel possui comprimento de 3,084 m e altura de 2,22 m (Fig. 7), com peso total de 4 kN.

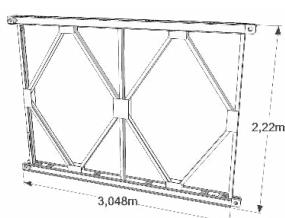


Fig. 7 – Painel Compact 200. **Fonte:** [6].

A ponte Compact 200 pode ser montada em configurações de uma até três linhas de vigas treliçadas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado do tabuleiro, mas com apenas uma altura de viga. A largura total da ponte é de 6,00 m e a largura útil para viaturas é de 4,20 m nas configurações *standard* e 5,30 m na configuração *extra wide*, na qual o comprimento das vigas transversais é maior.

A ponte, apesar de ser utilizada como estrutura temporária no Exército Brasileiro, foi concebida para instalação semipermanente. A Fig. 8 mostra uma ponte dupla-simples com 18 m de comprimento.



Fig. 8 – Ponte Compact 200 dupla simples. **Fonte:** [6].

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Compact 200 é de, aproximadamente, 56 m para um trem tipo de 426 kN na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1.043 kN para um vão de 43 m na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura exige a utilização de viaturas especializadas, tais como caminhões do tipo bitrem. Os manuais existentes não preveem sistema de cargas-tipo para organização dos materiais para o transporte como na ponte Bailey, sendo utilizada a experiência prática quando do transporte das peças.

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 304 kN e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 107 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 411 kN, aproximadamente.

A montagem da estrutura é bastante semelhante à ponte Bailey, com a limitação de que somente pontes do tipo simples-simples sejam montadas de forma

manual em situações emergenciais, uma vez que o projeto prevê a utilização de guindastes e tratores. As seções das pontes são montadas sucessivamente com o posicionamento dos painéis, colocação das vigas transversais e contraventamentos horizontais e verticais. Após o assentamento nos apoios feito com o auxílio de macacos hidráulicos, é colocado o piso e são montadas as rampas de acesso.

A montagem de uma ponte simples-simples de 15,42 m de comprimento exige emprego mínimo de 100 pessoas, sendo o tempo total previsto de montagem de 36 horas.

2.4 Ponte LSB [7]

Esta ponte, de fabricação inglesa, foi adquirida pelo Exército Brasileiro em 2010 e consiste na evolução do projeto da Ponte Compact 200, de emprego militar, com rampas com inclinação ajustável.

O sistema estrutural em aço é formado por painéis ligados entre si por meio de pinos, formando vigas longitudinais treliçadas nas quais são apoiadas as vigas transversais e o piso.

Os painéis são de aço galvanizado tipo BS 4360, cujo peso específico é de 77 kN/m³. Cada painel possui comprimento de 3,084 m e altura de 2,22 m, idênticos aos da ponte Compact 200 (Fig. 7), com peso total de 4 kN.

A montagem da estrutura prevê apenas a utilização de equipamento de engenharia, como guindastes e tratores, podendo ser realizada em configurações com uma até três linhas de vigas treliçadas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado, porém com apenas uma altura de viga.

O vão máximo da equipagem da LSB é de, aproximadamente, 56 m de comprimento para um trem tipo de 426 kN na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1.160 kN para um vão de 40 m na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura, assim como na ponte Compact 200, exige a utilização de viaturas especializadas, como caminhões do tipo bitrem. São possíveis várias combinações de carga-tipo para a

montagem das pontes, de acordo com o vão e com a capacidade da ponte.

A Fig. 9 mostra o material organizado no interior de um dos vagões do caminhão tipo bitrem para a montagem de ponte simples-simples.

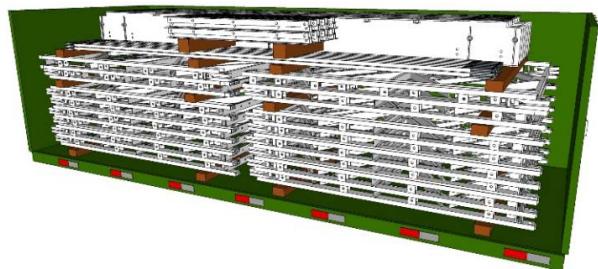


Fig. 9 – Material organizado para a montagem da ponte LSB simples-simples. **Fonte:** [7].

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 256 kN. Os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 111 kN, e as rampas articuladas têm peso de 186 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 553 kN, aproximadamente.

Para a montagem de uma ponte simples-simples de 15,42 m de comprimento existe a necessidade de emprego de 36 pessoas e utilização de guindastes, com tempo total de montagem previsto de 32 horas.

3. Pontes e passarelas de FRP

A seguir, são apresentadas algumas pontes constituídas total ou parcialmente por FRP.

3.1 Ponte alemã em GFRP [8]

A Universidade de Aachen, na Alemanha, desenvolveu uma ponte veicular de comprimento de 20 m para um trem-tipo de 109 kN em cinco módulos desmontáveis, com largura útil de 2,75 m (Fig. 10).

A estrutura é composta por duas vigas longitudinais treliçadas ligadas entre si por vigas transversais. Os elementos da estrutura são constituídos por perfis pGFRP, incluindo o piso. As ligações são feitas com parafusos de alta resistência e chapas de aço.

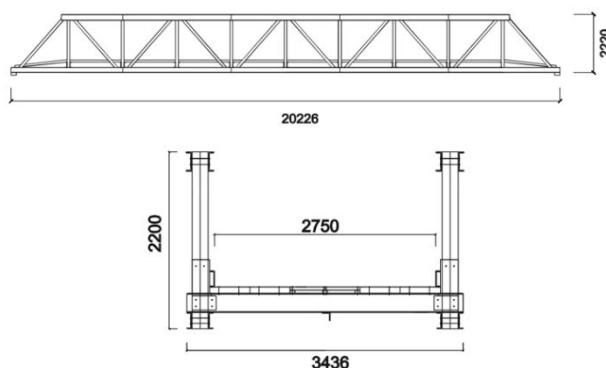


Fig. 10 – Elevação longitudinal e seção transversal da ponte (dimensões em mm). **Fonte:** [8].

Por ser constituída de material leve, a montagem da ponte foi realizada no local por mão-de-obra sem experiência utilizando ferramental simples, num prazo total de três horas. O peso próprio da estrutura montada resultou em 50 kN e a carga de ruptura foi de 350 kN, que ocorreu por flambagem lateral do banzo superior da treliça da ponte.

A Fig. 11 mostra o veículo do tipo MLC 12 realizando passagem sobre a estrutura montada. A ponte atendeu os requisitos de resistência, flecha e facilidade de transporte e montagem previsto no projeto.



Fig. 11 – Passagem de veículo no teste de campo. **Fonte:** [8].

3.2 Ponte grega em GFRP [9]

Uma ponte rodoviária, de caráter permanente, composta por um tabuleiro apoiado em treliça espacial de pGFRP com ligações em aço foi concebida neste trabalho desenvolvido pela Universidade de Patras, na Grécia.

A estrutura foi projetada para vencer um vão de 11,6 m com largura útil do tabuleiro de 4,2 m, conforme mostrado na Fig. 12, e trem tipo de até 300 kN. Os elementos estruturais de pGFRP têm seção transversal quadrada e foram produzidos com fibras de vidro do tipo S e resina éster vinílica. Os nós foram fabricados em aço.

