

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Paulo Sérgio Souza Reis

**COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS
PULTRUDADOS EM RESINA POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE
VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36.**

Goiânia, GO
2021

Paulo Sérgio Souza Reis

**COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS
PULTRUDADOS EM RESINA POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE
VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36.**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Civil, do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Valdeir Francisco de
Paula**

**Goiânia, GO
2021**

R2772c Reis, Paulo Sérgio Souza.

Comparativo técnico e análise estrutural entre perfis pultrudados em resina polimérica reforçada com fibra de vidro e perfis em aço ASTM A36 / Paulo Sérgio Souza Reis. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
106 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Análise estrutural. 2. Resina polimérica. 3. Fibra de vidro. 4. Treliça. I. Paula, Valdeir Francisco de. (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
III. Título.

CDD 624.171

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Sérgio Souza Reis

TÍTULO: COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS PULTRUDADOS EM RESINA POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36.

ANO: 2021

É concedida ao Instituto Federal de Goiás permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Sérgio Souza Reis
Rua 240, n.º 373, Qd. 60 Lt 43, Setor Coimbra,
CEP 74533-260 – Goiânia – GO – Brasil.
Eng.civil.psreis@gmail.com



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Paulo Sérgio Souza Reis

Matrícula: 20161011050133

Título do Trabalho: COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS PULTRUDADOS EM RESINA POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 01/04/2021

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Goiânia, 24/03/2021.

Local Data



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Paulo Sérgio Souza Reis

**COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS PULTRUDADOS EM RESINA
POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovado em 17 de março de 2021:

Valdeir Francisco de Paula, Dr. (IFG)

(Orientador)

(Assinado eletronicamente)

Antônio Henrique Capuzzo Martins, Dr. (IFG)

(Assinado eletronicamente)

Glydson Ribeiro Antonelli, Me. (IFG)

(Assinado eletronicamente)

Goiânia, GO

2021

Documento assinado eletronicamente por:

- **Antonio Henrique Capuzzo Martins, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 31/03/2021 20:33:45.
- **Glydson Ribeiro Antonelli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 31/03/2021 14:47:01.
- **Valdeir Francisco de Paula, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 31/03/2021 14:22:07.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 31/03/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 147702

Código de Autenticação: f9049275a3



DEDICATÓRIA

*A minha família, em especial a meus pais,
irmãos, minha amada namorada e
principalmente a mim mesmo.*

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho ocorreu, principalmente, pelo auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo e, de uma maneira especial, agradeço:

- aos meus pais, pelo esforço, perseverança, dedicação, confiança, coragem de seguir em frente e, principalmente, pela paciência;

- aos meus irmãos Marco Túlio e José Neto, pelo amor e apoio em todos os momentos;

- à minha querida amiga e namorada Alana, pelo carinho, amor, incentivo e futuro;

- à Professora Andrea Cintra Macedo, por guiar e canalizar a vontade do aprendizado de uma maneira primorosa no fundamento da minha vida acadêmica;

- à Escola Espírita André Luiz, por me permitir desenvolver não só os conceitos educacionais e didáticos, mas também pela filosofia do bem e do amor;

- à todos meus colegas de turma, por sofrer, divertir, aprender, apanhar e desenvolver todos juntos esse aprendizado. Dentre eles faço questão de citar: Ariane Rosa, Ludmilla Diniz, Paulo Venâncio, Wayron Neves, Fellipe Alves, Igor Ferreira, Johnny Carlos, Lucas Rodrigues e Clara Carolina;

- à Senha Engenharia, por todas as oportunidades de começar a construir minha vida profissional e disponibilizar a problemática projetada e estudada por este trabalho;

- ao meu amigo e padrinho da faculdade Marcos Paulo, por todas as caronas, tardes de estudo, conselhos, oportunidades, incentivo e exemplos;

- ao meus orientador Dr. Valdeir Francisco de Paula, pela confiança depositada, pela orientação e aconselhamento;

- à fabricante ENMAC sob representação da Joana D'arc, pelo apoio e suporte técnico;

- aos meus companheiros de jornadas e aventuras Marco Túlio, Victor Cintra, Arthur Felipe e João Gabriel, pelo companheirismo e amizade;

Enfim, a todos àqueles que fizeram parte da minha vida, pessoal e acadêmica. Serei eternamente grato.

EPÍGRAFE

*“Do. Or do not. There is no try. “
(Mestre Yoda)*

RESUMO

COMPARATIVO TÉCNICO E ANÁLISE ESTRUTURAL ENTRE PERFIS PULTRUDADOS EM RESINA POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO E PERFIS EM AÇO ASTM A36

AUTOR: Paulo Sérgio Souza Reis
ORIENTADOR: Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula

O avanço tecnológico e desenvolvimento da construção civil são realidades inerentes ao progresso da sociedade. No decorrer dos anos os processos construtivos exigem novos métodos, possibilidades e soluções objetivando melhor produtividade e rentabilidade. Neste cenário os materiais compósitos se apresentam como um recurso viável e extremamente versátil para desenvolvimento de soluções estruturais modernas e inovadoras. Este trabalho desenvolve uma análise cujo objetivo é a apresentação dos perfis estruturais em resina polimérica reforçada com fibra de vidro, bem como sua comparação com o aço ASTM A36, através de dimensionamentos de treliças planas laterais em uma travessia de tubulação do Córrego Taquaral, no município de Goiânia. O desenvolvimento estrutural é baseado na utilização de conceitos da Mecânica Geral, Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas aplicados em cada modelo estrutural. Resultou-se então em uma estrutura mais robusta e pesada em aço e, em contrapartida, na opção mais leve com seções ligeiramente vultosas em fibra de vidro. Apesar da similaridade dos métodos estruturais ambos os materiais comparados apresentam características extremamente dissonantes, mas que definitivamente são soluções viáveis e interessantes de acordo com suas aplicações. A análise contempla a disponibilidade de projetistas, mão de obra qualificada, distribuição de insumos, custos e apresentação de ambos os materiais no Brasil. A partir dos resultados foi possível concluir que ambas as soluções são aplicáveis, confiáveis e extremamente competitivas com outros modelos estruturais. Entretanto são necessárias predefinições cujas estruturas apresentam maior viabilidade de acordo com as características físicas e mecânicas dos materiais.

Palavras-chave: PRFV. Pultrusão. ASTM A36. Fibra de Vidro. Compósito. Perfil Estrutural. Comparativo. Treliça. Travessia.

ABSTRACT

GUIDE FOR FORMATTING FINAL WORK IN THE CIVIL ENGINEERING COURSE

AUTHOR: Paulo Sérgio Souza Reis

ADVISOR: Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula

The technological advancement and development of civil construction are realities inherent to the progress of society. Every day the construction processes require new methods, possibilities and solutions aiming at better productivity and profitability. In this scenario, composite materials present themselves as a viable and extremely versatile resource for the development of modern and innovative structural solutions. This paper develops an analysis whose objective is the presentation of structural profiles in fiberglass reinforced polymer resin, as well as its comparison with ASTM A36 steel, through the dimensioning of lateral plane trusses in a pipe crossing of the Taquaral stream, in the city of Goiânia. The structural development is based on the use of concepts from General Mechanics, Strength of Materials and Theory of Structures applied to each structural model. The result was a more robust and heavy steel structure and, on the other hand, a lighter option with slightly voluminous fiberglass sections. Despite the similarity of the structural methods both materials compared present extremely dissonant characteristics, but are definitely viable and interesting solutions according to their applications. The analysis contemplates the availability of designers, qualified labor, distribution of inputs, costs, and presentation of both materials in Brazil. From the results it was possible to conclude that both solutions are applicable, reliable, and extremely competitive with other structural models. However, predefinitions are necessary in which both structures present greater viability according to the physical and mechanical characteristics of the materials.

Keywords: GFRP. Pultrusion. ASTM A36. Fiberglass. Composite. Structural. Comparative. Truss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Telhado da <i>London Kings Cross Station</i>	18
Figura 2 –	Passarela <i>Aberfeldy Footbridge</i>	18
Figura 3 –	Passarela em Resina reforçada com fibra de vidro sobre pilares de concreto no <i>Dover Sea</i>	19
Figura 4 –	Ponte sobre canal do Rio <i>Rochdale</i>	20
Figura 5 –	Classificação dos Compósitos.....	21
Figura 6 –	Fases de um material Compósito.....	27
Figura 7 –	Processo de Pultrusão.....	32
Figura 8 –	Travessia projetada do Interceptor Santa Rita da Bacia Taquaral.....	33
Figura 9 –	<i>Layout</i> proposto para a Travessia projetada.....	33
Figura 10 –	Identificação e Nomenclatura dos elementos da estrutura.....	34
Figura 11 –	Diagrama de Esforços Axiais da Estrutura em Aço.....	48
Figura 12 –	Diagrama de Esforços Axiais da Estrutura em PRFV.....	72
Figura 13 –	Variabilidade de Perfis.....	85
Figura 14 –	Defeitos de acabamentos.....	87
Figura 15 –	Áreas com excesso de resinas.....	88
Figura 16 –	Casca na superfície do perfil.....	88
Figura 17 –	Estruturas que apresentaram delaminação.....	89
Figura 18 –	Estrutura que apresentou descoloração.....	89
Figura 19 –	Exposição das emendas dos reforços.....	90
Figura 20 –	Perfil empenado.....	90
Figura 21 –	Fenda transversal em perfil pultrudado.....	91
Figura 22 –	Superfície de compósitos com fibras secas expostas.....	91
Figura 23 –	Perfil E que apresentou fissurações internas.....	92
Figura 24 –	Identificação das linhas de divisão dos moldes no perfil.....	92
Figura 25 –	Manchas escuras em perfis.....	93
Figura 26 –	Seção transversal em perfil que apresenta porosidade interna.....	93

