



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

CAP ENG MARCOS VASCONCELOS DINIZ

**PONTE MILITAR EM MATERIAL COMPÓSITO FIBRA DE VIDRO:
ESTUDO COMPARATIVO E ANÁLISE DO PROCESSO DE MONTAGEM**

**Rio de Janeiro
2020**



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

CAP ENG MARCOS VASCONCELOS DINIZ

**PONTE MILITAR EM MATERIAL COMPÓSITO FIBRA DE VIDRO:
ESTUDO COMPARATIVO E ANÁLISE DO PROCESSO DE MONTAGEM**

Trabalho acadêmico apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito para a especialização em Ciências Militares com ênfase em Engenharia e Construção.

**Rio de Janeiro
2020**



MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DECEX - DESMII
ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS
(EsAO/1919)

DIVISÃO DE ENSINO / SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Cap Eng MARCOS VASCONCELOS DINIZ

Título: PONTE MILITAR EM MATERIAL COMPÓSITO FIBRA DE VIDRO:
ESTUDO COMPARATIVO E ANÁLISE DO PROCESSO DE MONTAGEM

Trabalho Acadêmico, apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito parcial para a obtenção da especialização em Ciências Militares, com ênfase em Gestão Operacional, pós-graduação universitária lato sensu.

APROVADO EM _____/_____/_____ CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Membro	Menção Atribuída
_____ JOSÉ MAURÍCIO NETO - Maj 1º Membro e Orientador	
_____ ARACATY ANDRADE SARAIVA - Maj 2º Membro	
_____ LUIS AUGUSTO LOPES JÚNIOR - Maj 3º Membro	

MARCOS VASCONCELOS DINIZ – Cap
Aluno

PONTE MILITAR EM MATERIAL COMPÓSITO FIBRA DE VIDRO: ESTUDO COMPARATIVO E ANÁLISE DO PROCESSO DE MONTAGEM

Marcos Vasconcelos Diniz*
José Maurício Neto**

RESUMO

O artigo buscou reunir as principais informações a respeito das pontes desmontáveis existentes no Exército Brasileiro e das pontes em material compósito de fibra em desenvolvimento ao redor do mundo. O trabalho apresentou os resultados obtidos na montagem e ensaio estático até a ruptura de uma ponte desmontável de fibra de vidro e resina concebida para o emprego em situações militares ou em situação de apoio à Defesa Civil. É apresentado, ainda, um comparativo dos procedimentos de montagem entre a ponte em GFRP e as equipagens de ponte de dotação dos Batalhões de Engenharia de Combate do Exército Brasileiro, indicando as vantagens logísticas no transporte dos materiais e dos procedimentos de montagem no campo.

Palavras-chave: Pontes. Materiais Compósitos. FRP. GFRP. Estruturas. Ponte Militar de Fibra.

ABSTRACT

This paper presents the main information about the Brazilian Army's dismountable military bridges and Fiber Reinforced Polymer bridges on develop around the world. The research presented the procedures for the construction and static structural tests of a scaled model of a Glass Fiber Reinforced Polymer bridge which project has been made for combat and to support emergency situations. A comparative study between the military and GFRP bridges is presented as well and indicates several advantages, especially about transportation logistics and field construction of them.

Key words: Bridges. Composites Materials. FRP. GFRP. Structures. Fiber Military Bridge.

* Capitão da Arma de Engenharia. Bacharel em Ciências Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN) em 2007. Mestre em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 2018.

** Major da Arma de Engenharia. Bacharel em Ciências Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN) em 2005. Pós-graduado em Ciências Militares pela Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais (AMAN) em 2010.

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 de vidro, enquanto a matriz polimérica, normalmente, poliéster, epóxica, fenólica ou éster vinílica (TEIXEIRA, 2007).

Há diversos processos de fabricação dos polímeros reforçados com fibras, sendo a pultrusão um dos processos mais utilizados (Figura 1), 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).

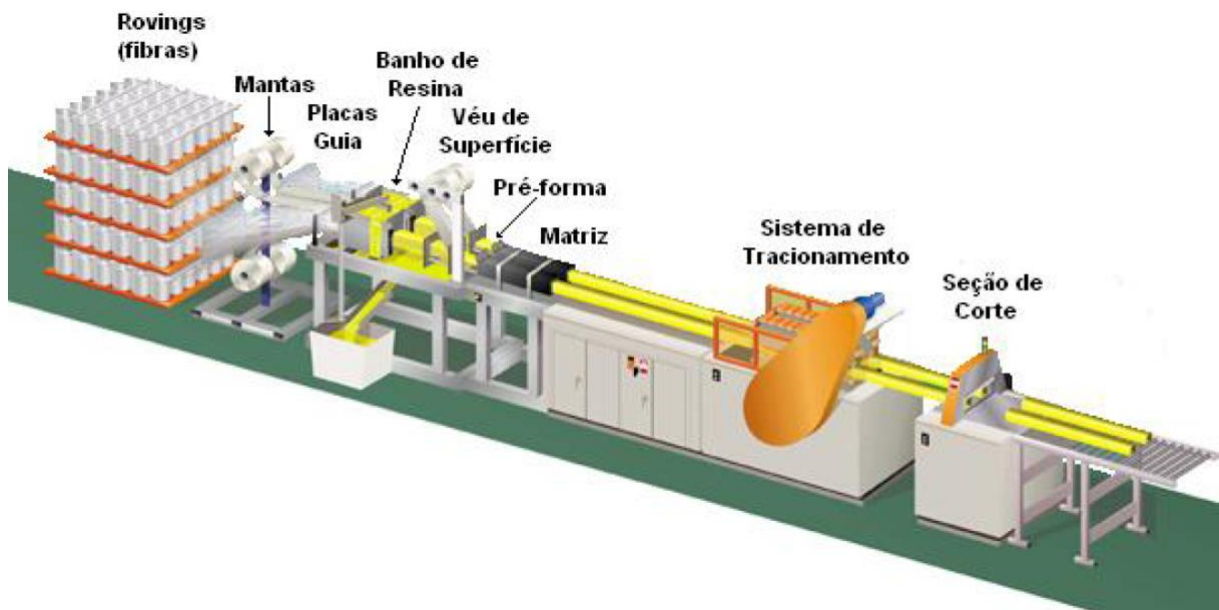


FIGURA 1 – Esquema de produção de perfis pFRP por pultrusão
Fonte: BORGES, 2004, p. 39

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 moldados no formato do perfil desejado. O posicionamento das fibras longas na direção longitudinal do perfil 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 (MARSH, 2000).

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, a elevada energia de absorção de impacto, imunidade à corrosão e a estabilidade dimensional (TEIXEIRA, 2007).



FIGURA 2 – Exemplos de perfis fabricados por pultrusão

Fonte: EMPRESA COGUMELO LTDA, disponível em: <http://cogumelo.com.br/linha-industrial/perfis-customizados>, acessado em fevereiro de 2020.

Tais características tornam atrativa a utilização desses materiais em pontes e passarelas desmontáveis, cujas principais vantagens são: redução do peso das estruturas e conseqüente diminuição dos custos com mão-de-obra para sua montagem, possibilidade de fabricação de perfis específicos (Figura 2) facilitando o transporte e instalação (ASCIONE et al, 2016).

Essas vantagens podem ser aproveitadas também para o emprego de estruturas em atividades relacionadas ao combate. Países ao redor do mundo tem desenvolvido projetos com a utilização de materiais FRP principalmente em pontes de pequena brecha para seus exércitos, conforme será apresentado ao longo deste trabalho.

1.1 PROBLEMA

O Exército Brasileiro dispõe, atualmente, de quatro modelos de pontes desmontáveis. Essas estruturas, além de serem concebidas para utilização em Operações Militares, também tem 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, estas pontes apresentam algumas desvantagens tais como: demanda de grande efetivo de mão-de-obra e utilização de equipamentos especializados de engenharia para montagem e desmontagem e necessidade de logística de transporte mais robusta, com a utilização de caminhões e viaturas especializadas (modelos específicos de veículos de uso militar com chassi e carroceria concebidos para o transporte de cargas elevadas).

A utilização de novos materiais componentes de estruturas, em especial os compósitos de fibra, são alternativas viáveis para constituírem os elementos estruturais de pontes e passarelas militares utilizadas em emprego dual (apoio à Defesa Civil e Operações Militares)?

1.2 OBJETIVOS

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 principal demonstrar a viabilidade da pesquisa em andamento de uma ponte desmontável em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer) que está sendo desenvolvida pelo Instituto Militar de Engenharia em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ no que tange à facilidade de montagem e de emprego da estrutura.

Para que seja possível alcançar o objetivo principal dessa pesquisa, houve a necessidade de formular objetivos específicos, a seguir apresentados, de tal forma que o raciocínio lógico seja atendido neste estudo:

a) Identificar os tipos de pontes desmontáveis existentes no Exército Brasileiro, com o destaque sobre suas capacidades de suporte, tempo de montagem e particularidades quanto ao manuseio e transporte de suas peças componentes;

- b) Reunir os principais trabalhos publicados com perfis de FRP na fabricação de estruturas de pontes e passarelas de emprego civil e militar no Brasil e no mundo em uma revisão bibliográfica;
- c) Conhecer os elementos de projeto da ponte desmontável em material fibra de vidro em desenvolvimento pelo Exército Brasileiro em parceria com a COPPE/UFRJ;
- d) Verificar os procedimentos de montagem do modelo reduzido desta ponte;
- e) Comparar os resultados obtidos com os parâmetros das pontes existentes e concluir acerca da viabilidade e das vantagens da ponte constituída por elementos de fibra de vidro.

1.3 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

O Brasil tem apresentado, anualmente, problemas no sistema de transportes rodoviário, em que uma parte deles é provocada pelo efeito de fortes chuvas aliado à infraestrutura precária e à manutenção inadequada das rodovias às quais podem vir a ser interditadas total ou parcialmente, dificultando o acesso às localidades que passam à situação de emergência ou de calamidade.

Em 2019, dos 5.570 municípios brasileiros, 1.270 foram registrados no Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil com problemas de calamidade pública relacionados a intempéries dos quais um total de 769.505 eventos foram declarados como danos às obras de infraestrutura pública (destruídas e danificadas). O valor acumulado de eventos dos últimos 10 anos indica que em média 28% dos municípios brasileiros estiveram em situações semelhantes (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2020).

Nesse contexto de reincidência de problemas de mobilidade ocasionadas por calamidades públicas é que surge a necessidade de estruturas de pontes desmontáveis para o restabelecimento, ainda que temporário, dos acessos de transportes dessas localidades.

Sob a ótica das Operações Militares, novos materiais e estruturas de baixo peso aumentam a versatilidade do emprego de pontes, garantindo a mobilidade das tropas, especialmente nas pequenas brechas.

Assim, este artigo se justifica por procurar promover um estudo comparativo sobre os materiais compósitos empregados em estruturas de pontes ao redor do mundo e no Brasil, de forma a criar conhecimento crítico para futuros pesquisadores do assunto assim como para outros estudos teóricos que possam ser realizados na mesma linha de pesquisa.