O peso total da estrutura é de 127 kN e esta foi transportada até o local da montagem em um caminhão. Sua instalação durou duas horas e necessitou de dois guindastes para o posicionamento. As Fig. 13 e Fig. 14 mostram, respectivamente, a estrutura sendo transportada e posicionada sobre o vão.

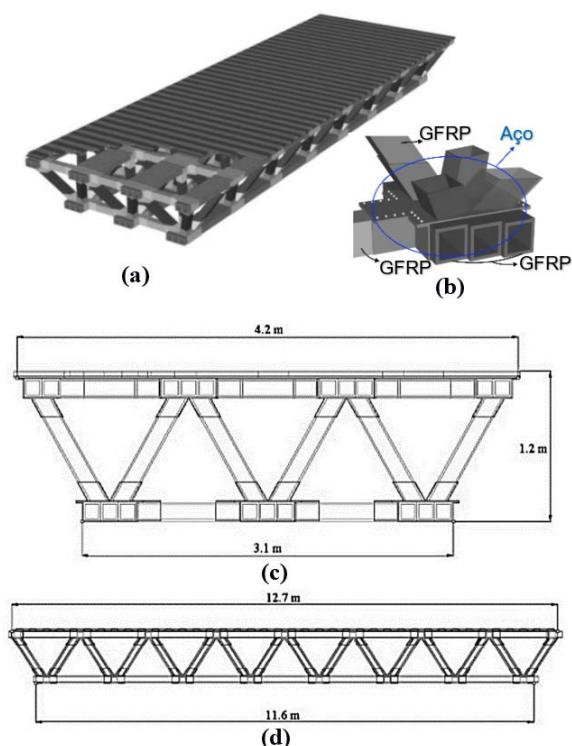


Fig. 12 – Ponte veicular de GFRP: (a) vista geral, (b) detalhe dos nós de aço, (c) seção transversal e (d) vista longitudinal. **Fonte:** [9].



Fig. 13 – Transporte da estrutura sobre caminhão. **Fonte:** [9].



Fig. 14 – Instalação da ponte sobre o vão com o auxílio de guindastes. **Fonte:** [9].

3.3 Pontilhão militar americano de FRP [10]

Com a finalidade de atender à mobilidade das tropas em situações de combate ou em emergência, o Exército americano desenvolveu um pontilhão para vencer um vão de quatro metros, composto por dois pisos de rodagem independentes entre si, com 76 cm de largura cada, conforme apresentado na Fig. 15.

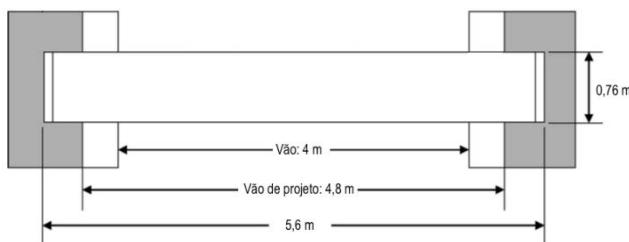


Fig. 15 – Um piso de rodagem do pontilhão militar de FRP. **Fonte:** [10].

O trem tipo adotado para o projeto foi de 270 kN (MLC 30), determinado a partir do que prescreve o Trilateral Design and Test Codes for Military Bridging and Gap-crossing Equipment [11].

A estrutura é composta por perfis quadrados colados, cujas faces superior e inferior são de polímero reforçado em fibra de carbono (CFRP) e as demais faces são de GFRP (fibra de vidro do tipo E e resina epóxica). A Fig. 16 mostra a seção transversal do piso de rodagem.

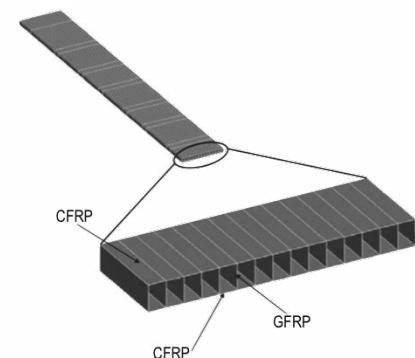


Fig. 16 – Seção transversal de um piso de rodagem. **Fonte:** [10].

O pontilhão foi posicionado manualmente sobre o vão sem a necessidade de pessoal especializado. O peso de cada piso de rolamento é de 2,03 kN, perfazendo um total de 4,06 kN para o pontilhão. A Fig. 17 traz um exemplo de passagem de veículo sobre o pontilhão.



Fig. 17 – Passagem de veículo sobre o pontilhão. **Fonte:** [10].

Os autores concluíram que o emprego de pontilhões militares com esse tipo de material é adequado aos princípios de lançamento rápido para pontes de pequenas brechas.

3.4 Ponte desmontável brasileira em GFRP [1;12;13]

Com vistas a apresentar uma alternativa às pontes militares utilizadas pelo Exército Brasileiro em operações militares e em apoio à Defesa Civil, uma ponte desmontável em material compósito fibra de vidro começou a ser desenvolvida em 2007 em parceria do Exército Brasileiro com a UFRJ.

O projeto da ponte desmontável em GFRP com largura total de quatro metros tinha por objetivo vencer um vão de até 30 m e suportar um veículo de até 280 kN. A Fig. 18 apresenta a seção transversal da ponte e o esquema estrutural das vigas do projeto.

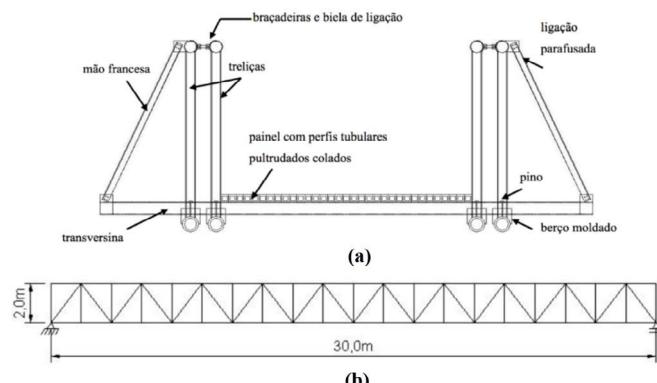


Fig. 18 – Ponte Desmontável: (a) seção transversal, (b) esquema estrutural das vigas. Fonte: [1].

O sistema estrutural desenvolvido consiste em:

- vigas treliçadas compostas por perfis pultrudados tubulares circulares de GFRP e nós metálicos, ligados por contato e pré-comprimidos pela utilização de fios de aço protendido no seu interior;
- transversinas formadas por dois perfis tubulares quadrados colados e apoiados sobre os nós metálicos;
- contraventamento lateral das vigas treliçadas por meio de mãos francesas;
- contraventamento horizontal do tabuleiro;
- piso com perfis pultrudados tubulares colados.

O projeto foi, inicialmente, dimensionado em escala real, porém, para a viabilidade econômica do teste das vigas em laboratório, foi desenvolvido um modelo reduzido na escala 1:2,3 a partir da Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (TSMF) [14], de forma que seus resultados pudessem ser extrapolados para o protótipo em verdadeira grandeza, refletindo o comportamento das vigas em tamanho real.