Figura 27 –	Seção transversal em perfil que apresenta porosidade superficial.....	94
Figura 28 –	Peças rompidas.....	94
Figura 29 –	Peças com Trincas.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Propriedades Mecânicas de Aços-Carbono.....	26
Tabela 2 –	Propriedades Mecânicas dos graus definidos na NBR 7007 e a similaridade com as normas ASTM.....	27
Tabela 3 –	Propriedades de Perfis estruturais em resina polimérica reforçada com fibra de vidro.....	29
Tabela 4 –	Resistência química de Perfis estruturais em resina polimérica reforçada com fibra de vidro.....	30
Tabela 5 –	Coefficientes de Segurança Parciais γ_f Aplicados às Ações (ou Solicitações) no Estado Limite Último (NBR 8800)	47
Tabela 6 –	Lista de Materiais da Estrutura Lateral em Aço	98
Tabela 7 –	Valores cotados dos perfis metálicos.....	98
Tabela 8 –	Lista de Materiais da Estrutura Lateral em Resina Reforçada com Fibra de Vidro.....	99
Tabela 9 –	Valores cotados dos perfis pultrudados.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UK	<i>United Kingdom</i>
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
ALMACO	Associação Latino-americana de materiais compósitos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
NBR	Norma Técnica brasileira
PRFV	Polímero reforçado com Fibra de Vidro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3	OBJETIVOS.....	24
3.1	Objetivo Geral.....	24
3.2	Objetivos Específicos	24
4	METODOLOGIA.....	24
5	APRESENTAÇÃO DO MATERIAL	25
5.1	Características Físicas, Químicas e Mecânicas do Aço ASTM A36.....	25
5.2	Características Físicas, Químicas e Mecânicas da Fibra de Vidro	27
5.3	Fabricação por Pultrusão.....	31
6	PRÉ-LANÇAMENTO DA ESTRUTURA.	32
7	LEVANTAMENTO DE CARGAS PARA ESTRUTURA DE AÇO	34
7.1	Cargas Permanentes Comuns entre as Estruturas	35
7.2	Cargas Características Exclusivas da Estrutura em Aço.....	36
7.2.1	Cargas Permanentes Provenientes dos Pesos Próprios da Estrutura em Aço.....	36
7.2.2	Carga Proveniente da Força do Vento Atuando na Estrutura em Aço.....	42
7.3	Cálculo e Determinação das Solicitações de Projeto	45
8	DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO EM AÇO.....	47
8.1	Verificação e Dimensionamento dos Banzos Superiores e Inferiores	48
8.2	Verificação e Dimensionamento das Diagonais.....	53
8.3	Verificação e Dimensionamento das Montantes Internas.....	57
8.4	Verificação e Dimensionamento dos Montantes Externos	59
9	LEVANTAMENTO DE CARGAS PARA ESTRUTURA EM RESINA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO	61
9.1	Cargas Permanentes Comuns entre as Estruturas	61
9.2	Cargas Características Exclusivas da Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro	61
9.2.1	Cargas Permanentes Provenientes dos Pesos Próprios da Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro	62
9.2.2	Carga Proveniente da Força do Vento Atuando na Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro.....	67

9.3	Cálculo e Determinação das Solicitações de Projeto	70
10	DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO EM RESINA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO	72
10.1	Verificação e Dimensionamento dos Banzos Superiores e Inferiores	72
10.2	Verificação e Dimensionamento das Diagonais.....	77
10.3	Verificação e Dimensionamento das Montantes Internas.....	80
10.4	Verificação e Dimensionamento das Montantes Externas.....	82
11	COMPARATIVO TÉCNICO.....	83
11.1	Capacidade Técnica de Elaboração de Projetos.....	84
11.2	Disponibilidade de Mão de Obra.....	85
11.3	Qualidade e Disponibilidade dos Materiais.....	85
11.4	Montagem, Logística de Execução em Obra e Manutenção.....	95
12	RESULTADOS	97
13	CONCLUSÃO.....	100
14	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

INTRODUÇÃO

A construção civil, em paralelo ao avanço tecnológico da humanidade, carece cada vez mais de soluções substancialmente arrojadas para a atualização dos métodos construtivos. Estas novas alternativas se apresentam ao mercado trazendo características e conceitos originais, revigorando os recursos vigentes e ampliando as possibilidades de soluções de engenharia para cada tipo e situação de obra.

Sendo uma solução leve, de alta resistência mecânica a corrosão, durável e de fácil montagem, os materiais compósitos se tornaram foco de desenvolvimento de pesquisas e produtos devido ao seu potencial tecnológico e infindáveis permutações de materiais na manipulação de suas características. Segundo Bank (2006) o surgimento da pultrusão como o método de fabricação dos perfis em compósitos poliéster reforçados com fibra de vidro deu-se em solo norte americano na década de 1950 para a substituição de ligas metálicas em produções bélicas devido aos investimentos nos anos pós segunda guerra mundial.

Nas duas décadas seguintes perfis pultrudados reforçados em fibra de vidro com seção “I” e tubulares começaram a ser produzidos e utilizados, pontualmente, como elementos estruturais na construção civil. Em 1984 foi publicado o *Structural Plastics Design Manual*, desenvolvido pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis, a *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, sendo este não restritivo a perfis pultrudados. Em 1992 foi construída a primeira passarela de pedestres inteiramente desenvolvida com material compósito na cidade de *Aberfeldy*, Escócia. Em Russel, EUA, no ano de 1996 foi construída a primeira ponte veicular construída inteiramente em materiais compósitos.

Em 1997 foi construída a ponte *Kolding* na Dinamarca com perfis pultrudados. No ano de 1999 A *Fiberline Composites A/S* constrói para uma feira na Suíça o *Eyecatcher*, um edifício todo em perfis pultrudados. E atualmente os materiais compósitos são aplicados em aeronaves, componentes bélicos, veículos, barcos, próteses, objetos esportivos e os perfis estruturais, especificamente fabricados por pultrusão, que não são implementados em obras no mundo todo.

Segundo William D. Callister (2009), autor do livro *Materials Science and Engineering: An Introduction*, o material compósito é considerado como qualquer material anisotrópico multifásico que exibe uma significativa proporção das propriedades de ambas as fases constituintes, de modo que forme uma melhor combinação de propriedades para o material final. Portanto, de acordo com o arranjo dos materiais formadores da multifase as características do material mudam substancialmente.

O compósito reforçado em fibra de vidro, ou do inglês *Glass Fiber-Reinforced Polymer* (GFRP), como a maioria dos compósitos artificiais, é formado por somente 2 fases; a matriz líquida, que envolve a fibra, e a outra denominada de fase dispersa ou reforço. Especificamente neste material a fase dispersa na forma de fibra de vidro, reforço mais utilizado devido sua alta resistência mecânica e baixo custo, está imersa em uma matriz polimérica, sendo amplamente usadas as resinas poliésteres, epóxi e fenólicas.

São disponíveis no mercado vários meios de fabricação de peças estruturais em compósitos plásticos variando o nível de mecanização, automação, mão de obra, controle de qualidade, agilidade de fabricação e custo. Sendo eles:

- Moldagem Manual, *Hand Lay-up*, *Wet Lay-up* ou *Laminating*: A resina, homogeneizada com catalisador, é aplicada manualmente sobre a manta de fibra de vidro que repousa sobre um molde. Com a utilização de rolos manuais é feita a remoção das bolhas de ar e a cura ocorre normalmente a temperatura ambiente;
- Moldagem por Pistola *Spray Lay-up*: As fibras são picadas e lançadas simultaneamente com a resina sobre um molde através de uma pistola. As bolhas são removidas em seguida com pincéis ou roletes.
- Enrolamento de Filamento/*Filament Winding*: Utilizado para a fabricação de dutos e reservatórios, as fibras são impregnadas de resina e enroladas num mandril através de um equipamento automatizado de enrolamento;
- Moldagem por Compressão/*Compression Molding*: O material é primeiramente derretido em uma câmara e depois é injetado no molde onde toma a forma sólida por pressão;
- Pultrusão/*pultrusion*: Consiste em um dispositivo contínuo de tração que puxa a fibra tracionada em todo o processo composto por etapas de impregnação da matriz no tanque de resina, passagem através de um molde aquecido de cura para formatação e, por fim, os perfis são cortados de acordo com o comprimento pré-estabelecido.

Os perfis estruturais em fibra de vidro fabricados por método de pultrusão possuem aplicações no Brasil e no mundo em pontes, passarelas, coberturas, fachadas, treliças, torres de alta tensão e comunicação, grades e grelhas. Por exemplo a *London Kings Cross Station*, localizada em Londres recebeu em fevereiro de 2015 perfis estruturais em fibra de vidro no telhado plano de ambos os lados da torre central com a finalidade de oferecer uma solução mais leve e evitar os vazamentos apresentados pela estrutura anterior.

Figura 1 – Telhado da *London Kings Cross Station*



Fonte: Imagem retirada da internet, criado por George Rex.

A *Aberfeldy Footbridge* foi a primeira grande passarela em fibra de vidro do mundo, projetada em 1991 e executada no ano de 1992 na cidade de *Aberfeldy* na Escócia em um campo de golfe, possuindo aproximadamente 14,5 toneladas de perfis e 64 metros de extensão construída somente com elementos pultrudados e cabos de kevlar-49.

Figura 2 – Passarela *Aberfeldy Footbridge*



Fonte: *DailyRecord*, 2018.

A implementação de estruturas em materiais compósitos são uma alternativa de montagem rápida, leve e pode ser, de acordo com as condições exigidas, o melhor custo benefício de implementação. Em exemplo a solução implementada da passarela em perfis estruturais pultrudados em resina polimérica reforçada com fibra de vidro instalada no *Dover Sea Wall*. Devido a tempestades no inverno de 2015 em *Kent* no Reino Unido, um trecho aproximado de 250 metros de trilhos foi totalmente destruído, solicitando assim uma série de reformas e uma nova instalação de passarelas para pedestres sobre os trilhos. Dentre as soluções

de engenharia desenvolvidas foi implementada uma passarela industrializada com compósitos, previamente montada e instalada com extrema facilidade e eficiência.

Para sua escolha foram levadas em consideração o baixo peso específico, montagem prévia de grande parte da estrutura em chão de fábrica, instalação extremamente simplificada com guindastes, alta resistência a corrosão, baixa condutividade elétrica e alta durabilidade (garantia de fabricação dos materiais de aproximadamente 120 anos). Sua estrutura possui cerca 4,50 toneladas em material compósitos, com dimensões de 31,00 metros de comprimento, 2,40 metros de largura e 3,40 metros de altura. Fabricada a partir da combinação de perfis pultrudados (nas peças da treliça, escadas e patamares) e placas em resina fenólicas antiderrapantes.