2 METODOLOGIA

Com a finalidade de encontrar soluções para o problema proposto, o delineamento deste trabalho buscou embasamento teórico na revisão da literatura acerca das equipagens de pontes existentes no Exército e de pontes de fibras estudadas no mundo. Além disso, foi feito o estudo de uma montagem realizada pelos autores do modelo reduzido da ponte em desenvolvimento pela parceria do Exército Brasileiro e pela UFRJ e a análise comparativa com as pontes existentes.

Um questionário foi formulado e remetido aos Militares da Arma de Engenharia quanto à sua opinião acerca da utilização das pontes existentes em situações de calamidade pública, da utilização de materiais alternativos (em especial os compósitos) e da importância do desenvolvimento de novas estruturas com características diferentes das já utilizadas.

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

Neste estudo, buscou-se reunir as informações acerca das pontes existentes no Exército Brasileiro e daquelas que foram ou estão em desenvolvimento em trabalhos ao redor do mundo nos últimos anos.

2.1.1 Pontes Militares do Exército Brasileiro

A seguir, são apresentadas as principais características e as informações referentes ao transporte e montagem das equipagens de pontes existentes no Exército Brasileiro:

2.1.1.1 Ponte Bailey M2 (BRASIL, 1976)

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/m^3 . Cada painel tem $3,084 \text{ m}$ de comprimento e $1,5 \text{ m}$ de altura (Figura 3) e pesa $2,62 \text{ kN}$ ($267,17 \text{ kgf}$).

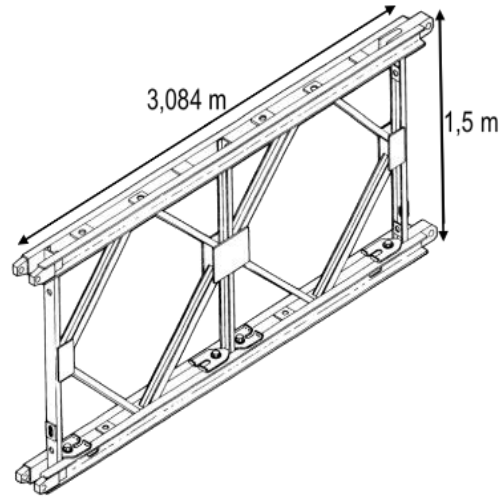


FIGURA 3 – Painel Bailey tipo M2
Fonte: BRASIL, 1976, p. 22

A ponte Bailey pode ser montada em configurações com uma 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 $4,34 \text{ metros}$ e a largura útil para viaturas é de $3,81 \text{ metros}$. A Figura 4 mostra uma ponte Bailey M2 dupla-simples com 22 metros de comprimento.



FIGURA 4 – Ponte Bailey dupla-simples
Fonte: BRASIL, 1976

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Bailey é de, aproximadamente, 64 metros para um trem tipo de 333 kN ($33,96 \text{ ton}$) na configuração tripla-simples e o trem tipo máximo de 1120 kN ($114,21 \text{ ton}$) para um vão de 25 metros 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 (BRASIL, 1976) prevê a organização de todo material para a montagem da ponte em conjuntos pré-determinados com volume e peso compatíveis com as viaturas especializadas de transporte, as chamadas “cargas-tipo”, que variam conforme a configuração e comprimento de ponte a ser montada.

A Figura 5 mostra um esquema de carga-tipo de transporte de painéis de ponte na carroceria de um caminhão basculante.

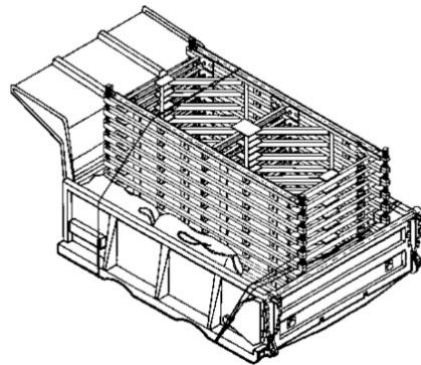


FIGURA 5 – Carga-tipo de painéis na carroceria de um caminhão basculante
Fonte: BRASIL, 1976

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 metros tem peso próprio de 209 kN (21,31 ton) e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento tem peso total de 68 kN (6,93 ton), sendo necessário o transporte de uma carga total de 280 kN (28,55 ton), aproximadamente.

A estrutura 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. A Figura 6 mostra o esquema de um dos tipos de montagem da ponte.

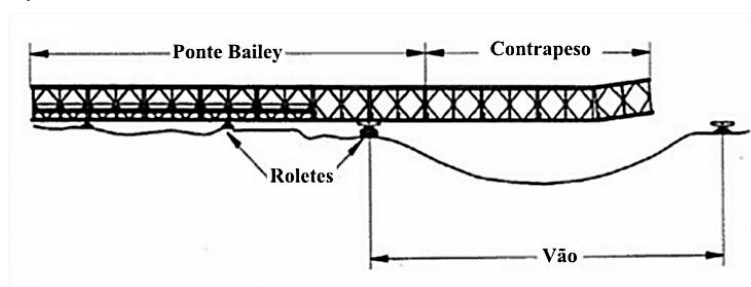


FIGURA 6 – Vista longitudinal da ponte lançada sobre o vão
Fonte: BRASIL, 1976

Para a montagem manual de uma ponte simples-simples de 15,42 metros de comprimento, em oito horas, é necessário o emprego mínimo de 33 militares (01 Pelotão).

2.1.1.2 Ponte M4T6 (BRASIL, 1975)

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

Na configuração biapoiada, o vão máximo a ser vencido é de 13,71 metros para um trem tipo de até 390 kN (39,77 ton), sendo sua capacidade máxima de suporte de 1127 kN (114,92 ton) para um vão de 4,57 metros.

A Figura 7 mostra as vigas componentes e a Figura 8 apresenta uma ponte biapoiada durante a montagem.

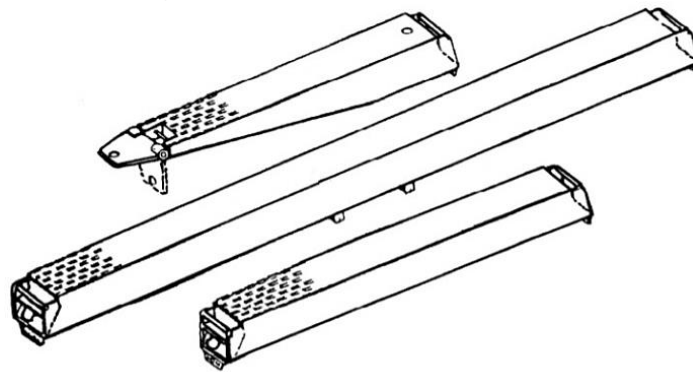


FIGURA 7 – Vigas componentes da ponte M4T6
Fonte: BRASIL, 1975



FIGURA 8 – Ponte M4T6 biapoiada durante a montagem
Fonte: DINIZ, 2018

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 (7,51 ton) para a construção de uma ponte com 13,71 metros, cujo peso próprio é de 54,72 kN (5,58 ton).

A montagem da estrutura pode ser feita apenas com ferramental simples ou ainda utilizar guindaste para a colocação da estrutura sobre o vão. São necessários 15 militares (01 grupo de Engenharia +) para a montagem dessa ponte, num tempo total de 2 horas e meia.

2.1.1.3 Ponte COMPACT200 (BRASIL, 2005)

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, de peso específico de 77 kN/m³. Cada painel possui comprimento de 3,084 metros e altura de 2,22 metros (Fig. 7) com peso total de 4 kN (407,89 kgf).

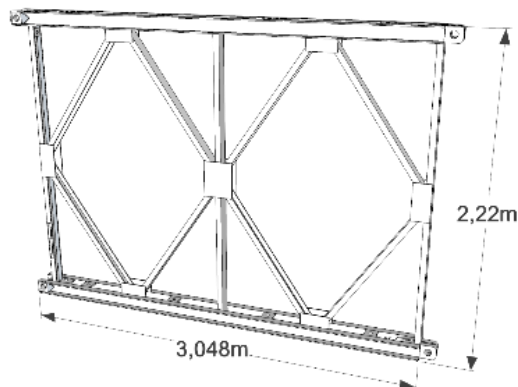


FIGURA 9 – Painel COMPACT 200
Fonte: BRASIL, 2005

A ponte Compact200 pode ser montada em configurações com 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 metros e a largura útil para viaturas é de 4,20 metros nas configurações standard e 5,30 na configuração *extra wide* (na qual o comprimento das vigas transversais são maiores).

A ponte, apesar de ser utilizada como ponte temporária no Exército Brasileiro, foi concebida para instalação semipermanente. A Figura 10 mostra uma ponte dupla-simples com 18 metros de comprimento.

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Compact200 é de, aproximadamente, 56 metros para um trem tipo de 426 kN (43,44 ton) na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1043 kN (106,36 ton) para um vão de 43 metros na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura exige a utilização de viaturas especializadas tais como caminhões do tipo bi trem. Os manuais existentes não preveem sistema de cargas-tipo para organização dos materiais para o transporte como na Ponte Bailey.

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 metros de comprimento tem peso próprio de 304 kN (30,99 ton) e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento tem peso total de 107 kN (10,91 ton), sendo necessário o transporte de uma carga total de 411 kN (41,91 ton), aproximadamente.



FIGURA 10 – Ponte Compact200 dupla simples
Fonte: BRASIL, 2005

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

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

2.1.1.4 Ponte LSB (BRASIL, 2019)

Esta ponte, de fabricação inglesa, foi adquirida pelo Exército Brasileiro em 2010 e consiste na evolução do projeto da Ponte Compact200, de emprego militar com rampas desmontáveis de inclinação ajustável.

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 o piso, tudo de aço.

Os painéis são de aço galvanizado tipo BS 4360, cujo peso específico é 77 kN/m^3 . Cada painel possui comprimento de 3,084 metros e altura de 2,22 metros, idênticos aos da ponte COMPACT 200 (Figura 9), com peso total de 4 kN (407,89 kgf).

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

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem da LSB é de, aproximadamente, 56 metros para um trem tipo de 426 kN (43,44 ton) na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1160 kN (118,29 ton) para um vão de 40 metros na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura, assim como na ponte Compact200, exige a utilização de viaturas especializadas tais 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 Figura 11 o material organizado no interior de um dos vagões do caminhão tipo bitrem para a montagem de ponte do tipo simples-simples.