A escolha das ligações pré-comprimidas por contato ocorreu após a realização de ensaios de ligações entre chapas de GFRP com parafusos de aço submetidos ao corte duplo. Os autores verificaram que a resistência das chapas ligadas por parafusos

foi muito inferior à resistência do GFRP obtida nos ensaios de caracterização mecânica, tendo ocorrido a ruptura por rasgamento da chapa ou por contato do furo no parafuso. Assim, concluíram que a utilização de ligações parafusadas limita a capacidade resistente de projetos com materiais compósitos; por isso, esse tipo de ligação foi descartado no projeto da ponte desmontável.

A concepção da ligação por contato ativada pela pré-tração de fios de aço dispostos nos tubos de GFRP constituiu uma das inovações desse projeto, além do detalhamento e fabricação das juntas metálicas (nós) para a união das peças de GFRP e formação do sistema treliçado, conforme mostrado na Fig. 19. Inicialmente, os nós metálicos foram confeccionados com tubos de aço soldados resultando em peças de peso elevado e com diversas imperfeições. Posteriormente, eles foram fabricados em alumínio, conferindo mais leveza à estrutura.

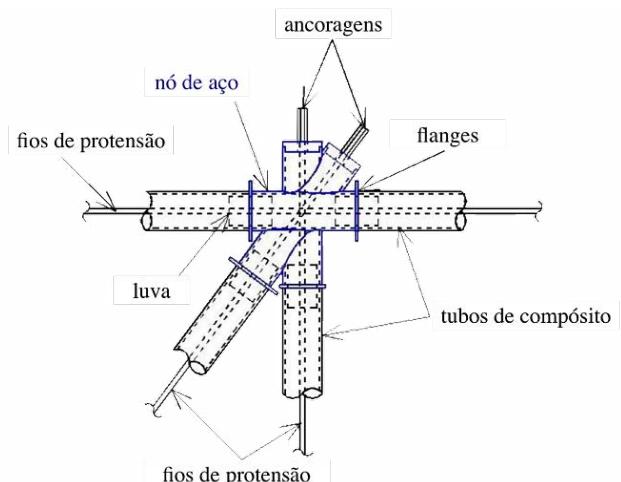


Fig. 19 – Detalhe tubo-nó da viga treliçada. Fonte: [12].

Os perfis pultrudados, grades injetadas e os fios de protensão foram adquiridos em um único lote. Os nós em alumínio foram fabricados em liga de alumínio 6351 pelo processo de fundição em molde de areia no ano de 2012, tendo recebido tratamento térmico tipo T6 (solubilização e envelhecimento) para aumento da sua dureza. Um nó comum e nó central do banzo inferior e um nó comum e nó central do banzo superior da treliça são apresentados na Fig. 20.

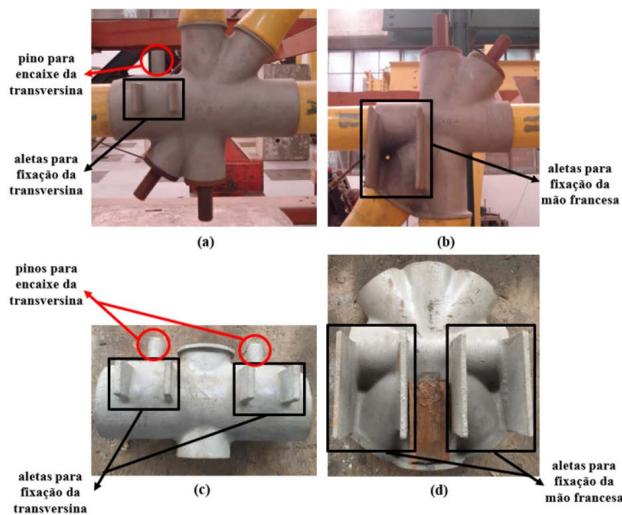


Fig. 20 – Nós de alumínio: (a) inferior, (b) superior, (c) central inferior e (d) central superior. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Os nós do banzo inferior foram moldados com um pino na parte superior para encaixe das transversinas e duas aletas na lateral para fixação das transversinas. Os nós do banzo superior foram moldados com duas aletas para o encaixe da mão francesa.

O reforço externo dos tubos das diagonais e montantes foi feito por laminação manual, com o posicionamento de luvas de alumínio em seu interior, enquanto os elementos de banzo superior e inferior tiveram seu reforço externo feito pelo batente interno dos nós de alumínio, e interno, com as luvas de alumínio, conforme mostrado na Fig. 21.

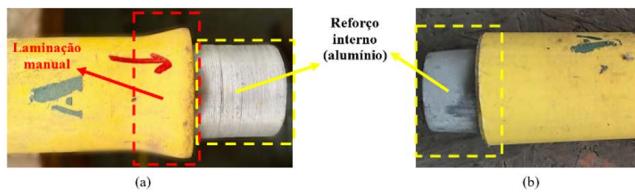


Fig. 21 – Reforços nos elementos de GFRP: (a) montantes e diagonais e (b) banzos superior e inferior. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A TSMF foi aplicada apenas aos tubos de compósito, enquanto os nós e os fios de protensão foram adotados sem respeitar os fatores de escala. Os nós foram projetados apenas para a treliça do modelo reduzido, porém, no protótipo, estes serão mais leves uma vez que a espessura das peças do modelo reduzido ficou limitada à espessura mínima necessária para a fundição.

A área dos tubos de GFRP no modelo reduzido foi distorcida em relação ao modelo em escala real (protótipo). Dessa forma, como a escala adotada no modelo reduzido foi $k_1 = 1/2,3$, foram obtidas as seguintes escalas:

- área dos perfis: $k_A = k_{13} = 1/(2,3)^3$;
- peso específico aparente: $k_{\text{aparente}} = 1/k_1 = 2,3$;
- peso próprio: $k_{\text{pp}} = k_{13} = 1/(2,3)^3$;
- carga móvel aplicada: $k_F = k_{13} = 1/(2,3)^3$.

O programa experimental desenvolvido nos trabalhos consistiu na montagem de uma das vigas da ponte com comprimento total de 13,06 m (equivalente ao comprimento de 30 m para protótipo, sendo obedecido o fator de escala adotado de 1:2,3).

Inicialmente, foram utilizados nós de aço com reforço de jaquetas de aço, luvas de aço e luvas de compósito nos nós, conforme mostrado na Fig. 22.

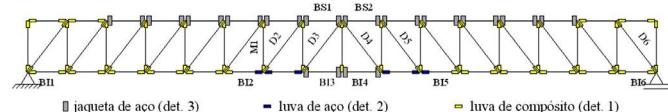


Fig. 22 – Ligações adotadas nos primeiros ensaios. **Fonte:** [12].

A carga de ruptura obtida neste ensaio foi de 46 kN, o equivalente a 560 kN de carga esperada no protótipo, de acordo com a TMSF [14]. A ruptura ocorreu por flambagem lateral do banzo superior da viga.

Posteriormente, os nós de aço foram substituídos por nós de alumínio com reforços internos feitos por luvas de alumínio nas ligações tubo pGFRP-nós, conforme mostrado na Fig. 23.