Figura 3 – Passarela em Resina reforçada com fibra de vidro sobre pilares de concreto no *Dover Sea*



Fonte: AZO Materials, (Acesso em 05/10/2020 - <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14692>)

Em *Rochdale*, também no Reino Unido, projetou-se uma ponte sobre o canal do Rio *Rochdale* com estruturas leves em resina plástica reforçada com fibra de vidro objetivando uma execução ágil, limpa e com reaproveitamento das estruturas existentes. Neste caso os perfis pultrudados foram apoiados em estruturas em concreto existentes em vão de nove metros. A estrutura possui largura de total de treze metros com revestimento betuminoso convencional sobre argamassa epóxi.

Figura 4 – Ponte sobre canal do Rio *Rochdale*



Fonte: *Composites UK*

Portanto, a aplicação de elementos estruturais em compósitos depende de soluções estruturais modernas e inteligentes, com cálculos computacionais específicos com a finalidade de simular uma situação verossímil, otimizando o dimensionamento e apresentando estruturas esbeltas, leves e resistentes. Para tanto é necessário elaborar métodos de dimensionamento que se adapte com as características anisotrópicas do material de acordo com as opções disponíveis no mercado nacional e internacional.

Portanto, este documento objetiva uma análise comparativa técnica, estrutural, qualitativa e orçamentária, entre peças estruturais simples em Aço e Resina reforçada com Fibra de Vidro, previamente dimensionadas para as cargas propostas utilizando meios de cálculos e dimensionamentos executados e publicados em mídia acadêmica internacional. O primeiro, já amplamente utilizado e consolidado das estruturas e aplicações de engenharia pelo mundo, é especificamente o Aço ASTM A36. Que será comparado, sob mesmas condições, ao perfil estrutural em Fibra de Vidro produzido por pultrusão.

REFERENCIAL TEÓRICO

O avanço tecnológico e o desenvolvimento das zonas urbanas são a realidade da maioria das nações do mundo. De acordo com essa condição urge de forma sistemática a necessidade de desenvolver uma melhor logística de habitação, transporte e, conseqüentemente, reestruturar a distribuição da densidade populacional urbana. Deste modo, a construção civil, seguindo a corrente mercadológica da elaboração de edifícios cada vez maiores, carece do desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de grande resistência mecânica, eficientes e com baixos pesos específicos para aplicação em habitações coletivas de rápida execução.

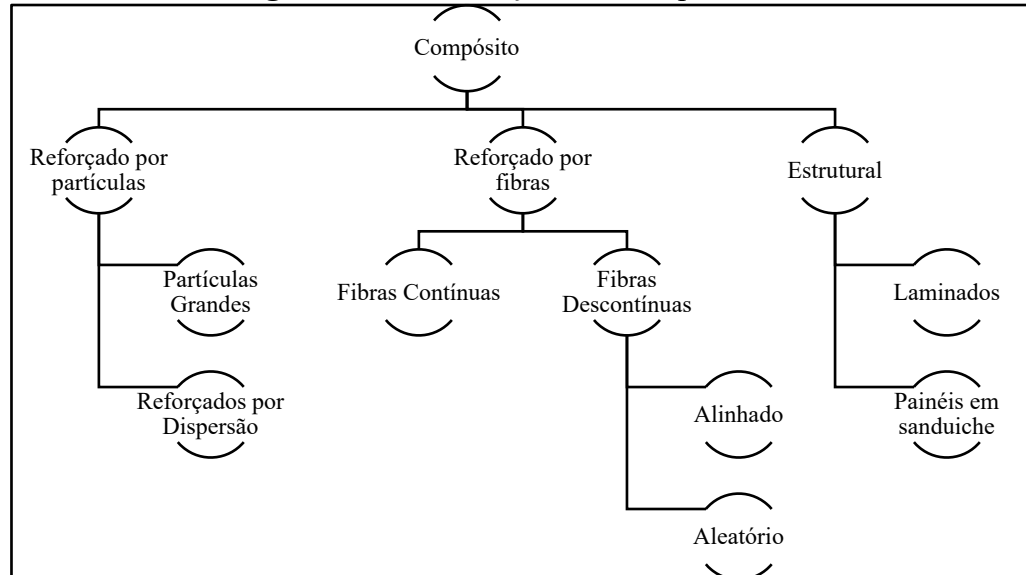
De acordo com Rezende, Costa e Botelho (2011) os compósitos em polímeros reforçados com fibra de vidro apresentam estas condições podendo ser uma alternativa a ser

estudada para o futuro próximo. Campbell (2004) define o compósito como o material cuja formação se dá pela combinação de dois ou mais componentes, resultando em uma permutação de características gerais diferentes dos materiais individualmente. Sendo que, diferente do aço e outras ligas metálicas, cada elemento preserva suas propriedades físicas, químicas e mecânicas individuais.

Atualmente compósitos artificiais são desenvolvidos, elaborados e produzidos de acordo com as suas aplicações em vários processos industriais. Contudo, segundo William D. Callister (2009), os materiais compósitos também são encontrados na natureza. A madeira, por exemplo, é um material compósito em que as fibras de celulose são envolvidas pela matriz rígida chamada de lignina. O osso também é considerado um material compósito, onde uma proteína macia denominada colágeno é envolta do rígido mineral apatita.

William D. Callister (2009), em seu livro *Materials Science and Engineering: An Introduction*, também apresenta os materiais compósitos classificando-os de acordo com o tipo e disposição das fibras. Podendo ser reforçado por fibras contínuas, partículas ou um compósito estrutural. Dispostas de maneira unidirecional, bidirecional ou aleatória.

Figura 5 – Classificação dos Compósitos



Fonte: Adaptado de William D. Callister (2009)

Os compósitos particulados consistem em partículas de comprimentos e formatos variados dispersos na matriz. De acordo com Daniel & Ishai (2006), devido sua distribuição aleatória de partículas, estes compósitos são considerados quase homogêneos e quase ortotrópicos quando comparado em uma macro escala. Os materiais reforçados com fibras descontínuas são compostos por fibras de pequenos diâmetros orientadas em uma única direção ou totalmente aleatória. Os primeiros são usualmente considerados, em análises macro,

materiais ortotrópicos, enquanto o segundo pode ser considerado quase isotrópicos (aproximadamente 1 nanômetro de diâmetro e 1000 nanômetros de comprimento).

Os compósitos de fibra contínua são reforçados por fibras longas contínuas e são os mais eficientes do ponto de vista da rigidez e força. As fibras contínuas podem ser todas paralelas (composto unidirecional de fibra contínua), podem ser orientados em ângulos retos um em relação ao outro (tecido de fibra contínua de tecido cruzado ou tecido compósito), ou orientado ao longo de várias direções (composto multidireccional de fibra contínua). Neste último caso, para um certo número de direções das e distribuição das fibras, o compósito também pode ser caracterizado como um material quase isotrópico.

Os compósitos laminados são formados por duas ou mais lâminas unidirecionais ou camadas empilhadas em várias orientações. As lâminas (ou folhas, ou camadas) podem ser de várias espessuras e consistem em diferentes materiais. Ultimamente o baixo peso específico e elevada resistência mecânica, aliadas a alta resistência química inseriram o material nas indústrias aeroespaciais, aeronáuticas, automobilísticas e navais em todo o mundo. Nas últimas duas décadas, o uso de materiais em compósito reforçado em fibras de vidro já passou a ser encontrado em obras de edifícios (fachadas e reformas), passarelas, coberturas e pontes.

Daniel & Ishai (2006) também propõem que as características dos materiais compósitos são resultantes das combinações de proporção de reforço e matriz, a forma em que o reforço é distribuído no material e seu processo de fabricação. Daniel Gay (2003) em seu livro *Composite Materials Design and Applications*, imprime ao material características de alta resistência a fadiga, ausência de patamar de escoamento pois os compósitos reforçados em fibra de vidro não escoam mas se rompem ao sair do regime elástico, não apresentam corrosão, não são sensíveis a maioria dos ataques químicos, não apresentam grande resistência ao impacto e, por fim, possuem excelente resistência ao fogo podendo apresentar fumaça toxica ao entrar em combustão.

No mundo, os perfis pultrudados em fibra de vidro são implementados em estruturas residenciais, comerciais, industriais (em áreas com alta agressividade química) e de infraestrutura. Especificamente no Reino Unido, de acordo com o site da *Trade Association for the UK Composites Industry*, os perfis estudados foram projetados em passarelas, pontes, coberturas, fachadas, patamares e escadas de acesso.

Portanto, apesar dos compósitos já serem utilizados e apresentarem condições promissoras em novos procedimentos, recentemente não é encontrada uma padronização normativa em vigor nos principais centros regulatórios da construção civil. Somente a pré-normatização americana e europeia então sendo desenvolvidas de maneira a estabelecer

padronizações e sequências lógicas a serem adotadas nos projetos que contemplem perfis estruturais em fibra de vidro. Para o Brasil apenas a NBR 15708:2014 e o “Guia de Compra e Inspeção para o Mercado da Pultrusão” – elaborado pela Associação Latino-americana de materiais compósitos (ALMACO) – apresentam ao mercado nacional indicações e verificações da qualidade do produto.

Para a difusão do material, aplicação e padronização dos processos, trabalhos foram elaborados em graduações e mestrados visando a caracterização dos compósitos como elemento estrutural a ser utilizado especificamente pela engenharia civil. Monteiro (2020) desenvolveu em sua dissertação de mestrado uma série de ensaios de cantoneiras solicitadas à compressão centrada, com extremidades rotuladas e engastadas, e compressão excêntrica induzida por ligações aparafusadas.

Proença (2015) desenvolve em sua tese de mestrado ensaios e análises numéricas objetivando determinar a melhor entre 4 diferentes ligações aparafusadas, tipo viga-coluna, em perfis de seção tubular quadrada em fibra de vidro de acordo com os critérios de rigidez, resistência e absorção de energia.