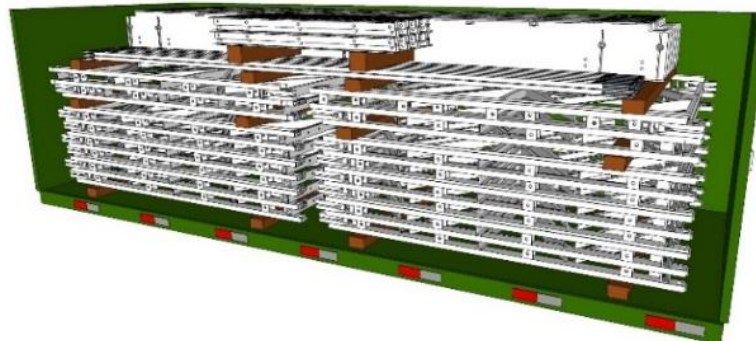


FIGURA 11 – Material organizado para a montagem da ponte
Fonte: BRASIL, 2019

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 metros de comprimento tem peso próprio de 256 kN (26,10 ton). Os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento têm peso total de 111 kN (11,32 ton) e as rampas articuladas tem peso de 186 kN (18,97 ton) sendo necessário o transporte de uma carga total de 553 kN (56,39), aproximadamente.

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

2.1.2 Pontes e Passarelas em Material FRP

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

2.1.2.1 Ponte Veicular com Vigas Trelçadas de GFRP (SEDLACEK & TRUMPF, 2004)

A Universidade de Aachen, na Alemanha, desenvolveu uma ponte veicular de comprimento de 20 metros para um trem-tipo de 109 kN (11,11 ton) em cinco módulos desmontáveis, com largura útil de 2,75 metros (Figura 12).

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

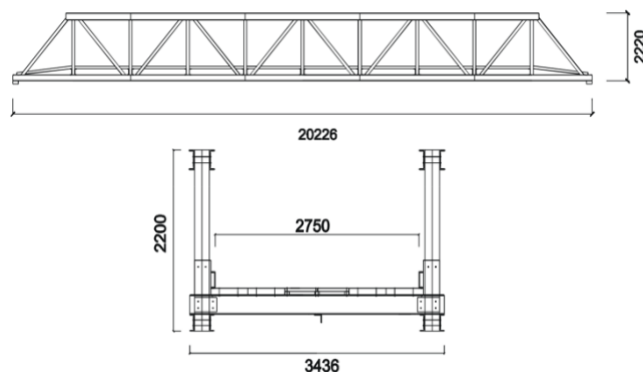


FIGURA 12 – Elevação longitudinal e seção transversal da ponte (dimensões em mm)
Fonte: SEDLACEK & TRUMPF, 2004

Por ser constituída de material leve, a montagem da ponte foi feita diretamente no local por pessoal inexperiente e com a utilização de ferramental simples, num prazo total de três horas. O peso próprio da estrutura montada foi de 50 kN (5,10 ton). A carga e ruptura foi de 350 kN (35,69 ton). A ponte atendeu os requisitos de resistência,

flecha e facilidade de transporte e montagem. A Figura 13 mostra o veículo de classe MLC (*Military Loading Classification*) 12 realizando passagem sobre a estrutura montada.



FIGURA 13 – Ponte montada e passagem de viatura CI 16
Fonte: SEDLACEK & TRUMPF, 2004

2.1.2.2 Ponte Veicular de GFRP (KOSTOPOULOS et al, 2005)

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.

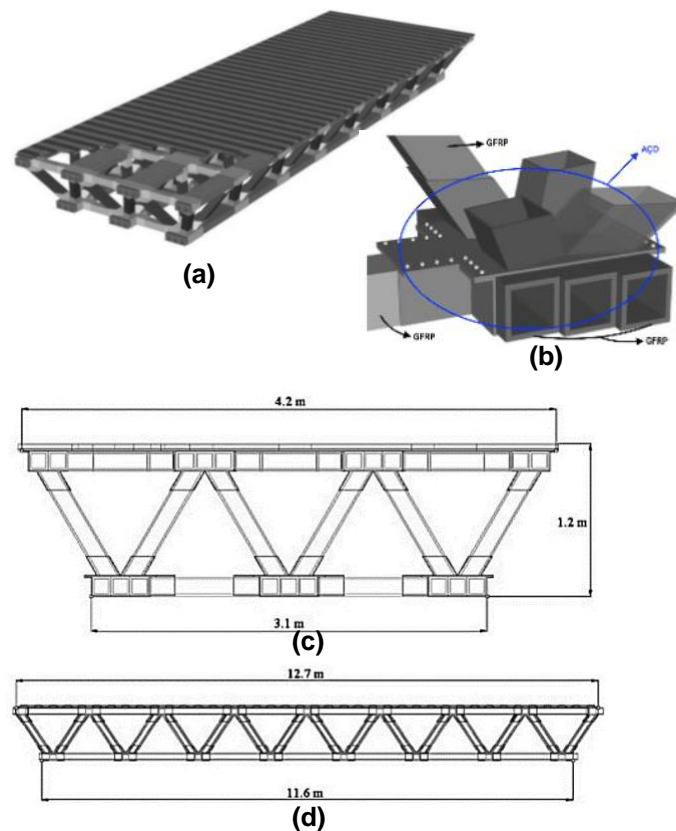


FIGURA 14 – Ponte veicular de GFRP: (a) vista geral, (b) detalhe dos nós de aço, (c) seção transversal e (d) vista longitudinal
Fonte: KOSTOPOUOS et al., 2005

A estrutura foi projetada para vencer um vão de 11,6 metros com largura útil do tabuleiro com 4,2 metros de largura, conforme mostrado na Figura 14, com capacidade de suportar um trem tipo de até 300 kN (30,59 ton). Os elementos estruturais de pGFRP são de seção transversal quadrada, tendo sido 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 (12,95 ton) e foi transportada até o local em um caminhão. Sua instalação durou duas horas e necessitou de dois guindastes para o posicionamento. As Figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a estrutura sendo transportada e posicionada sobre o vão.



FIGURA 15 – Transporte da estrutura sobre caminhão
Fonte: KOSTOPOUOS et al., 2005



FIGURA 16 – Instalação da ponte sobre o vão com o auxílio de guindastes
Fonte: KOSTOPOUOS et al., 2005

2.1.2.3 Pontilhão Militar (PPB) de FRP (M. J., R., & J. B., 2008)

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 Figura 17 a seguir.

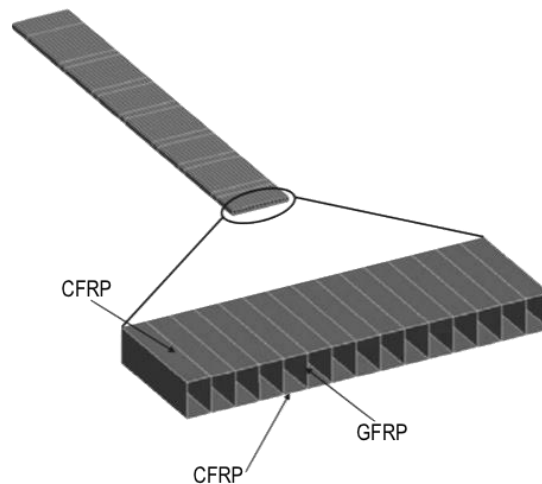


FIGURA 17 – Um piso de rodagem do pontilhão militar (PPB) de FRP
Fonte: M. J., R., & J. B., 2008

O trem tipo adotado para este projeto foi de 270 kN (27,53 ton) (MLC 30), determinado a partir do que prescreve o *Trilateral Design and Test Codes for Military Bridging and Gap-crossing Equipment – TDTC* (ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 2005), uma Norma Americana para o Projeto de Estruturas de Pontes Militares.

O sistema estrutural é composto 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 do tipo E resina epóxica). A Figura 18 mostra a seção transversal do piso de rodagem.

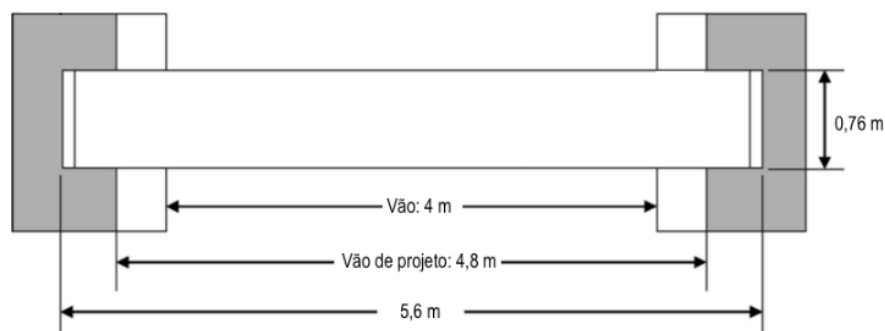


FIGURA 18 – Seção transversal de um dos pisos de rodagem
Fonte: M. J., R., & J. B., 2008

O pontilhão foi colocado sobre o vão facilmente. Cada piso de rolamento tem 2,03 kN (207 kgf), num total de 4,06 kN (414 kgf) no total.



FIGURA 19 – Passagem de um veículo de classe MLC 30 sobre o pontilhão
Fonte: M. J., R., & J. B., 2008

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

2.1.2.4 Ponte de Material Compósito Fibra de Vidro (TEIXEIRA, 2007)

Com vistas a apresentar uma alternativa à utilização das pontes militares do Exército Brasileiro em apoio à Defesa Civil, uma ponte desmontável em material compósito fibra de vidro vem sendo desenvolvida desde 2007 em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

Neste projeto, os autores conceberam e desenvolveram um sistema de ponte desmontável em GFRP, para vencer um vão de até 30 metros, com largura total de quatro metros e capacidade de suportar um veículo de até 280 kN (28,55 ton).

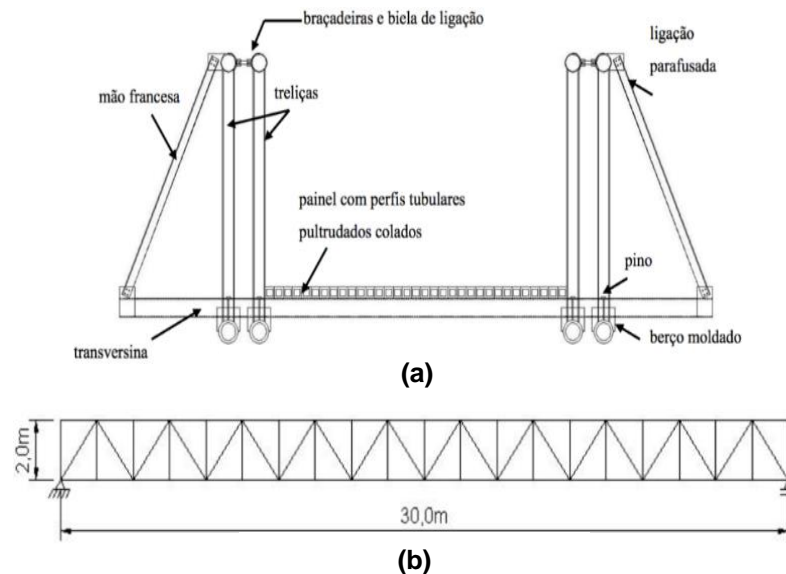


FIGURA 20 – Ponte Desmontável: (a) seção transversal, (b) esquema estrutural das vigas
Fonte: TEIXEIRA, 2007

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 interior deles;
- 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; e
- piso com perfis pultrudados tubulares colados.