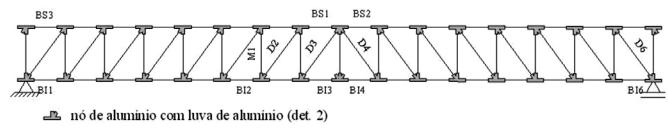


Fig. 23 – Ligações adotadas nos ensaios seguintes. **Fonte:** [12].

Com a utilização dos nós de alumínio, a ruptura também ocorreu devido à flambagem lateral da viga para uma carga estática de 42 kN, o equivalente a 511 kN de carga esperada para o protótipo, de acordo com a TSMF [14].

Apesar de propiciarem uma estrutura mais flexível, os nós de liga de alumínio ainda apresentam vantagens em relação aos nós de aço. Eles não estão sujeitos à corrosão, são mais leves e facilitam a montagem da viga-treliça, tanto pela diminuição do peso como pela facilidade de encaixe dos tubos de compósito. Os nós de liga de alumínio são moldados, o que reduz muito a incidência de defeitos durante a fabricação das peças [12].

Em todos os ensaios, o sistema de carregamento consistiu na aplicação de cargas por meio de tirantes presos em dois nós no banho inferior das vigas e ligados a dois macacos hidráulicos que reagiram a uma placa de reação, conforme mostrado na Fig. 24.

Como o carregamento no modelo não tem a mesma distribuição espacial do carregamento de projeto da ponte (três eixos de aplicação de carga, conforme a viatura de projeto) e, sendo linear o comportamento da estrutura em serviço, os autores utilizaram a analogia de viga para se calcular, a partir dos deslocamentos obtidos no ensaio de carregamento da viga-treliça, a rigidez equivalente de uma viga biapoiada, chegando à conclusão de que a capacidade portante da viga-treliça satisfez os requisitos de projeto e segurança requeridos para a estrutura e que o momento resistente de projeto (1.141,5 kN.m) foi superior ao momento solicitante de projeto no protótipo (982,7 kN.m) [1]. Tais implicações viabilizaram a continuação do projeto de montagem da ponte completa.

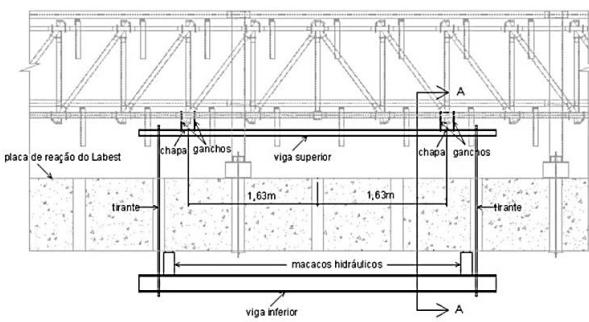


Fig. 24 – Croqui do sistema de carregamento adotado. **Fonte:** [1].

3.5 Pontilhão canadense em GFRP [15]

O Exército do Canadá desenvolveu uma ponte para pequenas brechas para emprego, tanto

em atividades militares, quanto em situações de catástrofes naturais. Este projeto procurou utilizar materiais leves e baratos, que viabilizassem o transporte e lançamento da estrutura com o mínimo de pessoal e equipamentos especializados.

A ponte é composta por dois pisos de rodagem em viga caixão de inércia variável, com inclinação de 9,4° (Fig. 25). Cada piso possui 4,8 m de comprimento, 1,2 m de largura e altura no ponto central de 51,3 cm. A estrutura foi projetada para suportar um veículo sobre rodas de 270 kN.

As vigas foram compostas por perfis quadrados e chapas de GFRP (fibra de vidro tipo E e resina éster vinílica para os perfis, resina de poliéster para as chapas inferiores e laterais e resina de isopoliéster para a chapa superior), todos colados com adesivo de alta resistência.

Cada piso de rolamento pesava 2,5 kN, facilitando o transporte e posicionamento da estrutura sobre o vão, não havendo necessidade de pessoal ou equipamento especializado para tal. A Fig. 26 traz o exemplo da passagem de um veículo sobre um piso de rolamento.

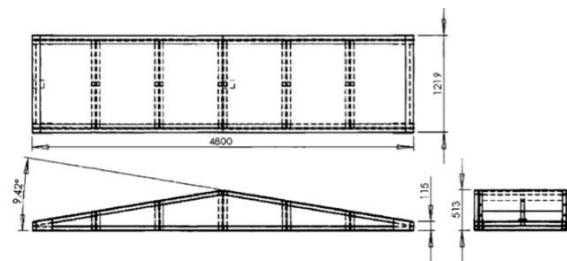


Fig. 25 – Vista superior e em elevação de um piso de rodagem. **Fonte:** [15].



Fig. 26 – Passagem do veículo sobre um piso de rolamento. **Fonte:** [15].

2.6 Ponte modular híbrida FRP/alumínio chinesa [16]

A estrutura é composta por dois pisos de rodagem em alumínio apoiados sobre treliças espaciais compostas por elementos de alumínio, GFRP e HFRP (polímero reforçado com fibras de vidro tipo E, carbono e basalto).

A ponte foi projetada para um vão de 12 m, largura útil de 3,2 m (Fig. 27) e capacidade para um trem-tipo de 100 kN especificado no Código Geral para Projetos de Pontes Militares da China (General Code for Military Bridge Design) [17].

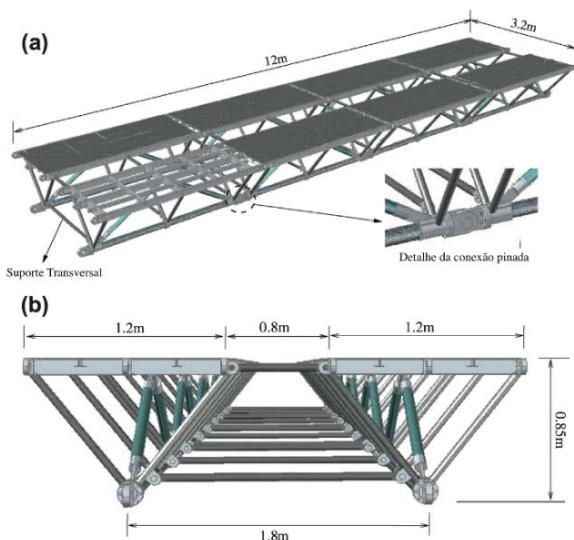


Fig. 27 – Ponte modular híbrida. (a) vista geral, (b) seção transversal. **Fonte:** [16].

A conexão dos módulos da ponte foi feita por pinos de alumínio enquanto a dos elementos metálicos utilizou soldagem. O encaixe dos elementos de FRP e os metálicos foram realizadas por contato. A Fig. 28 mostra os detalhes das conexões que são semelhantes às utilizadas por Teixeira, Pfeil e Batista [12]. A montagem total de um piso de rodagem com quatro módulos durou 45 minutos, com o emprego de 12 pessoas. A montagem completa durou 90 minutos.

O peso total da estrutura é de 12 kN, possibilitando uma fácil montagem. O transporte da estrutura pode ser feito em módulos, não exigindo veículos muito grandes e simplificando a logística do transporte até os locais de montagem.