Na dissertação de mestrado de Pierin (2005) é apresentado a análise linear computacional de instabilidade de peças estruturais de seção aberta e parede fina de materiais compósitos comparando o método de elementos finitos com o de faixas finitas. Seruti (2013) desenvolve em sua tese de mestrado pela COPPE/UFRJ a caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados, avaliando suas propriedades de acordo com as classes de resistência E17 e E23 definidas pela NBR 15708:2014.

Seruti (2013) defendeu e desenvolveu em seu artigo no Congresso Ibero-latino-americano de Métodos Computacionais em Engenharia uma análise computacional de passarelas em fibra de vidro para simular no software SAP2000 soluções construtivas variadas para viabilizar a utilização do material. Almeida (2004) apresenta em sua tese de mestrado o material e desenvolve uma série de ensaios para caracterização mecânica em detrimento de suas variações físicas e construtivas, demonstrando e concluindo que, no Brasil, os produtos encontrados em compósitos apresentavam grande variabilidade e poucos padrões.

Castro (2014) apresentou em seu trabalho de especialização o processo de fabricação de perfis pultrudados em Portugal, os perfis encontrados e suas estruturas, aplicações, concepção de estruturas, estudo de estabilidade e seu método de dimensionamento para peças fletidas, tracionadas, comprimidas e sob força de cisalhamento. Especificamente este trabalho foi utilizado como fundamentação teórica de cálculos para o desenvolvimento da estrutura em PRFV e seus devidos dimensionamentos/verificações.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a apresentação do material, pré-dimensionamento das treliças planas laterais da problemática de engenharia utilizando conceitos de mecânica geral e teoria das estruturas, e comparação técnica/orçamentária de perfis em compósito de fibra de vidro pultrudados e aço carbono ASTM A36 quando submetido a cargas de tração e compressão simples. As cargas e solicitações serão obtidas através do processamento de uma estrutura treliçada no dimensionamento de uma travessia de tubulação.

1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o método de pultrusão e as peças de transição de acordo com os padrões apresentados no mercado nacional;
- Fazer o pré-dimensionamento da estrutura como solução do problema proposto;
- Fazer o levantamento de cargas e solicitações da estrutura;
- Fazer a análise básica dos diagramas de esforço cortante e momento fletor no *software ftool*;
- Selecionar e dimensionar elementos tracionados e comprimidos da estrutura;
- Elaborar, partindo dos resultados, o comparativo técnico e orçamentário de acordo com as características físicas, químicas, de durabilidade, disponibilidade de mão de obra e materiais, facilidade de montagem, logística em obra, instalação e manutenção dos materiais.

METODOLOGIA

Foram levantadas as cargas permanentes (peso próprio, peso da tubulação de esgoto, peso do volume de esgoto da tubulação) e variáveis (vento) estimadas em cada caso, devido a variação vultosa do peso próprio da estrutura entre os materiais, considerando seções previamente estimadas. Em segunda etapa desenvolveu-se o pré-lançamento simplificado da estrutura e das cargas no *software* de análise *ftool*, obtendo seus diagramas de Momento Fletor e Esforço Cortante para o layout da estrutura escolhida.

Foram selecionadas as barras da estrutura treliçada lateral objetivando elaborar o dimensionamento das seções transversais das peças com a utilização de métodos e conceitos básicos de Mecânica Geral, Mecânica dos Sólidos e Teoria das Estruturas. Com a finalidade de

pluralizar o estudo serão dimensionadas todas as barras das treliças planas laterais com peças comprimidas e tracionadas de cargas substancialmente diferentes.

As barras transversais de travamento superior e inferior não foram elementos estudados no comparativo devido à complexidade de dimensionamento dos trechos com solicitações à flexão e cortante. Seguiu-se todo o processo de cálculo e especificação padrão sequencial lógico iterativo de engenharia, até que a seção dimensionada seja compatível com a pré-estabelecida para o levantamento prévio de solicitações. Sendo assim, com as seções já definidas, verificadas sua resistência segura às solicitações e confirmado sua disponibilidade no mercado nacional, iniciou-se o comparativo técnico entre as soluções.

Nesta última etapa foram feitas as comparações técnicas pertinentes dos resultados apresentados e analisada a viabilidade de aplicação do material em estruturas treliçadas que possivelmente possam ser implementadas em travessias, passarelas, imóveis de pequeno, médio e grande porte, pontes, fachadas e coberturas.

Tal análise referiu-se às principais variantes de viabilidade para o mercado nacional, sendo levados em consideração as dificuldades para a elaboração e execução do projeto, facilidade de implantação e logística de montagem, disposição de mão de obra especializada, durabilidade e resistência química da estrutura a intempéries (ataque químico corrosivo e variação de temperatura), necessidade e condicionamento da estrutura à manutenção, disponibilidade de materiais e pluralidade de seções disponíveis no mercado que possa sanar as necessidades de carga dos projetos.

APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

1.3 Características Físicas, Químicas e Mecânicas do Aço ASTM A36

O aço como conhecemos é encontrado desde a antiguidade e amplamente difundido nas construções em todo o mundo. Caracterizando-se como uma liga metálica que possui predominantemente ferro e carbono, o aço pode apresentar outros materiais decorrentes de adições ou presença de resíduos de fabricação. Tais considerações e formações de liga dão ao material seu caráter homogêneo e isotrópico, permitindo que independentemente dos planos e direções estudadas as suas características físicas são idênticas e, por esse motivo, seu dimensionamento passa a ser mais simplificado.

Durante a evolução dos processos normativos de produção definiu-se ao aço o padrão de que seu teor de carbono varie entre 0,008% – 2,11% e suas adições são acrescentadas de modo com que o elemento incorporado possa inserir a liga inúmeras outras

propriedades extremamente interessantes, como resistências a ataques químicos e oxidação em exemplo aos aços patináveis. Sua proporção ferro-carbono traz à liga a relação ductibilidade-resistência e permite aos vários tipos de liga uma larga variabilidade de propriedades. De acordo com o aumento do teor de carbono o material se encontra com mais capacidade de carga mecânica, menor ductibilidade e maior fragilidade. A diminuição do teor de carbono reduz a resistência do material a tração, mas o deixa mais dúctil e, portanto, menos frágil.

De acordo com Walter Pfeil (2008) os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, seguindo orientações e padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e das normas europeias EN estão representadas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas de Aços-Carbono

Especificação	Teor de Carbono %	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência a Ruptura (MPa)
ABNT MR250*	Baixo	250	400
ASTM A7**		240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250	400-500
ASTM A307	Baixo	-	415
ASTM A325	Médio	635	825
EM S235	Baixo	235	360

Fonte: Adaptado de Walter Pfeil, 2009

*Aço de média resistência similar ao ASTM A36 padronizado pela NBR 7007 – Aços para perfis laminados para uso estrutural;

**Aço largamente utilizado nos Estados unidos em meados de 1960, porém foi substituído pelo ASTM A36.

No desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso será utilizado como instrumento de cálculo o aço ASTM A36 que já se encontra amplamente difundido no mercado nacional como o MR250. Ambos os materiais são considerados semelhantes, apresentando baixa variabilidade, alto controle de qualidade e são amplamente implementados em estruturas metálicas convencionais no Brasil. Suas propriedades mecânicas e composição química são encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas dos graus definidos na NBR 7007 e a similaridade com as normas ASTM

Grau do Aço	MR250	A36
Limite Escoamento Mínimo (MPa)	250	250
Resistência à Tração (MPa)	400-560	400-560
Alongamento Mínimo após ruptura $L_0 = 200$ mm (%)	20	20

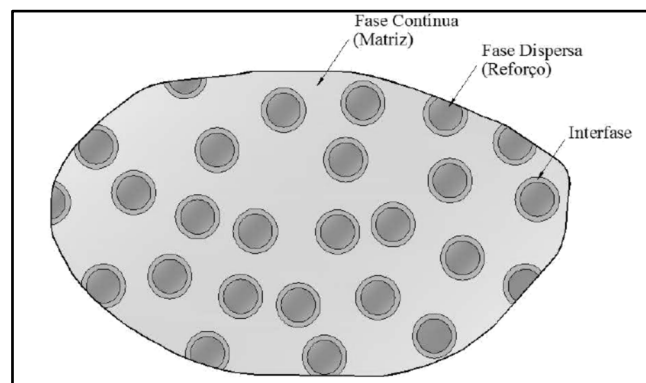
Fonte: Adaptado do Catálogo da Belgo

1.4 Características Físicas, Químicas e Mecânicas da Fibra de Vidro

Segundo Daniel & Ishai (2004) o material compósito é estruturado em duas fases distintas e uma fase adicional formada pela interação química entre as fases anteriores conforme ilustração da Figura 6. A primeira fase é denominada de contínua ou matriz, e é na maioria das vezes composta por resinas de baixa densidade (isofáltica, éster-vinilica, isofáltica/éster-vinilica aditivada, fenólica, etc.) objetivando atribuir ao compósito maior resistência, protegê-las de agentes químicos agressivos e ataque de intempéries, aumentar a resistência a flexão e ao cisalhamento, reduzir o peso específico, manter a coesão dos elementos de reforço e transmitir de maneira mais constante as tensões pela fibra.

A Fase Dispersa, ou reforço, é descontínua, comumente disposta em forma de fibras de alta resistência a tração com diâmetros reduzidos (Fibra de Carbono, Fibra de Vidro, Fibra de Aramida, etc.) e que necessitam da proteção da matriz contra os tipos de ataques supracitados. Por fim, a interface, ou interfase, é a estrutura cuja formação se dá entre as duas fases anteriores e possui primordial importância para resistência do material, pois a produção de um compósito resistente depende muito da transferência de tensões ocasionada pela aderência da ligação entre as fases na interface.

Figura 6 – Fases de um material Compósito



Fonte: Adaptado de Daniel & Ishai, 1994.

Deste modo, todos os materiais compósitos são multifásicos e suas propriedades físicas, químicas e mecânicas exibem uma significativa relação entre a proporção de suas fases constituintes para uma melhor combinação de propriedades do material final. Assim, de acordo com a fabricação e o arranjo dos materiais formadores da multifase, como o tipo do *roving* e resina, as características do material mudam substancialmente. Entretanto, as variações físicas não dependem somente dos materiais constituintes, mas também da análise e distribuição de cargas nas peças.