As vigas treliçadas foram projetadas em escala real, porém, para a viabilidade econômica do teste das mesmas em laboratório, foi desenvolvido um modelo reduzido na escala 1:2,3 a partir da Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (CARNEIRO, 1993), de forma que este pudesse refletir, satisfatoriamente, o comportamento do modelo 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 foi muito inferior à resistência do material obtida nos ensaios de caracterização mecânica, tendo ocorrido a ruptura por rasgamento da chapa ou por contato do furo no parafuso, concluindo 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 de ponte desmontável.

A concepção da ligação por contato ativada pela pré-tração de fios de aço dispostos nos tubos de GFRP constituiu numa das inovações desse projeto, além do detalhamento e fabricação das juntas metálicas para executar a união das peças e formar o sistema treliçado, conforme mostrado na Figura 21.

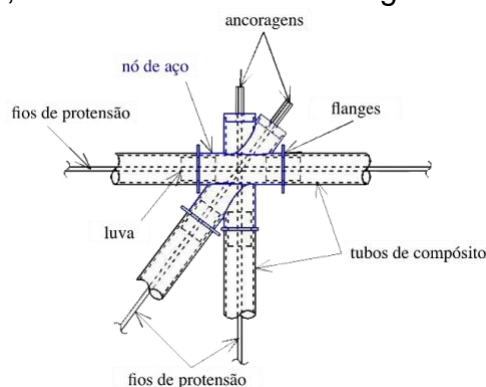


FIGURA 21 – Detalhe tubo-nó da viga treliçada
Fonte: TEIXEIRA, 2007

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. Esses nós foram fabricados com um batente interno para apoio das extremidades dos tubos de GFRP e com diâmetro interno igual ao diâmetro externo do tubo de GFRP. Um nó comum e nó central do banzo inferior e um nó comum e nó central do banzo superior da treliça são apresentados na Figura 22.

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 Figura 23.

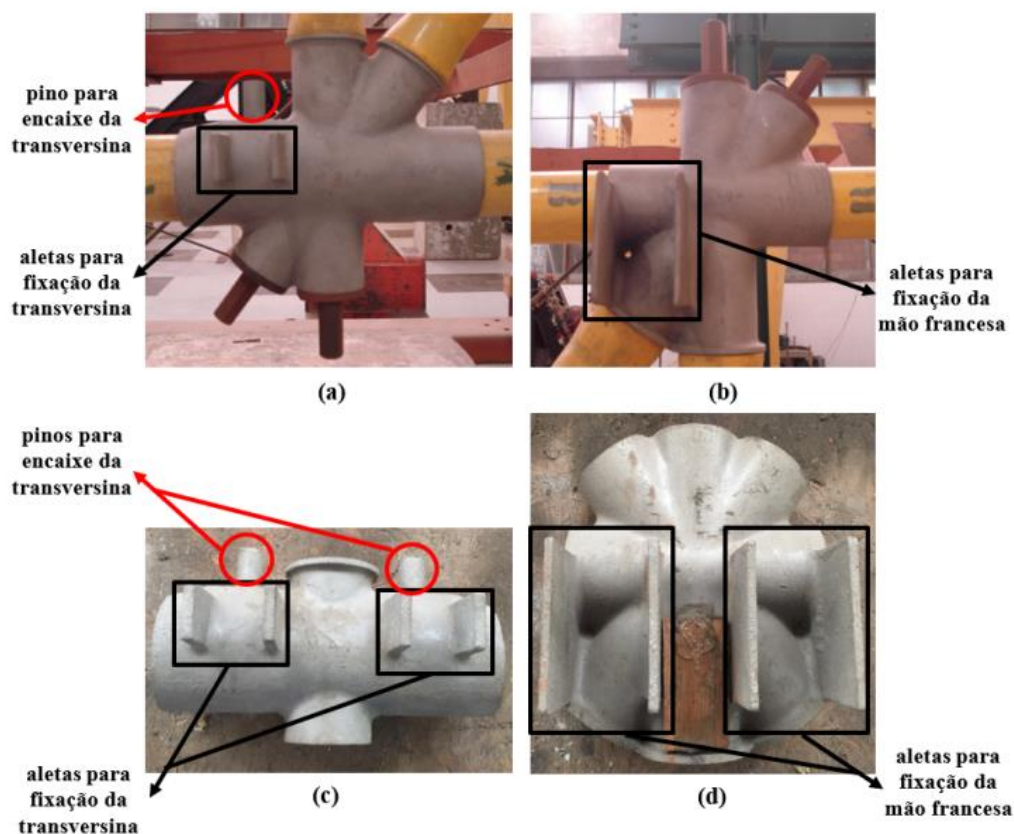


FIGURA 22 – Nós de alumínio: (a) nó inferior, (b) nó superior, (c) central inferior e (d) central superior
Fonte: DINIZ, 2018

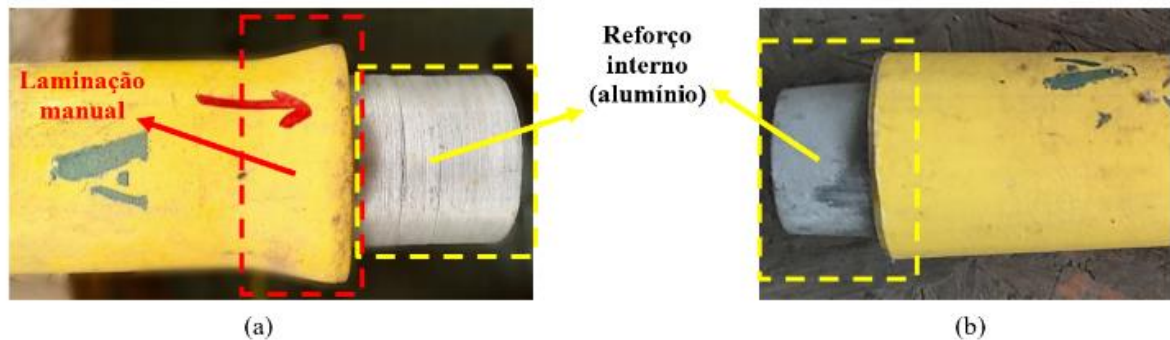


FIGURA 23 – Reforços nos elementos: (a) montantes e diagonais e (b) banzos superior e inferior
Fonte: DINIZ, 2018

A teoria da semelhança dos modelos físicos (CARNEIRO, 1993) 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 projetada 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: $k_{\gamma_{aparente}} = 1/k_1 = 2,3$;
- peso próprio: $k_{pp} = k_{13} = 1/(2,3)^3$
- 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 metros de comprimento (equivalente ao comprimento de 30 metros para protótipo, sendo obedecido o fator de escala adotado de 1:2,3).

Em um primeiro momento, foram utilizados nós de aço com reforço de jaquetas de aço, luvas de aço e luvas de compósito nos nós, conforme mostrado na Figura 24.

A carga de ruptura obtida neste ensaio foi de 46 kN (4,69 ton), equivalente a 560 kN (57,10 kN) de carga esperada no protótipo, de acordo com a Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (CARNEIRO, 1993) e ocorreu por flambagem lateral da viga.

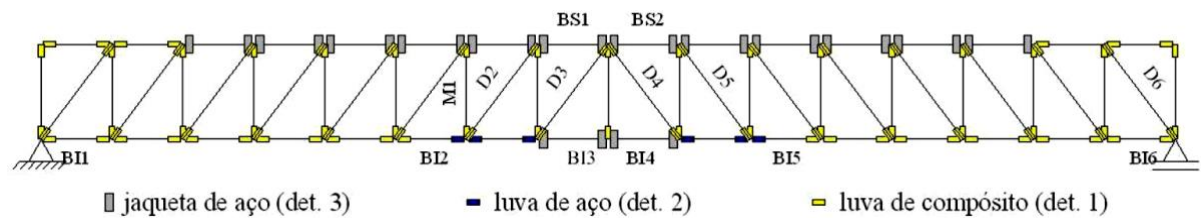


FIGURA 24 – Ligações adotadas nos primeiros ensaios
Fonte: TEIXEIRA, 2007

Posteriormente, os nós de aço foram substituídos por nós de alumínio com reforços feitos por luvas de alumínio nas ligações tubo pGFRP-nós, conforme mostrado na Figura 25.

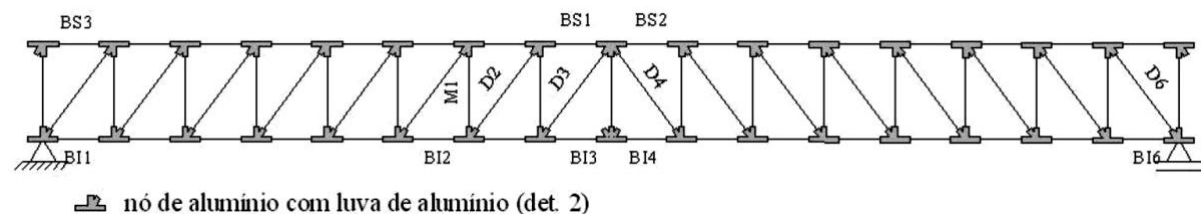


FIGURA 25 – Ligações adotadas nos ensaios seguintes
Fonte: TEIXEIRA, 2007

Com a utilização dos nós de alumínio, a ruptura também ocorreu devido à flambagem lateral da viga, para uma carga estática de 42 kN (4,28 ton), o equivalente a 511 kN (52,11 ton) de carga esperada para o protótipo, de acordo com a Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (CARNEIRO, 1993).

Como o carregamento no modelo não tem a mesma distribuição espacial do carregamento de projeto da ponte (três pontos 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 satisfaz os requisitos de projeto e segurança requeridos para a estrutura e que o momento resistente de projeto (1141,5 kN.m) foi superior ao momento solicitante de projeto no protótipo (982,7 kN.m). Tais implicações viabilizaram a continuação do projeto de montagem da ponte completa.

2.1.2.4 Pontilhão para Emprego Dual em GFRP (WIGHT et al, 2006)

O Exército do Canadá desenvolveu uma ponte para pequenas brechas, para emprego tanto em atividades militares quanto ao apoio à Defesa Civil em catástrofes naturais. O projeto utilizou materiais leves e baratos de maneira a viabilizar 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 $9,4^\circ$ (Figura 26). Cada piso possui 4,8 metros de comprimento, 1,2 metros de largura e altura no ponto central de 51,3 cm. A estrutura foi projetada para suportar um veículo sobre rodas de 270 kN (27,53 ton).