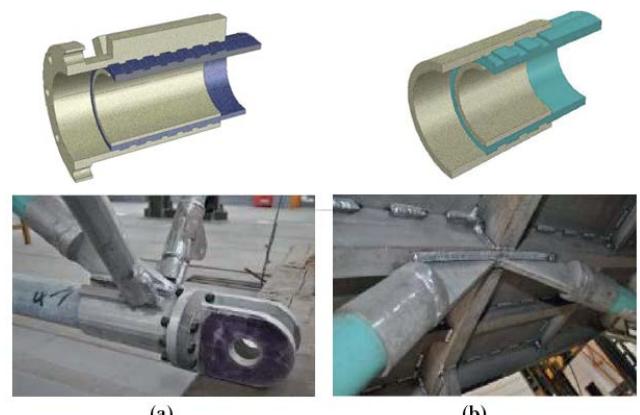


Fig. 28 – Vista em corte das conexões: (a) HFRP, (b) GFRP. **Fonte:** [16].

3.7 Ponte temporária taiwanesa de GFRP [18]

Taiwan encontra-se em uma região com elevada incidência de terremotos e enchentes que, eventualmente, provocam colapso de pontes rodoviárias, com a consequente interrupção no tráfego. Esse cenário motivou o desenvolvimento de uma ponte emergencial de resgate com 10 m de comprimento e três metros de largura, para um trem-tipo máximo de 50 kN.

A estrutura biapoiada é composta por vigas longitudinais de perfis I pultrudados de GFRP (pGFRP), ligadas por meio de enrijecedores metálicos e parafusos e um piso gradeado de GFRP. O esquema da estrutura é mostrado na Fig. 29.

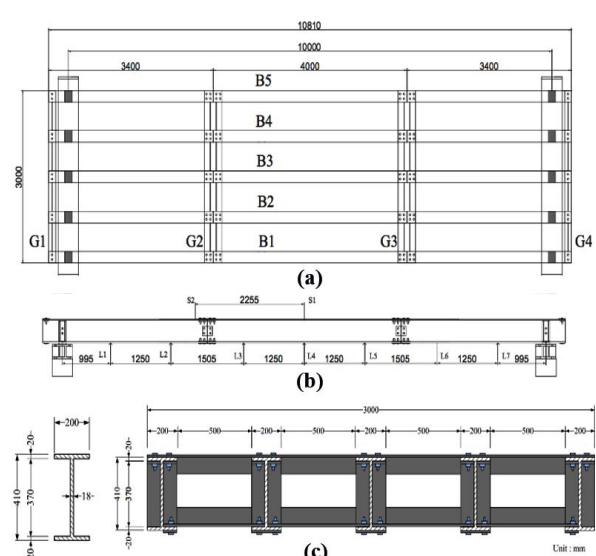


Fig. 29 – Ponte temporária: (a) vista superior, (b) elevação longitudinal e (c) secção transversal. **Fonte:** [18].

Devido ao baixo peso (29,42 kN), a estrutura foi montada por estudantes, com auxílio de ferramental simples, num período de 10 horas.

O posicionamento da estrutura sobre o vão utilizou um pequeno guindaste. A ponte atendeu os critérios de projeto com elevado fator de segurança e resultou em uma estrutura de peso próprio baixo, facilitando o transporte e a montagem.

3.8 Ponte emergencial estaiada taiwanesa de GFRP [19]

O projeto da ponte utiliza o mesmo sistema de tabuleiro do item anterior, tendo o vão de pGFRP sido aumentado para 20 m. Entre os vãos de 10 m (aço) e 20 m (pGFRP), foi construído um pilar de aço de onde saíam os estais para suporte do tabuleiro, conforme mostrado na Fig. 30. O trem-tipo de projeto foi mantido em 50 kN.

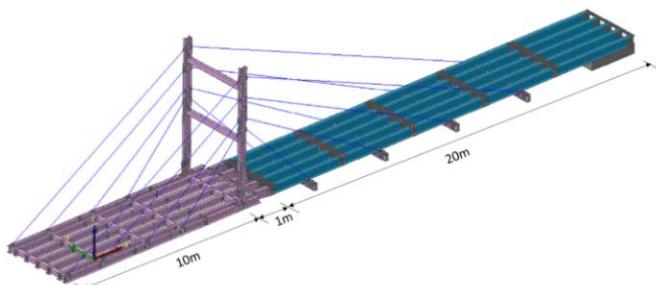


Fig. 30 – Esquema de ponte estaiada com pGFRP em azul e elementos de aço em roxo. **Fonte:** [19].

Para atender ao requisito emergencial em situações em que não é possível acessar outra margem, foi realizada a montagem das seções suspensas sobre o vão com o auxílio de um contrapeso. Trinta pessoas participaram da montagem, utilizando ferramental simples e um pequeno guindaste. A montagem durou seis horas. A Fig. 31 mostra a passagem de um pequeno caminhão sobre a ponte.

O peso total da estrutura, considerando os elementos metálicos, é de 58,84 kN, possibilitando que a estrutura seja facilmente transportada por pequenos caminhões e facilitando consideravelmente a logística de montagem.



Fig. 31 – Passagem do veículo sobre a ponte estaiada. **Fonte:** [18].

4. Estudo experimental da ponte completa desmontável brasileira em GFRP

Com os resultados obtidos por Teixeira [1] e Teixeira, Pfeil e Batista [12,13], foi dada continuidade aos trabalhos de desenvolvimento da ponte desmontável brasileira em GFRP.

Dessa forma, uma montagem completa do modelo reduzido da ponte em escala 1:2,3 foi realizada em laboratório. A estrutura, com 6,5 m de comprimento e 4,0 m de largura, foi montada nas instalações da COPPE/UFRJ por três pessoas num prazo total de 18 horas, com a utilização de ferramental simples e auxílio de uma talha fixada em uma ponte rolante. Esse prazo foi calculado de acordo com a experiência do pessoal envolvido na montagem de estruturas dessa natureza, tendo sido majorado em 3 vezes, considerando-se o fator de escala de 2,3. Diferentemente da estrutura apresentada no item 3.4 (Fig. 18), a ponte montada apresentou apenas uma treliça de cada lado do tabuleiro.

As propriedades mecânicas dos perfis utilizados nesse trabalho são as mesmas indicadas no desenvolvimento da ponte brasileira do item 3.4, podendo ser encontradas, em detalhe, na publicação em referência [1].

A Fig. 32 apresenta a seção transversal da ponte, uma vista lateral e uma vista superior, com o detalhamento dos elementos de contraventamento

horizontal e vertical. Nesta figura, o piso só foi ilustrado em metade do vão na vista em elevação, para possibilitar uma melhor visualização dos contraventamentos horizontais.