Como o compósito se caracteriza como um material não homogêneo e anisotrópico suas características físicas possuem grande variação de resistência nas diversas direções de aplicação de solicitações. De modo geral as peças de Resina Polimérica Reforçada com Fibra de Vidro possuem suas maiores resistências a tração e compressão no sentido longitudinal à fibra, apresentando baixa capacidade de carga em solicitações transversais e cisalhantes.

Atualmente existem diversos tipos de fabricação industrial para produção de materiais compósitos que variam o nível de automatização, sentido de injeção do reforço, tipo de impregnação da resina, disposição geométrica dos materiais constituintes e qualidade de cura. Tais tipos de produção são recomendadas e executadas de acordo com a finalidade de implantação do material e quais os tipos de solicitações físicas e químicas as quais eles serão expostos.

No caso estudado, onde os perfis serão utilizados para composição de estruturas que sofrerão em sua maioria esforços de tração e compressão, o tipo de fabricação mais indicada é a Pultrusão. Nela, resumidamente, as fibras são dispostas continuamente, embebidas de resinas e produzidas em diversos tipos de seções que podem ser adaptadas de acordo as direções da solicitação de projeto.

Portanto os perfis estruturais estudados possuem suas fibras contínuas em sentido longitudinal proporcionando altas resistências ao longo de toda a peça e baixa capacidade de carga ao cisalhamento devida à fragilidade do reforço neste espectro de solicitação. Tais características são evidenciadas pelos fabricantes em seus manuais de propriedades disponibilizadas ao mercado.

Neste referido trabalho foram utilizados para o dimensionamento as propriedades encontradas no Manual de Engenharia da empresa COGUMELO e em documento oficial enviado pela ENMAC. Estes documentos foram resumidos, organizados e disponibilizados na Tabela 3 logo abaixo:

Tabela 3 – Propriedades de Perfis estruturais em resina polimérica reforçada com fibra de vidro

Propriedade	Unidade	Orientação	Perfil Estrutural	
			COGUMELO	ENMAC
Resistência Máxima à flexão	kgf/cm ²	Longitudinal	2109	2109
Módulo de elasticidade na flexão	kgf/cm ²	Longitudinal	1,12×10 ⁵	1,12×10 ⁵
Resistência Máxima à flexão	kgf/cm ²	Transversal	703	703
Módulo de elasticidade na flexão	kgf/cm ²	Transversal	0,56×10 ⁵	0,56×10 ⁵
Resistência Máxima à Tração	kgf/cm ²	Longitudinal	2109	2109
Módulo de elasticidade na Tração	kgf/cm ²	Longitudinal	1,76×10 ⁵	1,62×10 ⁵
Resistência Máxima à Tração	kgf/cm ²	Transversal	492	492
Módulo de elasticidade na Tração	kgf/cm ²	Transversal	0,56×10 ⁵	0,56×10 ⁵
Resistência Máxima à Compressão	kgf/cm ²	Longitudinal	2109	2109
Módulo de elasticidade na Compressão	kgf/cm ²	Longitudinal	1,76×10 ⁵	1,62×10 ⁵
Resistência Máxima à Compressão	kgf/cm ²	Transversal	1055	1055
Módulo de elasticidade na Compressão	kgf/cm ²	Transversal	0,70×10 ⁵	0,70×10 ⁵
Resistência ao impacto Izod	kgf•m/cm	Longitudinal	1,4	-
Resistência ao impacto Izod	kgf•m/cm	Transversal	0,2	-
Resistência máxima ao esmagamento	kgf/cm ²	Longitudinal	2109	-
Resistência máxima ao esmagamento	kgf/cm ²	Transversal	2109	-
Resistência máxima ao cisalhamento	kgf/cm ²	Longitudinal	316	387
Resistência máxima ao cisalhamento	kgf/cm ²	Transversal	316	387
Densidade para perfis maciços	g/cm ³	—	1,718 a 1,801	1,7 a 1,8

Fonte: Manual de Engenharia para a execução de projetos em perfis estruturais pultrudados de fibra de vidro da empresa COGUMELO e documento técnico atestando as resistências dos produtos ofertados pela ENMAC.

Devido suas características construtivas, os compósitos apresentam qualidades interessantes a serem levadas em consideração no levantamento e elaboração de alternativas construtivas. Abaixo estão citadas algumas características:

1. Leves com alta resistência: o baixo peso específico dos materiais formadores e suas disposições dão ao material leveza e resistência;
2. Possibilidade de aditivos e pré-pigmentação: o desenvolvimento e industrialização das resinas permitem que os clientes adicionem novos componentes ao material para indicação de cor diretamente na matriz, resistência à exposição ultravioleta e diminuição da propagação de fogo/formação de fumaças em casos de incêndios;

3. Elevada resistência a ambientes quimicamente agressivos: a proteção da resina dá ao material altas resistências a ataques químicos que variam de acordo com o tipo de matriz utilizada. Na Tabela 4 abaixo estão disponíveis em um quadro lógico os níveis de resistência aos agentes químicos de acordo com as duas resinas mais utilizadas no mercado brasileiro;
4. Flexibilidade de *design*: são disponibilizados pelos fabricantes uma grande variabilidade de tipos de perfis e seções devido a facilidade de desenvolvimento de moldes para diversos tipos de aplicações diferentes.

Tabela 4 – Resistência química de Perfis estruturais em resina polimérica reforçada com fibra de vidro

Ataque Químico	Resina Isoftálica	Resina Éster-Vinílica	Ataque Químico	Resina Isoftálica	Resina Éster-Vinílica	Ataque Químico	Resina Isoftálica	Resina Éster-Vinílica
Acetato de Bário	✗	✓	Bicarbonato de Amônia	✓	✓	Hidróxido de Potássio	✗	!
Acetato de Etila	✗	✗	Bissulfato de Sódio	✓	✓	Hidróxido de Sódio	✗	!
Acetato Férrico	✗	✓	Bissulfato de Sódio	✓	✓	Hipoclorito de Cálcio	✗	✓
Acetato de Chumbo	!	✓	Brometo de Sódio	✓	✓	Hipoclorito de Sódio	✗	!
Acetona	✗	!	Carbonato de Potássio	✗	!	Metil Etil Cetona	✗	✗
Ácido Acético	!	!	Carbonato de Sódio	✗	!	Monóxido de Carbono	✓	✓
Ácido Benzeno Sulfônico	✓	✗	Cerveja	✓	✓	Nafta	!	✓
Ácido Benzoico	✓	✓	Cloreto de Alumínio	✓	✓	Naftaleno	✓	✓
Ácido Bórico	✓	✓	Cloreto de Amônio	✓	✓	Nitrato de Amônio	✓	✓
Ácido Cítrico	✓	✓	Cloreto de Cálcio	✓	✓	Nitrato de Potássio	✓	✓
Ácido Clorídrico	!	!	Cloreto de Cobre	✓	✓	Nitrato de Sódio	✓	✓
Ácido Crômico	✗	!	Cloreto de Potássio	✓	✓	Nitrobenzeno	✗	✗
Ácido Estéarico	✓	✓	Cloreto de Sódio	✓	✓	Óleo de Linhaça	✗	✓
Ácido Fosfórico	✓	✓	Cloro	✗	✗	Óleo de Soja	✓	✓
Ácido Graxos	✓	✓	Diclorobenzeno	✗	✗	Óleo Diesel	✓	✓
Ácido Láctico	!	✓	Dicromato de Potássio	✓	✓	Óleo Mineral	✓	✓
Ácido Maléico	!	✓	Dietileno Glicol	✓	✓	Permanganato de Potássio	!	✓
Ácido Nítrico	!	!	Dióxido de Carbono	✓	✓	Piridina	✗	✗
Ácido Oléico	✓	✓	Dipropileno Glicol	✓	✓	Propilenoglicol	✓	✓
Ácido Perclórico	✗	!	Estireno	✗	!	Querosene	✓	✓
Ácido Sulfúrico	!	!	Etileno Glicol	✓	✓	Salmoura	✓	✓
Ácido Tartárico	✓	✓	Fenol	✗	✗	Sulfato de Alumínio	✓	✓
Água Clorada	✗	✓	Ferrocianeto de Potássio	✓	✓	Sulfato de Amônio	✓	✓
Álcool Benzílico	✗	✗	Fluoreto de Alumínio	✗	!	Sulfato de Bário	✓	✓
Álcool Butílico	✗	!	Gasolina	✗	!	Sulfato Ferroso	✓	✓
Álcool Etilico	✗	!	Glicerina	✓	✓	Sulfato de Potássio	✓	✓
Anilina	✗	✗	Hidrazina	✗	✗	Sulfato de Sódio	✓	✓
Anidrido Acético	✗	✗	Hidróxido de Amônio	✗	!	Tolueno	✗	!
Benzeno	✗	✗	Hidróxido de Bário	✗	✓			
Benzoato de Sódio	✓	✓	Hidróxido de Cálcio	✓	✓			

Resistente	✓
Resistente com ressalvas	!
Não resistente	✗

Fonte: Manual de Engenharia para a execução de projetos em perfis estruturais pultrudados de fibra de vidro da empresa COGUMELO)