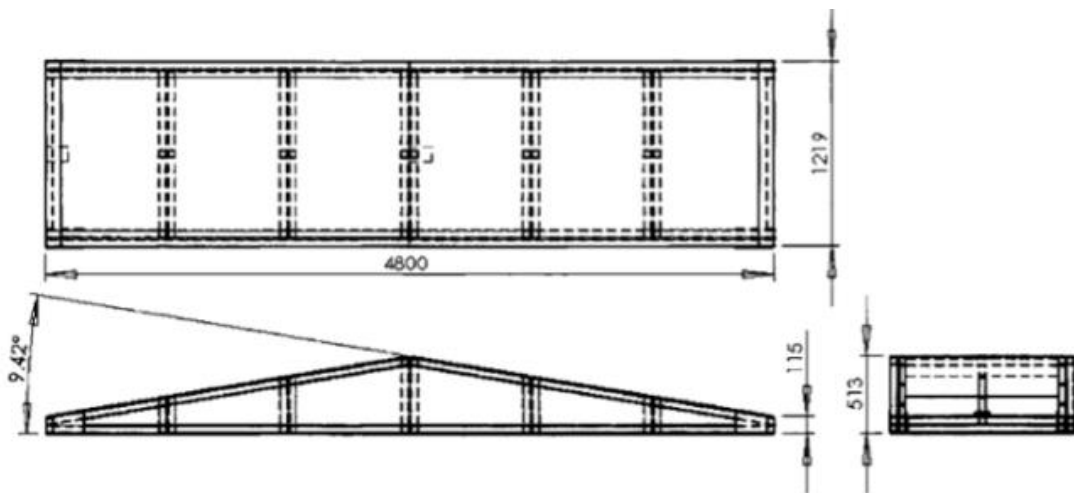


FIGURA 26 – Vista superior e em elevação de um piso de rodagem (dimensões em mm)
Fonte: WIGHT et al, 2006

As vigas foram compostas por perfis quadrados e chapas de GFRP (fibra de vidro tipo 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 pesa 2,5 kN (254,93 kgf), facilitando dessa forma o transporte e posicionamento da estrutura sobre o vão não havendo, portanto, necessidade de pessoal ou equipamento especializado para tal.

Foram realizados, ainda, testes de passagem do veículo de projeto para verificar o comportamento da estrutura (Figura 27). A conclusão dos pesquisadores foi que o pontilhão atendeu os parâmetros de projeto, havendo a necessidade de verificar as ligações coladas (pontos de fragilidade).



FIGURA 27 – Vista superior e em elevação de um piso de rodagem (dimensões em mm)
Fonte: WIGHT et al, 2006

2.1.2.5 Ponte Modular Híbrida FRP/Alumínio (ZHANG et al, 2014)

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 motivação do trabalho foi o aproveitamento das propriedades dos materiais compósitos como alternativa aos materiais tradicionais utilizados em estruturas temporárias.

A ponte foi projetada para um vão de 12 metros, largura útil de 3,2 metros (Figura 28) e capacidade para um trem tipo de 100 kN (10,20 ton) especificado no Código Geral para Projetos de Pontes Militares da China (CHINA, 1992).

Os módulos da ponte foram conectados por pinos de alumínio. As conexões dos elementos metálicos entre si foram feitas por meio de solda e dos elementos FRP com os elementos metálicos foram realizadas por contato. A Figura 29 mostra os detalhes das conexões que são semelhantes às utilizadas por Teixeira (2007). 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 (1,22 ton) possibilitando uma fácil montagem. O transporte da estrutura pode ser feito em módulos, não exigindo veículos muito grandes, simplificando a logística do transporte até os locais de montagem.

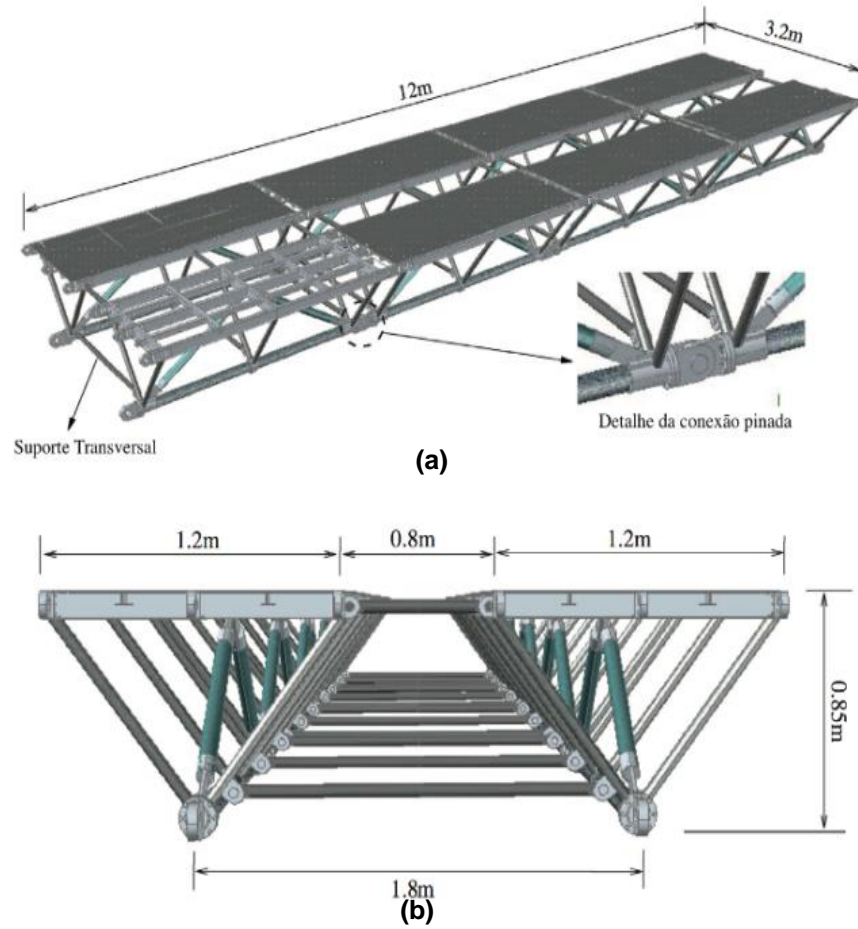


FIGURA 28 – Ponte modular híbrida. (a) vista geral, (b) seção transversal
 Fonte: ZHANG et al, 2014

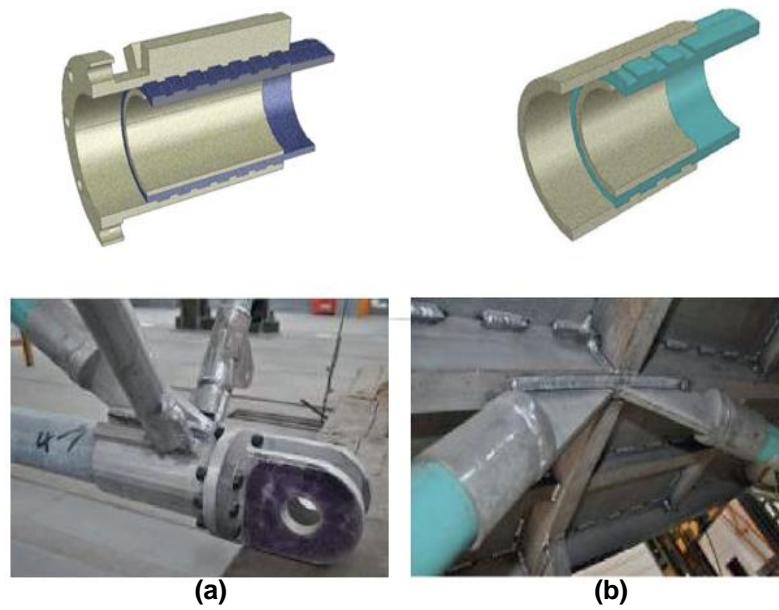


Figura 29 – Ponte modular híbrida. (a) vista geral, (b) seção transversal
 Fonte: ZHANG et al, 2014

2.1.2.6 Ponte Temporária de GFRP (HUNG et al, 2016)

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 metros de comprimento e três metros de largura, para um trem-tipo máximo de 50 kN (5,10 ton).

A estrutura bi apoiada foi composta por vigas longitudinais de perfis I pultrudadas 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. 30 a seguir.

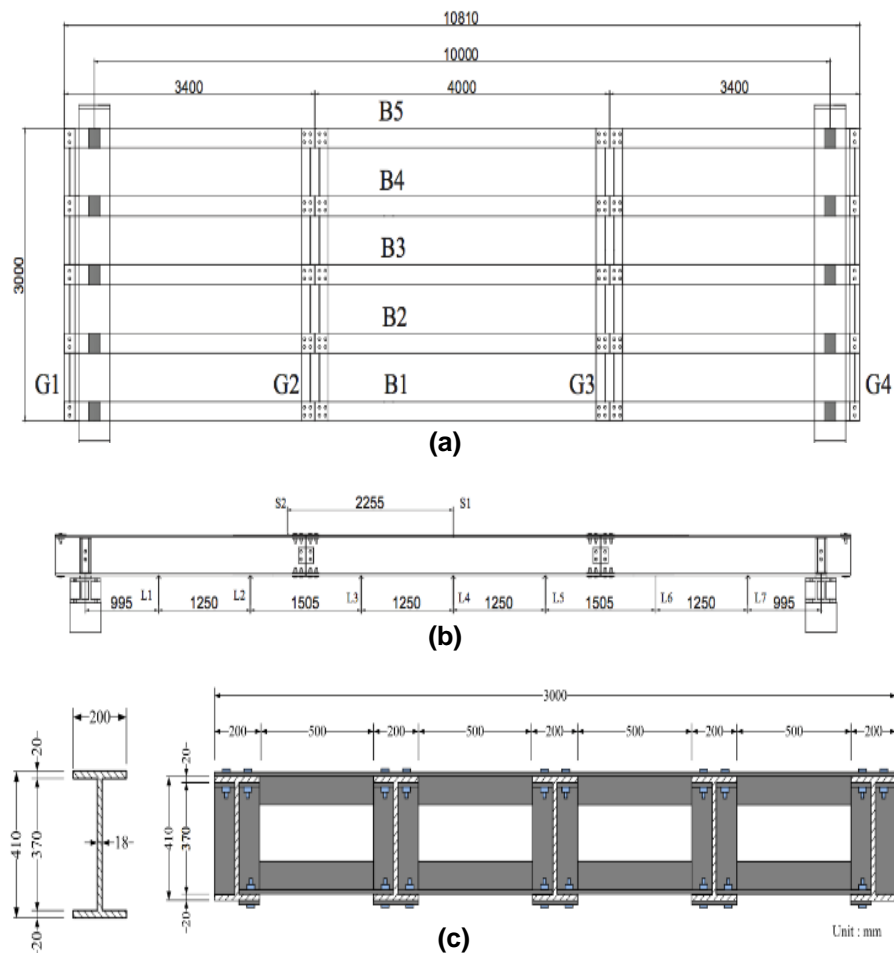


Figura 30 – Ponte: (a) vista superior, (b) elevação e (c) seção transversal e perfil I da ponte
Fonte: HUNG et al, 2016

Para o posicionamento da estrutura sobre o vão foi utilizado 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.

2.1.2.7 Ponte Emergencial Estaiada de GFRP (YEH et al, 2016)

O projeto desta ponte utiliza o mesmo sistema de tabuleiro do subitem anterior, tendo o vão de pGFRP aumentado para 20 metros. Entre os vãos de 10 metros (aço) e 20 metros (pGFRP) foi construído um pilar de aço de onde saíam os estais para suporte do tabuleiro conforme mostrado na Figura 31. O trem-tipo de projeto foi mantido em 50 kN (5,10 ton).