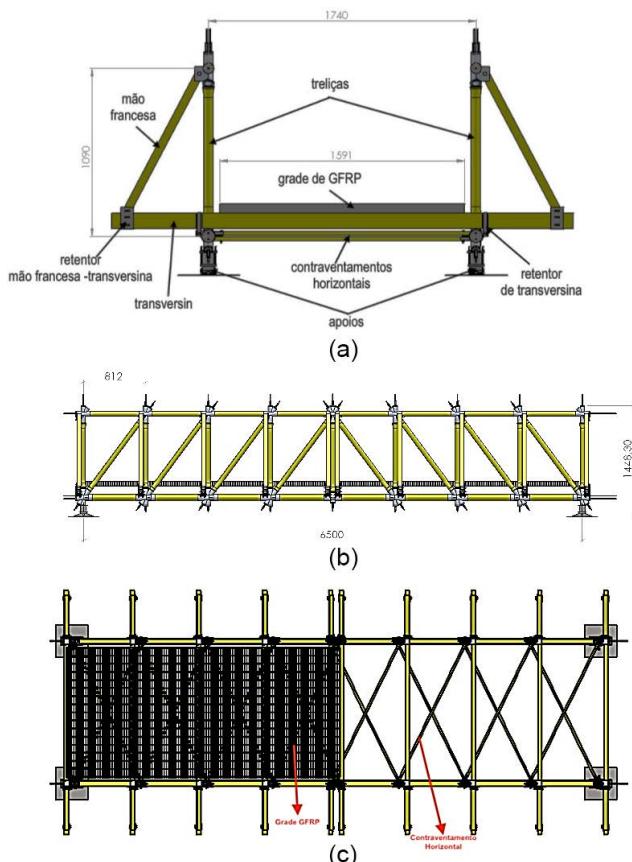


Fig. 32 – Ponte desmontável: (a) seção transversal, (b) elevação longitudinal e (c) vista superior (dimensões em mm). **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Um dos objetivos da montagem foi verificar o processo construtivo idealizado, visando à aplicação das protensões e a montagem da estrutura completa no campo.

As etapas foram as seguintes: montagem das vigas nas bancadas; protensão de montantes, diagonais e banzo superior; protensão parcial do banzo inferior; içamento e assentamento das vigas; instalação dos contraventamentos horizontais; posicionamento das vigas transversais; instalação das mãos francesas; posicionamento do piso e protensão final do banzo inferior. A Fig. 33 mostra a ponte montada.



Fig. 33 – Ponte do modelo reduzido montada. Fonte: Acervo dos autores.

Para a análise do comportamento da estrutura em termos de cargas, deformações e deslocamentos, durante as fases de montagem e carregamento, foram utilizados 54 sensores, sendo 33 extensômetros elétricos de resistência (eer) com 5 mm de comprimento, da marca Kyowa, nove flexímetros com curso de 100 mm, da marca Kyowa, e 12 células de carga fabricadas a partir de eer. A Fig. 34 apresenta a disposição dos sensores na ponte.

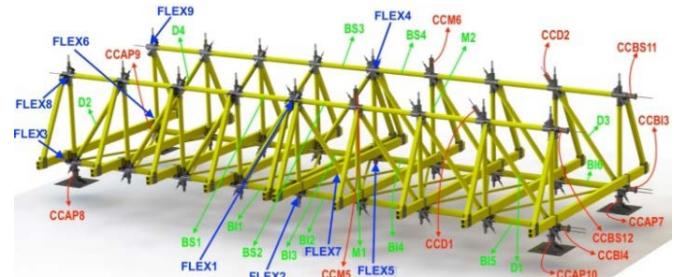


Fig. 34 – Ponte com todos os sensores. **Fonte:** Elaborado pelos autores

Para o sistema de carregamento foi considerado o trem-tipo indicado por Teixeira [1], a viatura AV-LMU ASTROS II, cujo peso total é de 280 kN [20]. A mesma escala de 1:2,3 foi considerada para as dimensões do trem tipo, bem como suas cargas, respeitando-se o previsto na TSMF [14]. A Fig. 35 apresenta a viatura ASTROS

com suas principais dimensões, e a Fig. 36 representa o esquema do veículo já com as dimensões reduzidas.

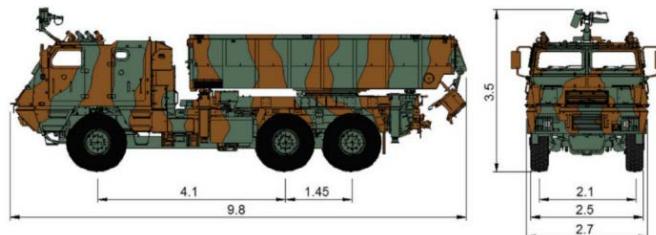


Fig. 35 – Dimensões da viatura ASTROS, em metros. **Fonte:** [20].

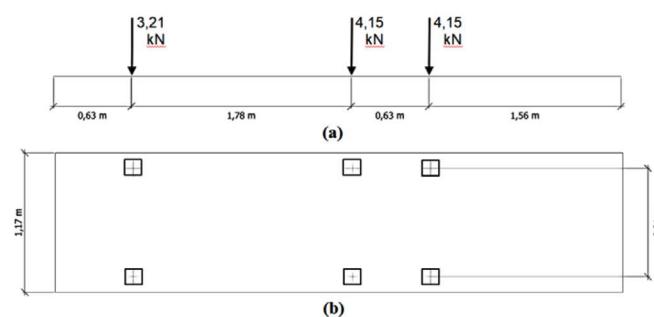


Fig. 36 – Esquema do veículo e dimensões do modelo reduzido: (a) em elevação, (b) em planta. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Conhecidas as dimensões do veículo, foi fabricada uma estrutura de carregamento em perfis de aço que pudesse simular os eixos da viatura. Para garantir que essa estrutura não se deformaria com a aplicação do carregamento, foram realizadas simulações utilizando a ferramenta Solidworks Simulation, cujos deslocamentos verticais são apresentados na Fig. 37. Verificou-se que os deslocamentos obtidos foram mínimos, na ordem de 0,45 mm para uma carga aplicada de 130 kN.

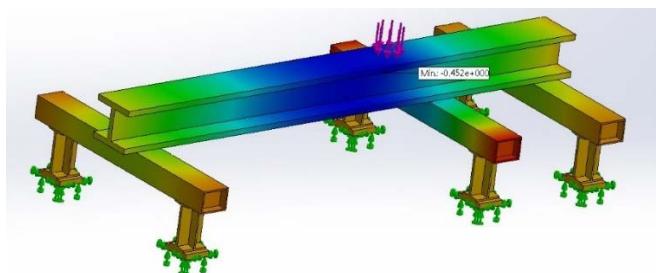


Fig. 37 – Modelagem numérica da estrutura de carregamento com os deslocamentos verticais. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A estrutura de carregamento, após a fabricação, foi pesada com o auxílio de uma célula de carga presa à talha da ponte rolante, tendo sido encontrado o valor de 9,48 kN. A Fig. 38 apresenta a estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte.

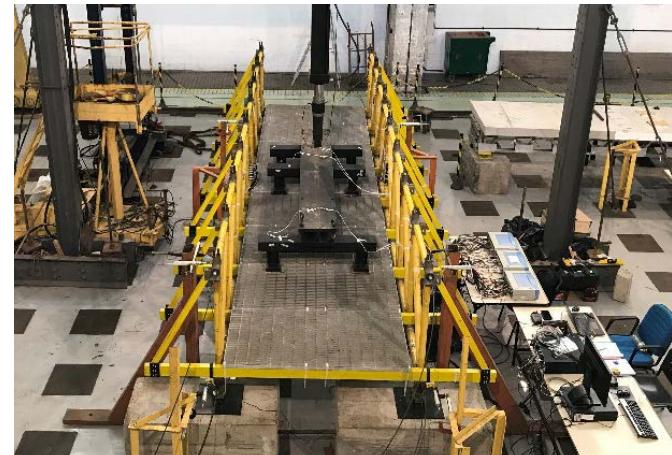


Fig. 38 – Estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte. **Fonte:** Acervo dos autores.