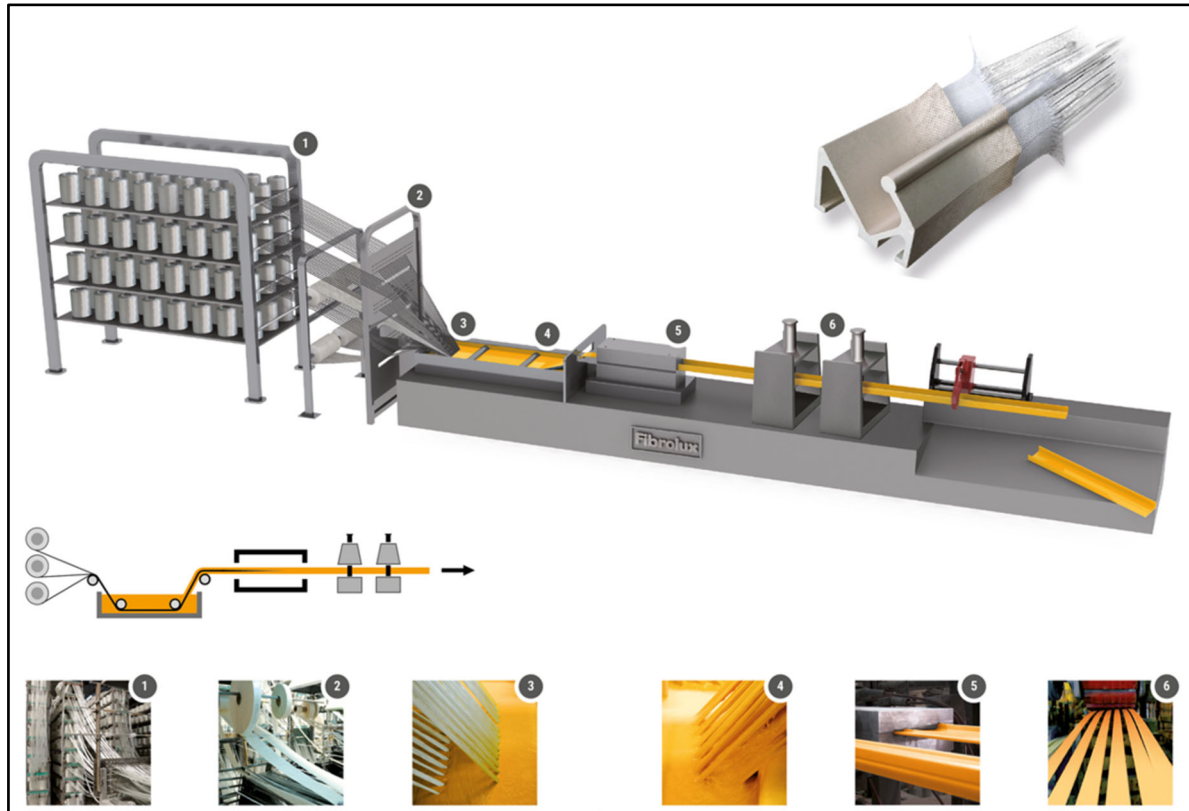
1.5 Fabricação por Pultrusão

Conceitualmente a Pultrusão é um dos métodos exclusivos para fabricação de perfis estruturais em compósitos, como o de resina plástica reforçada por fibra de vidro, instituído nos anos cinquenta nos Estados Unidos. Atualmente sua aplicação se dá em cadeias produtivas constantes, modernas, mecanizadas e automáticas para o beneficiamento de peças com seções transversais constantes como tubos e perfis.

Todo o processo é simples, mas necessita de elevados cuidados de execução. A produção se inicia na elaboração de um bom projeto de perfil, escolhas corretas de reforços, resinas, aditivos e planejamento produtivo. Em resumo, conforme a Figura 7, seu processo consiste na tração das fibras contínuas (*roving*), mantas ou tecidos contínuos. Nele o reforço é banhado em um composto resinado, guiado por um sistema de rolos onde é removido seu excesso e formatada uma seção transversal aproximada da final. Posteriormente o reforço já banhado e com uma simples conformação é levado até moldes aquecidos – caixa metálica com formato da seção – para definir o formato final e fazer a cura da resina, imprimindo ao conjunto a seção dimensionada do perfil.

Para a correta cura todo o processo possui o controle de velocidade do material tracionado e conformado pelas formas, objetivando uma resistência ideal da barra. Por fim as peças são cortadas de acordo com as dimensões definidas de fabricação, armazenadas e distribuídas para o consumidor. A Figura 7, logo abaixo, indica o processo resumidamente, onde:

1. Etapa em que as Fibras contínuas, mantas ou tecidos contínuos estão posicionados nos suportes;
2. O processo é iniciado com a guia para o direcionamento do reforço preparando-o para o banho em resina;
3. O reforço é inserido no tanque de resina para o banho no material;
4. O material de reforço sai do tanque já impregnado de resina;
5. Inicia-se a formatação da seção e é iniciada a cura nos moldes aquecidos;
6. Finalizada a cura e efetuado o corte do perfil em barras de comprimento previamente estabelecido.

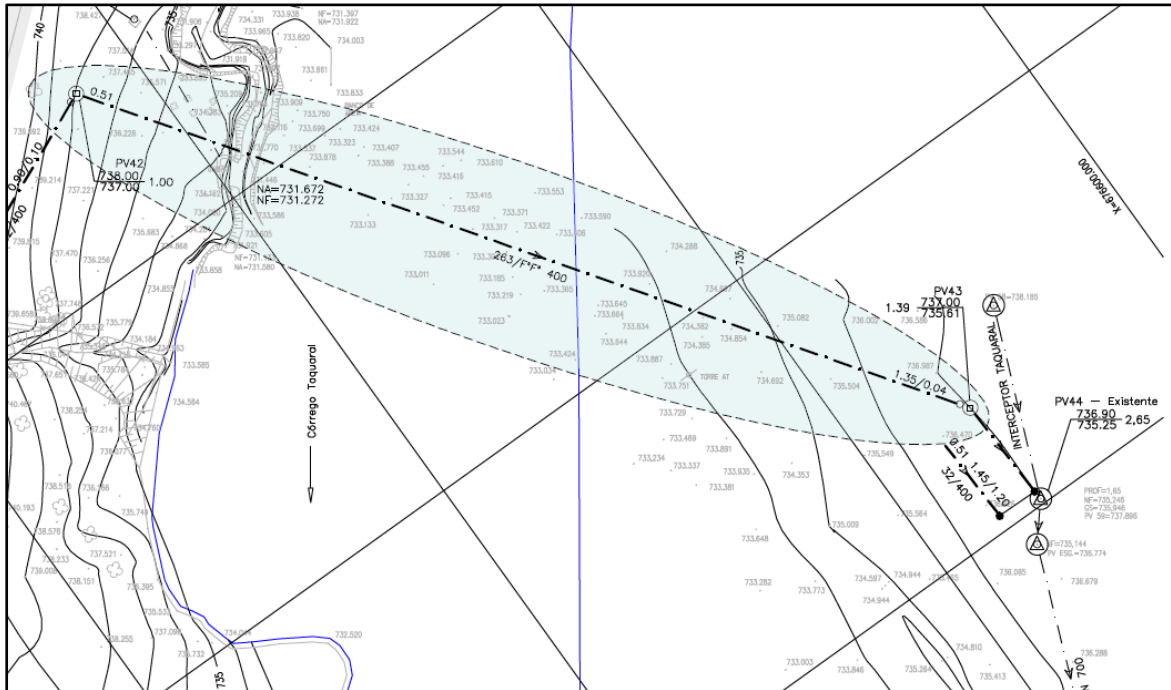
Figura 7 – Processo de Pultrusão

Fonte: Fibrolux

PRÉ-LANÇAMENTO DA ESTRUTURA.

A estrutura objeto deste referido projeto foi idealizada e projetada para ser instalada em uma solução real no município de Goiânia objetivando vencer um vão entre pilares predefinido de vinte e sete metros. Este *case* de estudo foi pensado para a travessia sobre o Córrego Taquaral, afluente da margem direita do Ribeirão Anicuns, presente no Interceptor Santa Rita da Bacia Taquaral projetada pela Senha Engenharia. O referido trecho foi definido com tubulação em Ferro Fundido DN400, com possibilidade de ampliação para DN600, sobre estrutura treliçada objetivando o lançamento dos resíduos coletados desde o Residencial Canadá até um PV existente do Interceptor Taquaral.

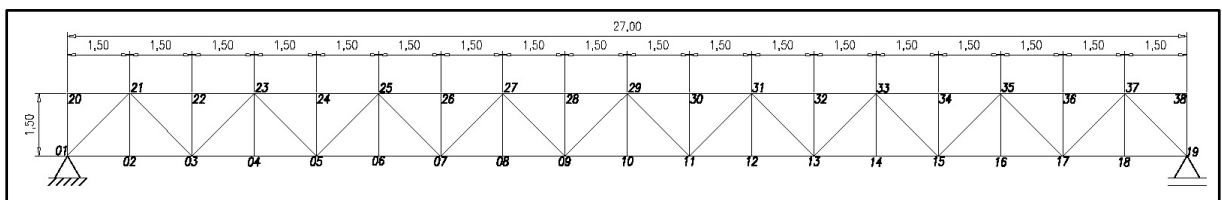
Figura 8 – Travessia projetada do Interceptor Santa Rita da Bacia Taquaral



Fonte: Projeto da Senha Engenharia

Portanto a estrutura foi desenvolvida previamente em dezoito módulos de cento e cinquenta centímetros, completando os vinte e sete metros determinados pelo projeto hidráulico e estrutural dos pilares. Também foi definido a largura estimada da estrutura de noventa centímetros para ser estimado o peso total da estrutura, já que estas peças de travamento transversal não serão dimensionadas e levadas em consideração no comparativo estrutural.