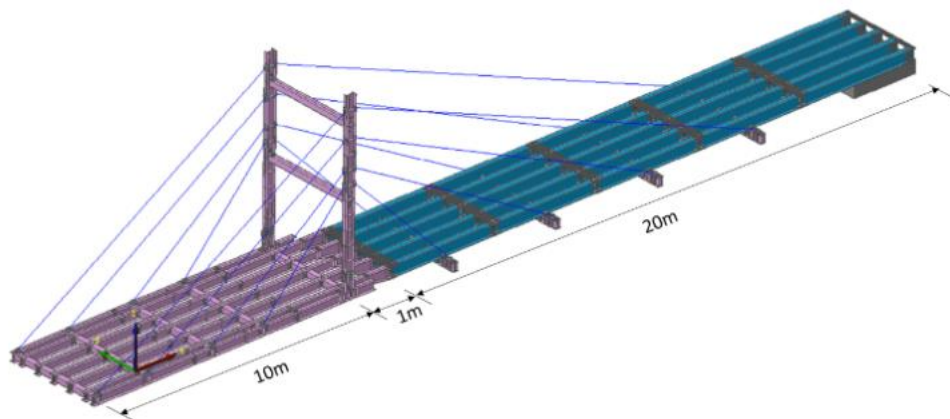


Figura 31 – Esquema de ponte estaiada com pGFRP em azul e os elementos de aço em roxo
Fonte: YEH et al, 2016

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 Figura 32 mostra a passagem de um pequeno caminhão sobre a ponte.



Figura 32 – Passagem do veículo sobre a ponte estaiada
Fonte: YEH et al, 2016

O peso total da estrutura, considerando os elementos metálicos é de 58,84 kN (6 ton), possibilitando que a estrutura seja facilmente transportada por pequenos caminhões, facilitando consideravelmente a logística de montagem.

2.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi feita pela técnica de questionário aplicado a alguns militares da Arma de Engenharia e pela realização de um programa experimental de montagem de uma ponte em modelo reduzido, continuidade do trabalho apresentado no subitem 2.1.2.4, por um dos autores durante a realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia no ano de 2017.

2.2.1 Questionário

O questionário teve como base a opinião dos militares de Engenharia que, ao menos na formação, já tiveram contato com alguma equipagem de ponte com o objetivo de conhecer a opinião dos Militares da Arma de Engenharia quanto ao emprego de Equipagens de Pontes (LSB, Bailey e suas variações, M4T6 e suas variações e pontes semipermanentes) nas Operações de Apoio à Defesa Civil (situações de calamidade pública) e avaliar o conhecimento dos mesmos quanto a existência de outros materiais, em especial, os compósitos e sua utilização em estruturas de ponte.

Não foi estabelecido parâmetro populacional uma vez que a opinião sobre o assunto aborda todos os militares da Arma, incluindo as praças. O questionário foi respondido por 50 militares de diversos postos e graduações. Por se tratar de opinião, não há a necessidade de se estabelecer amostragem populacional estatística.

Foi utilizada a ferramenta *Google Formulários* que é gratuita e possui interface amigável. Antes de ser remetido, o questionário foi testado por três oficiais da Arma de Engenharia, não sendo encontrada nenhuma má interpretação ou impertinência nas perguntas.

2.2.2 Programa Experimental de Ponte em Material GFRP em Modelo Reduzido

Com os resultados obtidos por Teixeira (2007), foi dada continuidade nos trabalhos de desenvolvimento do projeto da Ponte em Material Compósito de forma que fosse realizada uma montagem completa da estrutura com 6,5 metros de

comprimento. Essa montagem foi realizada 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.

A Figura 33 apresenta a seção transversal da ponte, uma vista lateral e uma vista superior com o detalhamento dos elementos de contravento horizontal e vertical.

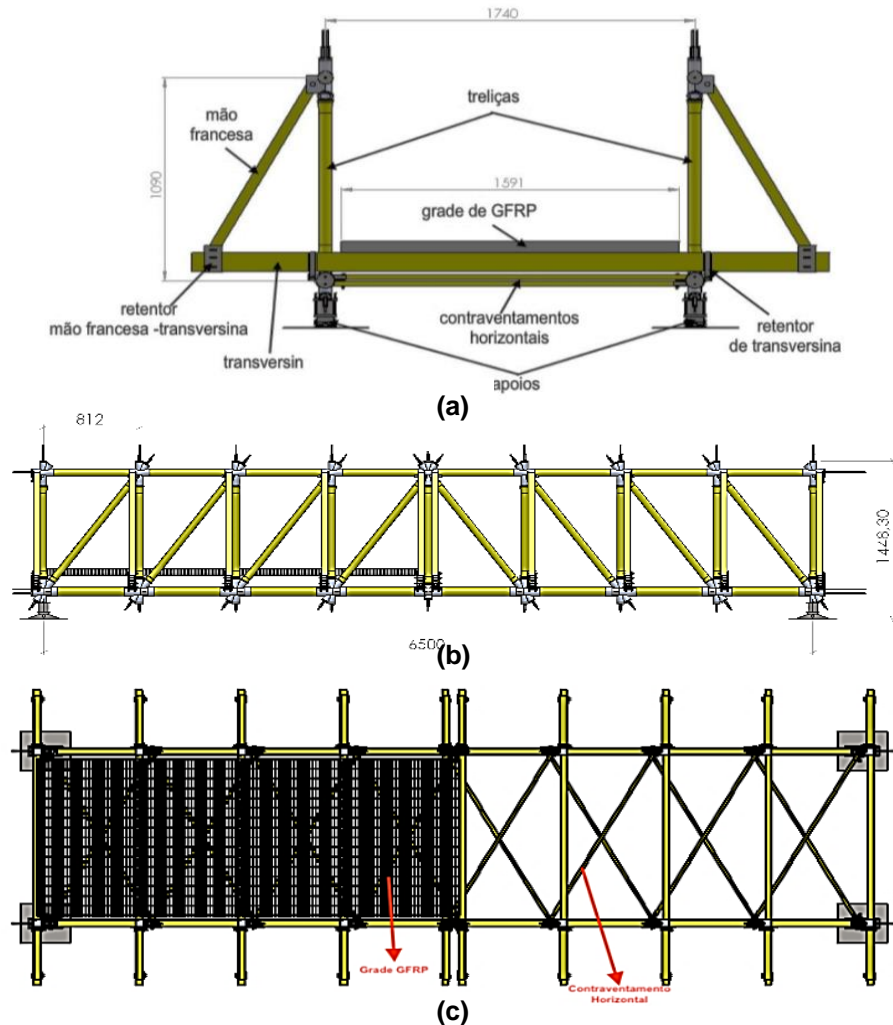


Figura 33 – Ponte do modelo reduzido: (a) seção transversal, (b) vista lateral e (c) vista superior da ponte. (dimensões em mm)

Fonte: DINIZ, 2018

Um dos objetivos da montagem foi verificar a viabilidade dos procedimentos executados, em especial na aplicação das protensões, quando da realização de montagem da estrutura no campo.

As etapas de montagem foram as seguintes: montagem das vigas nas bancadas, protensão de montantes e diagonais, protensão inicial dos banzos, içamento e assentamento das vigas, instalação dos contraventamentos horizontais, posicionamento das vigas transversais, instalação das mãos francesas,

posicionamento do piso e protensão finais dos banzos. A Figura 34 apresenta a ponte em modelo reduzido ao término de sua montagem.



Figura 34 – Ponte do modelo reduzido montada
Fonte: DINIZ, 2018

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 com 5 mm de comprimento, da marca *Kyowa* e nove flexímetros com curso de 100 mm, da marca *Kyowa* e 12 células de carga fabricadas a partir de eers (Figura 35).

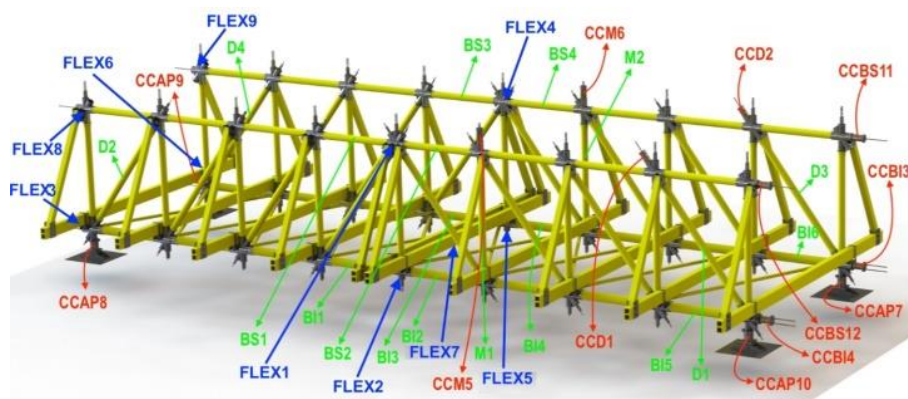


Figura 35 – Sensores utilizados na Ponte
Fonte: DINIZ, 2018

Para o sistema de carregamento foi considerado o trem tipo indicado por Teixeira (2007): a viatura AV-LMU ASTROS II, cujo peso total é de 280 kN (28,55 ton) (AVIBRÁS, 2017). Por se tratar de uma ponte de modelo reduzido, a mesma escala de 1:2,3 também foi considerada para as dimensões do trem tipo bem como suas cargas, respeitando-se o previsto na Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos

(CARNEIRO, 1993). A Figura 36 apresenta a viatura ASTROS com suas principais dimensões e a Figura 37 representa o esquema de distribuição de cargas da viatura já com as dimensões reduzidas.