A ponte montada apresentou peso próprio de 7,51 kN. Pela escala adotada no projeto por Teixeira [1], pode-se estimar o peso próprio do protótipo de 15 m em 91,37 kN. Este valor é aproximado, tendendo a ser um pouco menor, uma vez que os nós de alumínio, apesar de estarem na escala reduzida, tiveram que manter as espessuras dos nós do protótipo devido ao processo de fundição, acarretando peças de maior peso.

Foram realizados ensaios estáticos da ponte completa para verificação do comportamento da estrutura em serviço e na ruptura. Devido ao peso próprio e à protensão final, a contra flecha média medida no meio do vão das vigas foi de 21,04 mm. E, com a aplicação da carga de serviço (11,50 kN), a contra flecha média no centro das vigas passou a 18,56 mm, correspondendo a uma deformação vertical média de 2,48 mm devido ao carregamento aplicado.

A ruptura da ponte ocorreu devido à flambagem lateral de uma das vigas, acarretando compressão excêntrica no elemento de pgFRP do banho superior no vão central, provocando seu esmagamento. A Fig. 39 mostra a estrutura rompida.

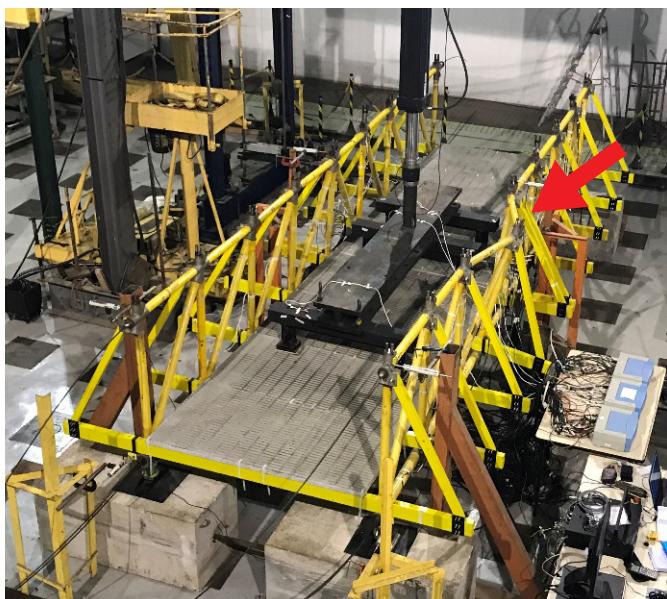


Fig. 39 – Vista superior da ruptura da ponte. **Fonte:** Acervo dos autores.

A carga máxima aplicada ao sistema foi de 97,62 kN, porém, devido à TSMF [14], há necessidade de ser adicionado peso ao modelo reduzido de tal modo que este represente bem a parcela de peso próprio do protótipo. Assim, foi subtraído um total de 17,27 kN (2,3 vezes o peso próprio da ponte de modelo reduzido) de tal forma que a carga máxima considerada foi de 80,35 kN.

Para estimar a carga máxima de ruptura na ponte protótipo, com 13 m de vão, considerou-se o fator de escala elevado à terceira potência, conforme previsto no projeto por Teixeira [1]. Assim, estimou-se em 977,6 kN ($80,35 \times 2,3^3$) a carga máxima para ruptura da ponte protótipo.

O Eurocomp [21] considera os seguintes coeficientes de redução de resistência para os materiais pultrudados após a cura total e em temperaturas inferiores à temperatura de amolecimento da resina utilizada: 1,39, para combinações de carga de curta duração, e 3,54, para combinações de carga de longa duração. Então, para a estimativa de carga de projeto da ponte (capacidade máxima) utilizou-se o coeficiente de 1,39, resultando em 703,3 kN.

5. Comparação entre as pontes de FRP apresentadas e as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro

Com a finalidade de apresentar um panorama da utilização dos materiais FRP em estruturas de ponte, bem como comparar aspectos dessas estruturas com as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro, foi elaborada a Tabela 1.

Deve-se ressaltar que os valores de carga apresentados na Tabela 1 são de ruptura das pontes em FRP, conforme apresentado nos itens 3 e 4, e de projeto das pontes metálicas. Para a ponte brasileira, estimou-se a capacidade máxima dividindo-se a carga de ruptura por 1,39, conforme já apresentado.

Tabela 1 – Comparativo entre as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro e as pontes de FRP.

Ponte	Peso próprio (kN)	Montagem (h)	Nr pessoas	Nr pessoas x hora
Alemã	50	3	5	15
Grega	127	48	8	384
Americana	4	imediata	4	-
Brasileira (protótipo)	91	40	6	240
Canadense	5	imediata	8	-
Chinesa	12	1,5	12	18
Taiwanesa (2015)	29	10	10	100
Taiwanesa (2016)	59	6	30	180
Ponte Bailey M2	209	8	33	264
Ponte M4T6	55	2,5	15	37,5
Ponte Compact 200	304	36	100	3600
Ponte LSB	256	32	36	1152
Ponte	Vão (m)	Carga de Ruptura (kN)	Carga de Projeto (kN)	
Alemã	20,00	350	109	
Grega	11,60	-	300	
Americana	4,80	-	270	
Brasileira (protótipo)	13,00	978	703	
Canadense	4,00	330	270	
Chinesa	12,00	-	100	
Taiwanesa (2015)	10,00	200	50	
Taiwanesa (2016)	20,00	-	50	
Ponte Bailey M2	15,42	-	510	
Ponte M4T6	13,71	-	390	
Ponte Compact 200	15,42	-	570	
Ponte LSB	15,42	-	570	

Fonte: Elaborado pelos autores.

A primeira análise diz respeito ao peso próprio das estruturas montadas.

Em comparação com a ponte Bailey simples-simples de 15,42 m de vão, a ponte brasileira apresenta 43,72% do peso próprio, enquanto para as pontes Compact 200 e LSB, essa proporção cai para 30,10% e 35,70%, respectivamente.

O peso próprio da ponte brasileira é 67% maior que o da ponte M4T6. Porém, a capacidade máxima desta ponte é de 390 kN, correspondendo a 55% da capacidade máxima da ponte brasileira.

Os demais trabalhos apresentados, apesar de terem pesos próprios das estruturas montadas, assim como o esquema estrutural adotado, mostraram que os procedimentos de montagem foram simples, com a necessidade de pouca mão-de-obra para um tempo reduzido de montagem.

O número de pessoas necessárias para a realização das montagens das pontes é uma variável que depende do peso próprio da estrutura, dos equipamentos e ferramentas disponíveis e do processo de montagem em si. Porém, a partir dos dados obtidos, é possível verificar (do ponto de vista do peso próprio) que as pontes em pFRP demandam menos mão-de-obra do que as pontes metálicas empregadas pelo Exército Brasileiro, e, consequentemente, tempo de montagem menor.

Ao analisar o produto Nr de pessoas × hora (Tabela 1), verifica-se que a montagem da ponte brasileira é bem mais rápida do que a das pontes Bailey, Compact 200 e LSB, se for considerado o mesmo número de pessoas para a montagem.