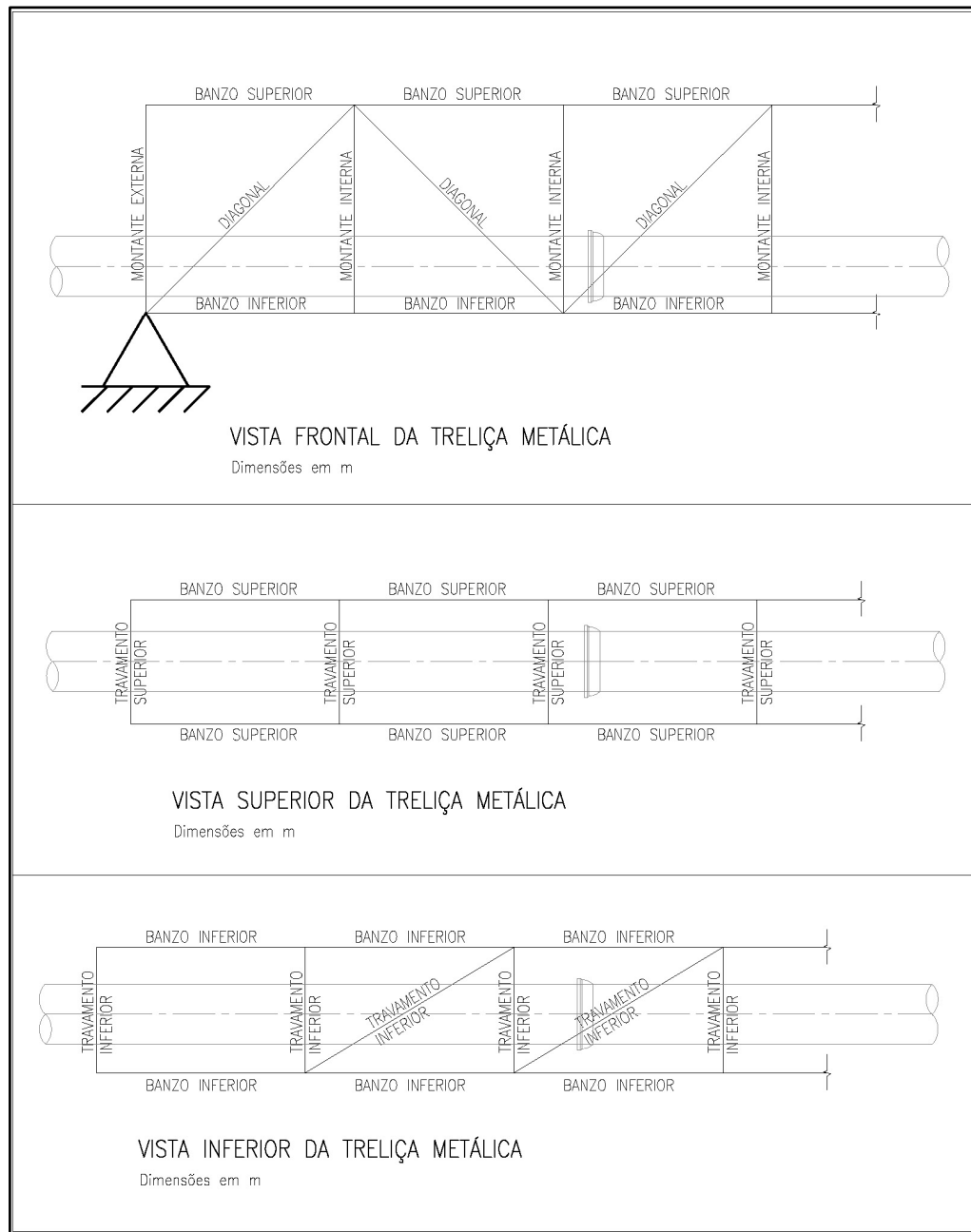
Figura 9 – Layout proposto para a Travessia projetada



Fonte: Elaborado pelo Autor

No lançamento estrutural estudado foi desenvolvido e identificado os banzos superiores, banzos inferiores, montantes internos, montantes externas, diagonais, travamentos superiores, travamentos inferiores e travamentos inferiores em diagonais.

Figura 10 – Identificação e Nomenclatura dos elementos da estrutura



Fonte: Elaborado pelo Autor

LEVANTAMENTO DE CARGAS PARA ESTRUTURA DE AÇO

Para o desenvolvimento estrutural otimizado, arrojado e seguro é de extrema importância o correto levantamento das cargas distribuídas no decorrer da estrutura. Durante esse processo são levantados cargas permanentes e variáveis oriundas de diversas situações e elementos construtivos devidamente projetados e identificados em processos lógicos objetivando prever as condicionantes de projeto mais verossímeis possíveis. As cargas permanentes atuam na estrutura de modo praticamente constante durante toda sua vida útil –

como peso próprio, móveis, equipamentos e acabamentos – sendo considerada como solicitações constantes durante o cálculo e levantamento de cargas.

Em contrapartida, as cargas variáveis possuem sua atuação na estrutura variável no decorrer do tempo, podendo ser diretas ou indiretas. As diretas são constituídas por cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da água, devendo-se respeitar as prescrições feitas por normas brasileiras específicas. Já as ações indiretas são definidas como as variações de temperatura uniformes (causadas pela mudança global de temperatura da atmosfera) e não uniformes (diferença de temperatura entre uma face e outra da estrutura superior a 5°C), ações dinâmicas (choques, vibrações) e ações excepcionais de carregamento.

1.6 Cargas Permanentes Comuns entre as Estruturas

- Tubulação a qual a estrutura deve atender para ampliações futuras: Tubo com ponta e bolsa, JGS, em ferro fundido DN600, comprimento da barra de 6,00 m. Peso da barra de 6,00 m 827,0 kg (seco) segundo o catálogo da maior fabricante brasileira.

$$P_{Tubo} = p \cdot l$$

$$P_{Tubo} = 27 \cdot 138 = \mathbf{3.726,0\ kg}$$

Onde:

P_{Tubo} = Peso da Tubulação (kg)

p = Massa Linear da Tubulação em Ferro Fundido, DN400 (kg/m)

l = Comprimento da Tubulação (m)

- Peso do Esgoto: calculado de acordo com o volume interno da tubulação e o peso específico do fluido transportado.

$$V = \frac{\pi \cdot \varnothing_{interno}^2 \cdot l}{4}$$

$$V = \frac{\pi \cdot 0,6^2 \cdot 27}{4} = 7,63m^3$$

$$P_{fluido} = V \cdot \rho$$

$$P_{fluido} = 7,63 \cdot 1020 = \mathbf{7.782,60\ kg}$$

Onde:

P_{fluido} = Peso do Fluido no interior da Tubulação (kg)

ρ = Peso específico do fluido (kg/m^3)

l = Comprimento da Tubulação (m)

V = Volume (m^3)

$\emptyset_{interno}$ = Diâmetro interno do tubo (m)

- Peso Total da Tubulação – Tubo + Esgoto: calculado considerando os valores advindos dos cálculos dos subitens anteriores.

$$P_{Tubo+Esgoto} = P_{Tubo} + P_{fluido}$$

$$P_{Tubo+Esgoto} = 3.726,0 + 7.782,6 = \mathbf{11.508,60\ kg}$$

Onde:

P_{fluido} = Peso do Fluido no interior da Tubulação (kg)

P_{Tubo} = Peso da Tubulação (kg)

$P_{Tubo+Esgoto}$ = Peso Total do conjunto Tubo + Esgoto (kg)

- Carga Solicitante na estrutura: Carga total solicitante característica resultante da instalação das tubulações em ferro fundido cheias de esgoto.

$$F_{Comum,k} = P_{Tubo+Esgoto} \cdot g$$

$$F_{Comum,k} = 11.508,60 \cdot 9,81 = \mathbf{112.889,37\ N}$$

Onde:

$F_{Comum,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso dos Tubos e Esgoto (kN)

$P_{Tubo+Esgoto}$ = Peso Total do conjunto Tubo + Esgoto (kg)

g = Gravidade (m/s^2)

1.7 Cargas Características Exclusivas da Estrutura em Aço

1.7.1 Cargas Permanentes Provenientes dos Pesos Próprios da Estrutura em Aço

As cargas permanentes provenientes dos pesos próprios dos elementos formadores das estruturas foram calculadas separadamente de acordo com suas nomenclaturas, conforme

indicado pela Figura 10. Para isso foi considerado seções transversais previamente determinadas, seus pesos específicos de acordo com o catálogo da Belgo e os comprimentos de acordo com o *layout* da estrutura.

- Peso dos Banzos Superiores e Inferiores: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, 3. 1/2 " × 1/4 ".

$$P_{Banzos} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Banzos} = 4 \cdot 2 \cdot 27 \cdot 8,56 = \mathbf{1.848,96 \text{ kg}}$$

Onde:

P_{Banzos} = Peso Total dos Banzos (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Barras Diagonais: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, 2" × 3/16 ".

$$P_{Diagonais} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Diagonais} = 36 \cdot 2 \cdot 2,12 \cdot 3,63 = \mathbf{554,08 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Diagonais}$ = Peso Total das Diagonais (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Barras de Montante Internas: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, 1. 1/2 " × 3/16 ".

$$P_{Mont.int.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Mont.int.} = 34 \cdot 2 \cdot 1,50 \cdot 2,68 = \mathbf{273,36 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Mont.int.}$ = Peso Total das Montantes Internas (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Montante Externas: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $3" \times 1/4"$.

$$P_{Mont.ext.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Mont.ext.} = 4 \cdot 2 \cdot 1,50 \cdot 7,29 = \mathbf{87,48 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Mont.ext.}$ = Peso Total das Montantes Externas (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Travamento Superior: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 1/4"$.

$$P_{Trav.sup.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Trav.sup.} = 19 \cdot 2 \cdot 0,90 \cdot 4,74 = \mathbf{162,11 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Trav.sup.}$ = Peso Total das Barras de Travamento Superior (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Apoio das Tubulações: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 1/4"$.

$$P_{Apoio.tub.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Apoio.tub.} = 17 \cdot 2 \cdot 0,90 \cdot 4,74 = \mathbf{145,04 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Apoio.tub.}$ = Peso Total das Barras de Apoio das tubulações (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Barras de Diagonais Inferiores: Seção estimada de cantoneira simples de abas iguais, 2" × 1/4".

$$P_{Diag.inf.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Diag.inf.} = 16 \cdot 1 \cdot 1,75 \cdot 4,74 = \mathbf{132,72 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Diag.inf.}$ = Peso Total das Barras de Diagonais inferiores (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Chapas de Ligações dos Nós principais: Chapa estimada de 5/16".

$$P_{Chapa.lig.princ.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.lig.princ.} = 34 \cdot 0,1225 \cdot 62,72 = \mathbf{261,23 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Chapa.lig.princ.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações Principais (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações das Barras de Montante: Chapa estimada de 5/16".

$$P_{Chapa.lig.mont.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.lig.mont.} = 34 \cdot 0,045 \cdot 62,72 = \mathbf{95,96\ kg}$$

Onde:

$P_{Chapa.lig.mont.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações das Barras de Montante (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações de Canto: Chapa estimada de 5/16".

$$P_{Chapa.chapa.canto.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.canto.} = 8 \cdot 0,09 \cdot 62,72 = \mathbf{45,16\ kg}$$

Onde:

$P_{Chapa.canto.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações de Canto (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações da Treliça no pilar e na manta de Neoprene: Chapa estimada de 3/8".