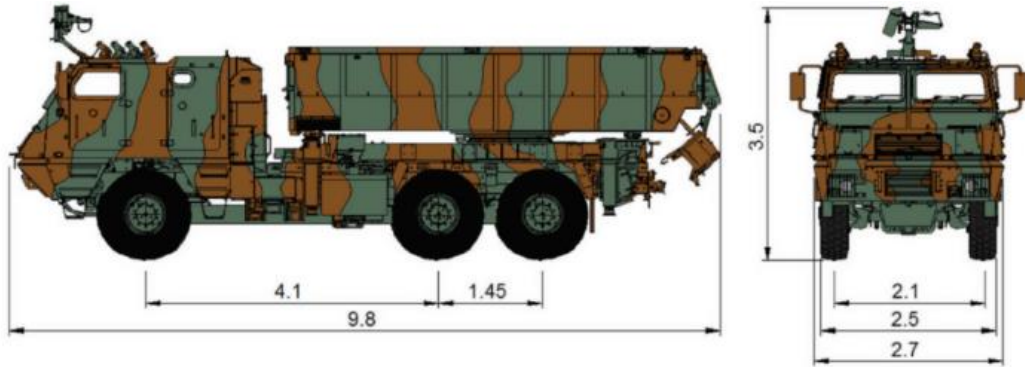


Figura 36 – Dimensões da viatura ASTROS, em metros
Fonte: AVIBRÁS, 2017

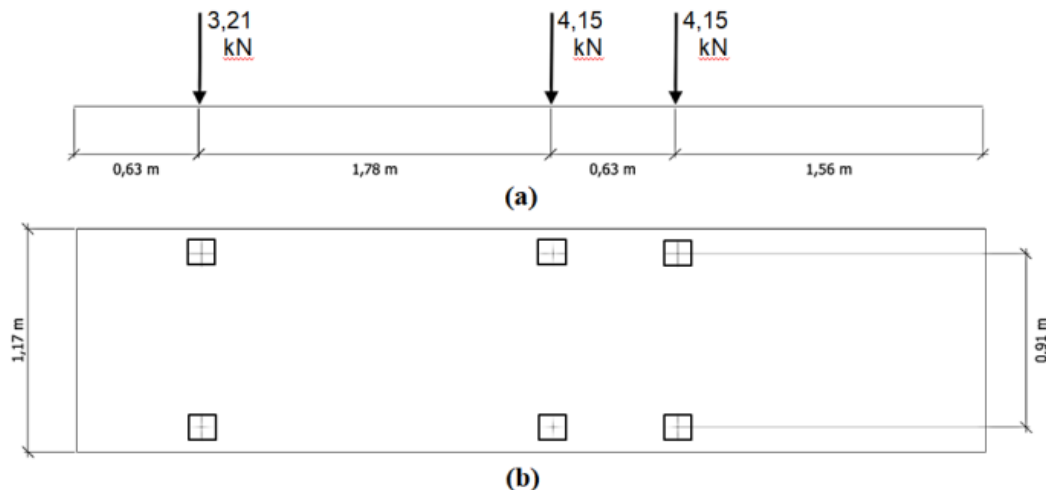


Figura 37 – Esquema do veículo e dimensões do modelo reduzido: (a) em elevação, (b) em planta
Fonte: DINIZ, 2018

Conhecidas as dimensões do veículo, foi fabricada uma estrutura de carregamento com a utilização de perfis de aço que pudesse simular os eixos da viatura. Para garantir que as cargas aplicadas à ponte não provocassem deformações na estrutura de carregamento, e conseqüentemente alterassem os valores dos resultados do teste de aplicação de carga estática, foram realizadas simulações utilizando a ferramenta SOLIDWORKS Simulation (SOLIDWORKS 2015), mostrado na Figura 38.

A estrutura, após a fabricação, foi pesada com o auxílio de uma célula de carga presa à talha, tendo sido encontrado o valor de 9,48 kN (966,69 kgf). A Figura 38 apresenta a estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte.

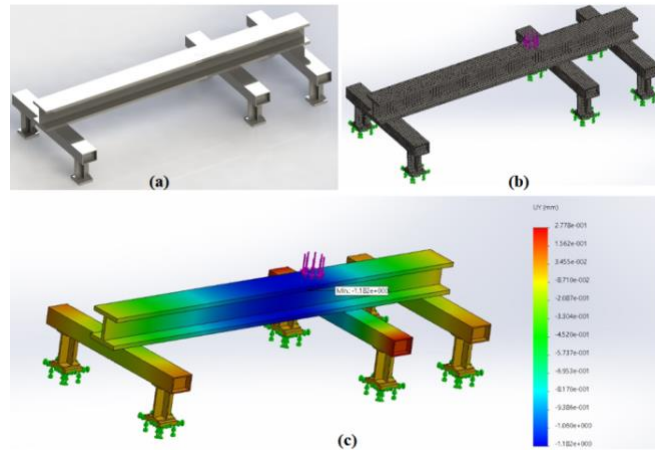


Figura 37 – Estrutura de carregamento: (a) visão geral, (b) malha do modelo numérico e (c) deslocamentos verticais
 Fonte: DINIZ, 2018



Figura 38 – Estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte
 Fonte: DINIZ, 2018

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de apresentar um panorama da utilização dos materiais FRP em estruturas de ponte, bem como justificar a viabilidade da utilização deles, é realizada a comparação de aspectos dessas estruturas com as existentes no Exército Brasileiro.

A primeira análise diz respeito ao peso próprio das estruturas montadas. A ponte em modelo reduzido mostrada neste trabalho apresentou peso próprio de 7,51 kN (765,8 Kgf). Pela escala adotada para peso próprio indicado no projeto por

Teixeira (2007) é possível estimar o peso próprio do protótipo de 15 metros bastando multiplicar pelo fator de escala de 2,3 elevado à 3ª potência.

Assim, o protótipo deverá apresentar peso próprio total de 91,37 kN (9,38 ton). Diz-se que o valor é aproximado uma vez que os nós de alumínio, apesar de estarem na escala reduzida, tiveram que manter as suas espessuras devido ao processo de fundição deles. Este fato acaba por aumentar o peso dos nós do modelo reduzido de tal forma que no protótipo essa parcela de peso acaba por ser proporcionalmente menor.

Em comparação à Ponte Bailey simples-simples de 15,42 m, a ponte protótipo apresenta uma parcela de 43,72% do peso próprio, enquanto para as pontes Compact200 e LSB, essa proporção cai para 30,10% e 35,70%, respectivamente.

Desses dados é possível afirmar que pontes com peso próprio menor tendem a apresentar tempo de montagem menor denotando em agilidade de lançamento, uma vez que a quantidade de pessoal e equipamento necessários são menores.

Em comparação com a ponte M4T6, o peso próprio do protótipo é maior em 167% na proporção. Neste caso, apesar do peso próprio menor pode-se levar em consideração que existe desvantagem da utilização daquela equipagem quando comparada com pontes de vigas treliçadas no sentido de atender vãos maiores, uma vez que a ponte M4T6 em configurações de montagem para vãos maiores que 13,71 m exigem a instalação de elementos intermediários de cavaletes de apoios (pilares).

Pela comparação com os demais trabalhos apresentados na revisão da literatura, apesar das variações de esquemas estruturais (vigas treliçadas, vigas caixão, treliças espaciais, vigas em I e pontes estaiadas), é possível verificar que os procedimentos de montagem foram mais simples (necessidade de pouco pessoal em um tempo reduzido de montagem) do que os preconizados para as pontes militares do Exército.

À respeito de capacidades de suporte, no programa experimental da ponte reduzida em sua montagem completa um ensaio estático foi realizado para verificar o comportamento da estrutura na carga de serviço, ou seja, o peso total da viatura ASTROS II diminuído na escala de 2,3, que resultou em 23,01 kN (2,35 ton).

Para o Estado Limite Último, foi verificada que a ruptura se deu devido a flambagem lateral de uma das vigas, acarretando compressão excêntrica no elemento de pGFRP do vão central, levando-o à ruptura por esmagamento.

A carga máxima aplicada ao sistema foi de 97,62 kN (9,95 ton), porém, devido à Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (CARNEIRO, 1993), há a 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 (1,76 ton) calculado como 2,3 vezes o peso próprio da ponte de modelo reduzido. Dessa forma, a carga máxima considerada para a ruptura foi de 80,35 kN (8,19 ton).

Portanto, é possível fazer a extrapolação do resultado de carga de ruptura do modelo reduzido para o protótipo em tamanho real, bastando multiplicar a carga de ruptura obtida (80,35 kN) pela escala do modelo na 3ª potência ($2,3^3$). O resultado esperado será de 977,62 kN (99,69 ton).

Assim, ao comparar as capacidades de suporte das pontes militares apresentadas nesse trabalho com comprimento em torno de 15 metros, é possível concluir que aquelas apresentam um pouco mais da metade da capacidade de suporte que a ponte em GFRP apresentada neste trabalho: ponte Bailey simples-simples, com 15,42 m, tem capacidade máxima de 510 kN (52 ton) e as pontes Compact200 e LSB, 570 kN (58,12 ton).

Em relação às opiniões colhidas no questionário foram abordados os seguintes questionamentos:

- avaliar a importância da utilização das pontes do Exército Brasileiro em apoio à Defesa Civil;
- identificar quais equipagens seriam mais e menos adequadas nesses apoios;
- relacionar as principais vantagens e desvantagens dessas equipagens;
- verificar o conhecimento dos militares a respeito da utilização dos materiais compósitos em substituição dos tradicionais (aço, alumínio, madeira etc.), listando-os; e
- avaliar, após a apresentação sucinta da ponte deste trabalho, a importância do desenvolvimento de estruturas em material compósito com vistas a substituir as pontes militares em apoios às situações de calamidade, relacionando as principais vantagens.

A Tabela 1 apresenta os resultados do questionário sobre a importância da utilização das pontes militares em situação de calamidade. Os resultados aparecem

em porcentagem de pergunta direta, em que foi possível responder apenas sim ou não.

TABELA 1: Opinião de militares da Arma de Engenharia quanto à importância da utilização de pontes militares em situações de calamidade pública.

O Sr considera importante a utilização de Pontes Militares em situações de calamidade pública onde há a necessidade de se restabelecer o tráfego sobre rodovias (rompimento de adutoras, bueiros, queda de pontes etc.)?	
Sim	98%
Não	2%

Fonte: os autores.

A Tabela 2 apresenta os resultados da opinião dos militares acerca de quais pontes são mais e menos adequadas nessas situações de calamidade pública. Foram apresentadas as Equipagens, sendo possível assinalar apenas uma resposta.

TABELA 2: Opinião de militares da Arma de Engenharia quanto às equipagens que podem ser utilizadas em situações de calamidade.

Em vãos até 60 m, qual equipagem o Sr considera		
EQUIPAGEM	MAIS ADEQUADA	MENOS ADEQUADA
Ponte Bailey	16,3%	12,2%
Ponte M4T6 (sobre cavaletes)	0%	42,9%
Ponte Compact 200	4,1%	4,1%
Ponte LSB	73,5%	4,1%
Ponte Semipermanete	6,1%	28,6%
Nenhuma	0%	8,2%
para ser utilizada nessas situações?		

Fonte: os autores.

A Tabela 3 apresenta os resultados da opinião dos militares acerca das vantagens e desvantagens da utilização dessas pontes, sendo possível escolher mais de uma opção.

TABELA 3: Opinião de militares da Arma de Engenharia quanto às vantagens e desvantagens da utilização de equipagens em situações de calamidade.

Considerando a sua resposta nos itens 2 e 3, qual		
EQUIPAGEM	VANTAGEM	DESvantAGEM
Processo de Montagem	57,1%	41,7%
Capacidade de Suporte da Ponte	81,6%	37,5%
Logística de Transporte da Equipagem	44,9%	31,3%
Montagem do Canteiro de Trabalho	14,3%	16,7%
Necessidade de Equipamentos de Engenharia para a montagem (Guindastes, tratores, carregadeiras etc.)	20,4%	29,2%
Necessidade de Pessoal para Execução da Montagem e Controle de Trânsito	20,4%	31,3%
Custos da Utilização da Ponte (Aquisição da Estrutura + Projeto de Lançamento + Custos Logísticos + Custos de Pessoal + Custos de Manutenção)	18,4%	39,6%
o Sr visualiza no emprego da equipagem?		