Essa mesma comparação com as demais pontes pFRP indica que a ponte brasileira demanda maior tempo que a maioria das pontes em FRP. Isto pode ser explicado pelo fato dessa ser a única que, no processo de montagem, necessita da realização de protensões nos elementos constituintes das vigas. Essa etapa deve ser feita com bastante critério, uma vez que protensões diferentes das estabelecidas no projeto terão influência direta na capacidade de suporte da estrutura.

Outra conclusão é que, havendo aumento do efetivo para a montagem, o tempo necessário para a ponte brasileira poderá reduzir.

Por fim, ao se compararem as capacidades de suporte, verifica-se que a ponte Bailey possui 72,5% da capacidade de suporte da ponte em GFRP brasileira, enquanto a ponte M4T6, 55,5%, e a Compact 200 e LSB, cerca de 81,0%.

6. Conclusões

O presente trabalho apresentou as pontes militares metálicas empregadas pelo Exército Brasileiro, não apenas em operações militares, mas também em atividades de apoio à Defesa Civil nos casos de calamidade pública.

Além disso, foram apresentados alguns trabalhos de utilização de materiais pFRP em projetos de pontes ao redor do mundo, os quais demonstraram a viabilidade da utilização desses materiais no que diz respeito à resistência, facilidade de transporte e montagem.

Uma ponte em GFRP (fibra de vidro e resina de poliéster) foi testada pelo Exército Brasileiro em parceria com a UFJR. Foi realizada a montagem da estrutura completa em modelo reduzido na escala 1:2,3 com 6,5 m de comprimento e o ensaio de carregamento estático para verificação do comportamento dela em serviço e na ruptura. Desta montagem foi possível concluir que:

- a ponte não exigiu pessoal e equipamentos especializados para a sua montagem;
- devido ao baixo peso dos elementos constituintes da estrutura, em comparação aos elementos de materiais de construção tradicionais, o tempo de lançamento se mostrou bastante eficiente, tendo em vista ter sido realizada por apenas duas pessoas;
- a montagem a partir dos elementos completamente desmontados diminui os volumes a serem transportados, demandando menos viaturas especializadas para o transporte;
- os procedimentos de protensão dos elementos das vigas indicaram ser adequados para execução no campo;
- a carga de ruptura da estrutura foi 8 vezes superior à de projeto;

- a ruptura ocorreu conforme o previsto, havendo o deslocamento transversal do nó superior da viga; e
- comparando com as pontes metálicas, atualmente utilizadas pelo Exército Brasileiro, a ponte desmontável de pFRP poderá potencializar o apoio em calamidades públicas ou em situações de combate.

Das verificações realizadas neste trabalho e com a finalidade de dar continuidade ao estudo de ponte desmontável em material compósito, algumas sugestões foram levantadas, das quais:

- modificar o projeto de contraventamento das mãos francesas, retirando sua ligação com as transversinas, ou enrijecendo-as suficientemente, de forma a aumentar a eficiência do contraventamento vertical;
- fabricar um carrinho com a geometria da viatura ASTROS para melhor simular a distribuição de cargas na ponte;
- avaliar o comportamento dinâmico da estrutura; e
- verificar as propriedades físicas e mecânicas dos perfis do projeto sob ação de temperaturas acima de 60°C.

Referências

- [1] TEIXEIRA, A. M. A. J. Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] MARSH, E. Composites in Infrastructure: building new markets. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [3] ASCIONE, L.; GUTIERREZ, E.; DIMOVA, S.; PINTO, A.; DENTON, S. Prospect for new guidance in the design of FRP: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Ispra, VA: European Comission, 2016.
- [4] MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Estado Maior do Exército. Manual Técnico T 5-277 – Ponte de painéis tipo Bailey, M2 montada sobre suportes fixos – 1^a parte. Brasília, DF: Ministério do Exército, 1979.
- [5] MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Estado Maior do Exército. Manual Técnico T 5-278 – Ponte M4T6. Brasília, DF: Ministério do Exército, 1975.
- [6] EXÉRCITO BRASILEIRO. 3^º Batalhão de Engenharia de Combate. Nota de aula. Trabalho acadêmico (Disciplina Pnt Compact200). 3^º Batalhão de Engenharia de Combate. Cachoeira do Sul, 2005.
- [7] MINISTÉRIO DA DEFESA. Exército Brasileiro. Secretaria Geral do Exército. Manual Técnico EB50-MT-06.001 – Ponte de Apoio Logístico LSB – Parte I e II. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2019.
- [8] SEDLACEK, G.; TRUMPF, H.; CASTRISCHER, U. Development of a light-weight emergency bridge. Structural Engineer International, v. 14, n. 4, p. 282–287, 2004. <https://doi.org/10.2749/101686604777963702>.
- [9] KOSTOPOULOS, V.; MARKOPOULOS, Y. P.; VLACHOS, D. E.; KATERELOS, D.; GALIOTIS, C.; TSIKNIAS, T. et al. Design and construction of a vehicular bridge made of glass/polyester pultruded box beams. Plastics, Rubbers and Composites, v. 34, n. 4, p. 201–207, 2005. <https://doi.org/10.1179/174328905X55641>.
- [10] ROBINSON, M. J.; KOSMATKA, J. B. Development of a short-span fiber-reinforced composite bridge for emergency response and military applications. Journal of Bridge Engineering, v. 13, n. 4, p. 388–397, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:4\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:4(388)).
- [11] HORNBECK, B.; KLUCK, J.; CONNOR, R. Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment. Warren MI: Tacom Research Development and Engineering Center Warren MI, 2005.
- [12] TEIXEIRA, A. M. A. J.; PFEIL, M. S.; BATTISTA, R. C. Viga Treliçada com Perfis Pultrudados e Conexões Metálicas para Ponte Desmontável. Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, v. 35, 2012.
- [13] TEIXEIRA, A.M.A.J.; PFEIL, M. S.; BATTISTA, R. C. Structural evaluation of a GFRP truss girder for a deployable bridge. Composite Structures, v. 110, p. 29-38, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.014>.
- [14] CARNEIRO, F. L. Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.
- [15] WIGHT, R. G.; ERKI, M. A.; SHYU, C. T.; TANOVIC, R.; HEFFERNAN, P. J. Development of FRP short-span deployable bridge – experimental results. Journal of Bridge Engineering, v. 11, n. 4, p. 489–498, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:4\(489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:4(489)).

- [16] ZHANG, D.; ZHAO, Q.; HUANG, Y.; LI, F.; CHEN, H.; MIAO, D. Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system. *Composite Structures*, v. 108, p. 600–615, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.058>.
- [17] CHINESE ARMY. China National Military Standard. General Code for Military Bridge Design. Beijing: China National Military Standard, 1992.
- [18] HUNG, H. H.; SUNG, Y. C.; CHANG, K. C.; YIN, S. H.; YEH, F. Y. Experimental testing and numerical simulation of a temporary rescue bridge using GFRP composite materials. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 181–193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.199>
- [19] YEH, F. Y.; CHANG, K.-C.; SUNG, Y.C.; HUNG, H. H.; CHOU, C. C. A novel composite bridge for emergency disaster relief: concept and verification. *Composite Structures*, v. 127, p. 199–210, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.012>
- [20] AVIBRÁS INDÚSTRIA AEROESPACIAL. Informações AV LMU. 2017.
- [21] CLARKE, J. L. (ed). Structural design of polymer composites – Eurocomp. design code and background document. Abingdon: Taylor & Francis, 1996.