Fonte: os autores.

A Tabela 4 apresenta os resultados do conhecimento dos militares acerca da existência de materiais alternativos na constituição de estruturas de pontes. Os resultados aparecem em porcentagem de pergunta direta, em que foi possível responder apenas sim ou não.

TABELA 4: Conhecimento de militares da Arma de Engenharia quanto à existência de materiais alternativos na constituição de estruturas de pontes.

O Sr tem conhecimento da utilização de materiais alternativos aos convencionais (aço, alumínio, ferro e madeira) na constituição de parte ou do todo de estruturas de Pontes Desmontáveis?	
Sim	40,8%
Não	59,2%

Fonte: os autores.

A Tabela 5 apresenta os resultados da dos materiais alternativos que são conhecidos pelos militares. Foi possível escolher mais de uma opção.

TABELA 5: Materiais alternativos utilizados em estruturas de pontes de conhecimento de militares da Arma de Engenharia.

Se a resposta do item anterior for positiva, quais o Sr poderia enumerar?	
GFRP - Material Compósito Fibra de Vidro	38,1%
CFRP - Material Compósito Fibra de Carbono	38,1%
Materiais plásticos e acrílicos	38,1%
Materiais naturais (fibras de coco, bambu etc.)	71,4%
Compósitos em Aramida (Kevlar)	42,9%
Outros	0%

Fonte: os autores.

A Tabela 6 apresenta os resultados do conhecimento dos militares acerca do desenvolvimento de pontes desmontáveis (civis e militares) nos últimos 10 anos. Os resultados aparecem em porcentagem de pergunta direta, em que foi possível responder apenas sim ou não.

TABELA 6: Conhecimento de militares da Arma de Engenharia quanto à existência pesquisas de desenvolvimento de pontes desmontáveis.

O Sr tem conhecimento do desenvolvimento de Pontes Desmontáveis (civis e militares) ao redor do mundo nos últimos 10 anos?	
Sim	44,9%
Não	55,1%

Fonte: os autores.

A Tabela 7 apresenta a opinião dos militares acerca do projeto em desenvolvimento apresentado neste trabalho. Os resultados aparecem em porcentagem de pergunta direta, em que foi possível responder apenas sim ou não.

TABELA 7: Opinião de militares da Arma de Engenharia quanto à ponte apresentada neste trabalho.

Das informações apresentadas, o Sr considera importante o desenvolvimento de projeto com essas características com vistas a substituir a utilização das Pontes Militares desmontáveis existentes no Exército Brasileiro nas Op Ap à Defesa Civil?	
Sim	95,9%
Não	4,1%

Fonte: os autores.

Da análise dos resultados da Tabela 1 verifica-se que os militares consideram de muita importância a utilização das pontes militares em situações de calamidade pública (98%), sendo considerada a melhor alternativa a ponte LSB (Tabela 2 – 73,5%). Esses dados alinham-se com o objetivo da pesquisa no que diz respeito conceber uma estrutura de vigas treliçadas e com possibilidade de uso em apoio à Defesa Civil.

Da Tabela 3 pode-se verificar que a maior vantagem considerada na utilização das equipagens é o processo de montagem (57,1%) relacionada à LSB (cf. Tabela 2) sendo esta também considerada como desvantagem quando utilizada a Ponte M4T6 (41,7% e Tabela 2, 42,9%). Esses resultados demonstram que, apesar de todas as variáveis no lançamento dessas estruturas, a facilidade no processo de montagem é fator determinante. A ponte apresentada no trabalho é leve, sendo, portanto, de fácil montagem.

Existe pouco conhecimento dos militares da Arma de Engenharia acerca da utilização de materiais compósitos em estruturas de pontes (Tabela 4, 59,2% e Tabela 6, 55,1%). Para efeito de comparação, na Construção Civil esses materiais começaram a ser desenvolvidos no início dos anos 2000 e, hoje, já são amplamente explorados nas instituições de pesquisa ao redor do mundo. O assunto apresentado neste trabalho servirá como vetor do conhecimento de um deles em detrimento aos materiais naturais do resultado da Tabela 5 (71,4%).

Por fim, pelo resultado da Tabela 7 (95,9%), após tomar conhecimento de iniciativas como esta apresentada no trabalho, os militares da Arma consideram importante o desenvolvimento de pesquisas dessa natureza.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou as pontes militares existentes no Exército Brasileiro, empregadas 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 compósitos em fibra 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 material compósito fibra de vidro e resina está em desenvolvimento pelo Exército Brasileiro em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foi realizada uma montagem da estrutura completa do modelo reduzido na escala 1:2,3 e realizado ensaio de carregamento estático para verificação do comportamento dela em serviço e na ruptura. Desta montagem foi possível concluir o seguinte:

- a ponte, apesar de ser em modelo reduzido, não exigiu pessoal e equipamentos especializados;

- 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;

- a possibilidade de iniciar a montagem a partir dos elementos completamente desmontáveis diminui os volumes a serem transportados, indicando a necessidade de menos viaturas especializadas para o transporte;

- os procedimentos de protensão dos elementos das vigas indicaram que os procedimentos de montagem são adequados para serem realizados no campo;

- a comparação com as estruturas de aço existentes no Exército Brasileiro indica que uma estrutura desmontável dessa natureza poderá potencializar o apoio em calamidades públicas ou em situações de combate.

Em pesquisa realizada, verificou-se que a opinião dos militares que tiveram contato com pontes militares, corrobora o intento deste artigo.

Trabalhos posteriores estão sendo desenvolvidos para verificação do comportamento dinâmico da estrutura e viabilização da montagem da estrutura protótipo com 30 metros de comprimento. Tais informações serão de fundamental importância para possíveis melhorias no projeto.

A respeito dessas considerações, é possível retomar ao problema cerne deste artigo e concluir que, de fato, a utilização dos materiais compósitos de fibra de vidro, são alternativas viáveis para os materiais constituintes dos elementos estruturais de pontes e passarelas militares possíveis de serem empregados tanto no apoio à Defesa Civil quanto nas Operações Militares.

REFERÊNCIAS

- ASCIONE et al., **Prospect for New Guidance in the Design of FRP (EUR 27666 EM)**, Comissão Europeia para nomatização de Eurocodes, Joint Research Centre – Institute for the Protection and the Security of the Citizen, 176 p., 2016, Ispra, Itália.
- AVIBRÁS INDÚSTRIA AEROESPACIAL S/A. **Informações AV LMU**. 2017.
- CARNEIRO, F. L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Rio de Janeiro, editora UFRJ, 1993.
- CHINESE ARMY. China National Military Standard, **General Code for Military Bridge Design**, 1992, China.
- DINIZ, Marcos Vasconcelos. **Modelo Físico de Ponte Desmontável em Material Compósito**, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia – IME, 188 f., 2018, Rio de Janeiro, Brasil.
- HUNG, H. -h., 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, 114, 181-193, 2016, Taipei, Taiwan.
- KOSTOPOULOS, V., Markopoulos, Y. P., Vlachos, D. E., Katerelos, D., Galiotis, C., Tsiknias, T., Kalomallos, D., **Design and Construction of a Vehicular Bridge Made of Glass/polyester Pultruded Box Beams**, Plastics, Rubbers and Composites, 34(4), 201-207, 2005, Grécia.
- MARSH, Elizabeth, Composites in Infrastructure, 1ª edição, Oxford: Elsevier Advanced Technology, 333 p., 2000, Londres, Inglaterra.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. EXÉRCITO BRASILEIRO. Estado Maior do Exército. **Manual Técnico: Ponte de Painéis Tipo Bailey, M2 – T 5-277**. Brasília, 1ª edição, 1976.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. EXÉRCITO BRASILEIRO. Estado Maior do Exército. **Manual Técnico: Ponte M4T6 – T – 5-278**. Brasília, 1ª edição, 1975.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. EXÉRCITO BRASILEIRO. 3º Batalhão de Engenharia de Combate. **Nota de aula: Pnt Compact200**. Cachoeira do Sul, 2005.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. EXÉRCITO BRASILEIRO. Estado Maior do Exército. **Manual Técnico: Ponte de Apoio Logístico – LSB**. 1ª e 2ª parte. Brasília, edição em aprovação. 2019.
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastres – S2iD**. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios/>. Acesso em: 02 Mar 2020.
- M. J., R., & J. B., K, **Development of a Short-Span Fiber-Reinforced Composite Bridge for Emergency Response and Military Applications**, Journal of Bridge Engineering, 13, 388-397, 2008, Estados Unidos.
- SEDLACEK, G.; TRUMPF, H., **“Development of a Light-Weight Emergency Bridge”**, The Structural Engineer International, v. 14, n. 4, pp. 282-287, November, 2004.
- SOLIDOWRKS Version 2015. Dassault Systemes, 2015.

STATES, U., Germany, & Kingdom, U., **Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment – TDTC**, 2005.

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 – COPPE, 224 f., 2007, Rio de Janeiro, Brasil.

TEIXEIRA, A.M.A.J.; PFEIL, M. S.; BATTISTA, R. C. **Viga Treliçada com Perfis Pultrudados e Conexões Metálicas para Ponte Desmontável**. In: XXXV Jornadas Sul Americanas de engenharia Estrutural, 2012, Rio de Janeiro. Infraestrutura e Desenvolvimento, 2012 v.1.

WIGHT, R. G., et al, **Development of FRP Short-span Deployable Bridge - Experimental Results**, Journal of Bridge Engineering, 2006.11, 489-498, 2006, Canadá.

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, 127, 199-210, 2016, Taipei, Taiwan.

ZHANG, D., Zhao, Q., Hunag, Y., Li, F., Chen, H. & Miao, D. **Flexural Properties of a Lightweight Hybrid FRP-Aluminum Modular Space Truss Bridge System**, Composite Structures, 108, 600-615, 2014, Pequim, China.

ANEXO A – SOLUÇÃO PRÁTICA

Com vistas a validar o objetivo do trabalho, foi confeccionada a tabela a seguir, de forma a apresentar os resultados dos comparativos das pontes existentes no Exército Brasileiro com as pontes em material compósito.

TABELA 8: resultados comparativos das pontes pesquisadas.

Autores	Tipo	Tipo	Carga de serviço (kN)	Vão (m)	Carga máxima aplicada (kN)
Sedlacek e Trumpf (2004)	desmontável	vigas treliçadas	109	20,0	127
Kostopoulos et al. (2005)	fixa	treliça espacial	300	11,6	150
Wight et al. (2006)	módulo único	viga caixão	270	4,8	165
Teixeira (2007)	desmontável	vigas treliçadas	10,52	13,0	32,9
Robinson e Kosmatka (2008)	módulo único	-	270	4,0	170
Zhang et al. (2014)	desmontável	-	100	12,0	75
Yeh et al. (2015)	desmontável	-	50	10,0	320
Hung et al. (2016)	desmontável	-	50	20,0	320
Diniz (2018)	desmontável	vigas treliçadas	23	15,0	977,62

Fonte: os autores.