$$P_{Chapa.trel.pilar.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.trel.pilar.} = 4 \cdot 0,275 \cdot 74,48 = \mathbf{81,93\ kg}$$

Onde:

$P_{Chapa.trel.pilar.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações da Treliça no pilar e na manta de Neoprene (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações: Peso estimado de 70 quilogramas por conjunto de apoio.

$$P_{Apoio} = N \cdot p_{Apoio}$$

$$P_{Apoio} = 10 \cdot 70 = \mathbf{700 \text{ kg}}$$

Onde:

P_{Apoio} = Peso Total dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações (*kg*)

p_{Apoio} = Massa estimada por conjunto (*kg/cj*)

N = Número de peças (*un*)

- Peso Total da Treliça: Somatória dos pesos das peças calculadas acrescido de 5% estimando os pesos das soldas, parafusos, arruelas e chumbadores.

$$P_{Total.treli.} = (P_{Banzos} + P_{Diagonais} + P_{Mont.int.} + P_{Mont.ext.} + P_{Trav.sup.} + P_{Apoio.tub.} + P_{Diag.inf.} + P_{Chapa.lig.princ.} + P_{Chapa.lig.mont.} + P_{Chapa.chapa.canto.} + P_{Chapa.trel.pilar.} + P_{Apoio}) \cdot 1,05$$

$$P_{Total.treli.} = (1.848,96 + 554,08 + 273,36 + 87,48 + 162,11 + 145,04 + 132,72 + 261,23 + 95,96 + 45,16 + 81,93 + 700) \cdot 1,05$$

$$P_{Total.treli.} = \mathbf{4.607,43 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Total.treli.}$ = Peso Total da Treliça (*kg*)

P_{Banzos} = Peso Total dos Banzos (*kg*)

$P_{Diagonais}$ = Peso Total das Diagonais (*kg*)

$P_{Mont.int.}$ = Peso Total das Montantes Internas (*kg*)

$P_{Mont.ext.}$ = Peso Total das Montantes Externas (*kg*)

$P_{Trav.sup.}$ = Peso Total das Barras de Travamento Superior (*kg*)

$P_{Apoio.tub.}$ = Peso Total das Barras de Apoio das tubulações (*kg*)

$P_{Diag.inf.}$ = Peso Total das Barras de Diagonais inferiores (*kg*)

$P_{Chapa.lig.princ.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações Principais (*kg*)

$P_{Chapa.lig.mont.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações das Barras de Montante (*kg*)

$P_{Chapa.chapa.canto.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações de Canto (*kg*)

$P_{Chapa.trel.pilar}$ = Peso Total das Chapas de Ligações da Trelça no pilar e na manta de Neoprene (kg)

P_{Apoio} = Peso Total dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações (kg)

- Carga Solicitante na estrutura: Carga total solicitante característica resultante do Peso Próprio da Estrutura.

$$F_{PPE,k} = P_{Total.treli.} \cdot g$$

$$F_{PPE,k} = 4.607,43 \cdot 9,81 = \mathbf{45.198.90 \text{ N}}$$

Onde:

$F_{PPE,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso próprio da estrutura (kN)

$P_{Total.treli.}$ = Peso Total da Trelça (kg)

g = Gravidade (m/s^2)

1.7.2 Carga Proveniente da Força do Vento Atuando na Estrutura em Aço

Para o levantamento e determinação das solicitações de cálculo proveniente dos esforços gerados pela ação dos ventos nas estruturas utilizou-se dos parâmetros determinados pela NBR 6123:2013. Para isso é necessário fazer os levantamentos de informações do projeto e compará-los aos valores apresentados pela Norma, obtendo todos os fatores e velocidades suficientes para o desenvolvimento das fórmulas.

- Velocidade do Vento: Velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano apresentada no gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s do Anexo C da NBR 6123:2013.

$$V_0 = \mathbf{35 \text{ m/s}}$$

Onde:

V_0 = Velocidade básica do Vento (m/s)

- Fator Topográfico S_1 : Fator que leva em consideração as condições topográficas do terreno onde será implantado o projeto, neste caso foi considerado um terreno plano ou fracamente acidentado.

$$S_1 = 1,0$$

Onde:

S_1 = Fator Topográfico S_1

- Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (Fator S_2): Fator que leva em consideração o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação. O valor discriminado abaixo foi retirado da tabela 2 da NBR 6123:2013, considerando um Terreno plano em região lisa do Rio (Categoria I), maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m (Classe B) e $z < 5$ metros.

$$S_2 = 1,04$$

Onde:

S_2 = Fator de Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

- Fator Estatístico S_3 : baseia-se em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Foi considerado Grupo 3.

$$S_3 = 0,95$$

Onde:

S_3 = Fator Estatístico

- Velocidade Característica do Vento: Velocidade do vento determinada para as características específicas do projeto.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

$$V_k = 35 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot 0,95 = 34,58 \text{ m/s}$$

Onde:

V_k = Velocidade característica do Vento (m/s)

V_0 = Velocidade básica do Vento (m/s)

S_1 = Fator Topográfico S_1

S_2 = Fator de Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

S_3 = Fator Estatístico

- Pressão dinâmica: Pressão dinâmica do vento determinada para as características do projeto.

$$q = 0,613 \cdot V_k^2$$

$$q = 0,613 \cdot 34,58^2 = \mathbf{733,01 \text{ N/m}^2}$$

Onde:

q = Pressão dinâmica do Vento (N/m^2)

V_k = Velocidade característica do Vento (m/s)

- Área lateral das tubulações: Área efetiva lateral das tubulações DN600 que sofre ação do vento.

$$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot \emptyset \cdot C}{2}$$

$$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot 0,635 \cdot 27}{2} = \mathbf{26,93 \text{ m}^2}$$

Onde:

A_{tubo} = Área lateral do tubo incidente de Pressão dinâmica (m^2)

$\emptyset$ = Diâmetro externo da tubulação (m)

C = Comprimento da Tubulação (m)

- Área de perfis: Área estimada efetiva de perfis incidente da Pressão dinâmica.

$$A_{perfis} = \mathbf{9,64 \text{ m}^2}$$

Onde:

A_{perfis} = Área de perfis incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Área de chapas: Área estimada efetiva de chapas incidente da Pressão dinâmica.

$$A_{chapas} = \mathbf{3,42 \text{ m}^2}$$

Onde:

A_{chapas} = Área de chapas incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Área dos perfis e tubulações: Área efetiva que sofre ação do vento.

$$A = A_{tubo} + A_{perfis} + A_{chapas}$$

$$A = 26,93 + 9,64 + 3,42 = \mathbf{39,99\ m^2}$$

Onde:

A = Área total incidente de Pressão dinâmica (m^2)

A_{tubo} = Área lateral do tubo incidente de Pressão dinâmica (m^2)

A_{perfis} = Área lateral de perfis incidente da Pressão dinâmica (m^2)

A_{chapas} = Área de chapas incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Força do Vento: Força do Vento atuando na estrutura. Considerou-se $C_a = 1$.

$$F_{v,k} = C_a \cdot q \cdot A$$

$$F_{v,k} = 1 \cdot 733,01 \cdot 39,99 = \mathbf{29.313,07\ N = 29,3\ kN}$$

Onde:

$F_{v,k}$ = Força do Vento Característica (N)

C_a = Coeficiente de Arrasto

q = Pressão estática do Vento (N/m^2)

A = Área total incidente de Pressão dinâmica (m^2)

1.8 Cálculo e Determinação das Solicitações de Projeto

Com as cargas características obtidas de peso próprio, peso da tubulação em carga e força atuante do vento foi necessário desenvolver os cálculos de combinação majorada para determinar as solicitações de projeto conforme as descrições abaixo. Para isso a NBR 8800:2008 adota uma padronização compatível com as demais normas nacionais e internacionais de segurança, aplicando coeficientes de majoração e ações combinadas expressando as situações com efeitos mais desfavoráveis.

- Força solicitada de peso próprio da estrutura e força do vento disposta em cargas distribuídas: Solicitação de projeto majorada de acordo com os coeficientes γ_f

prescritos na norma para combinações normais de cargas permanentes e variáveis (disposto na Tabela 5).

$$F_{d,d} = \frac{F_{PPE,k} \cdot \gamma_{f1} + F_{v,k} \cdot \gamma_{f3}}{c}$$

$$F_{d,d} = \frac{45.198,90 \cdot 1,25 + 29.313,07 \cdot 1,4}{27} = \mathbf{3.612,48 \text{ N/m}}$$

Onde:

$F_{d,d}$ = Força distribuída de projeto gerada pelo peso próprio da estrutura e ação do vento (N/m)

$F_{PPE,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso próprio da estrutura (N)

γ_{f1} = Coeficiente de Segurança Parcial para Peso Próprio de Estruturas Metálicas

$F_{v,k}$ = Força do Vento Característica (N)

γ_{f3} = Coeficiente de Segurança Parcial para Ação do vento

C = Comprimento da Treliza (m)

- Força atuante oriunda de peso próprio das tubulações em carga disposta em solicitações concentradas: Solicitação de projeto pontual devido a dissipação das cargas da tubulação para a estrutura serem feitas pelos 10 apoios de tubos projetados. Valores majorados de acordo com os coeficientes γ_f prescritos na norma para combinações normais de cargas permanentes e variáveis (disposto na Tabela 5, foi considerado o mesmo coeficiente ao de estruturas metálicas devido ao critério de produção e pouca variabilidade de pesos).

$$F_{p,d} = \frac{F_{Comum,k} \cdot \gamma_{f2}}{n}$$

$$F_{p,d} = \frac{112.889,37 \cdot 1,25}{10} = \mathbf{14.111,17 \text{ N}}$$

Onde:

$F_{p,d}$ = Força pontual de projeto gerada pelo peso das tubulações (N)

$F_{comum,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso dos Tubos e Esgoto (N)

γ_{f2} = Coeficiente de Segurança Parcial para Elementos construtivos em geral e equipamentos

n = Número de apoios

Tabela 5 – Coeficientes de Segurança Parciais γ_f Aplicados às Ações (ou Solicitações) no Estado Limite Último (NBR 8800)

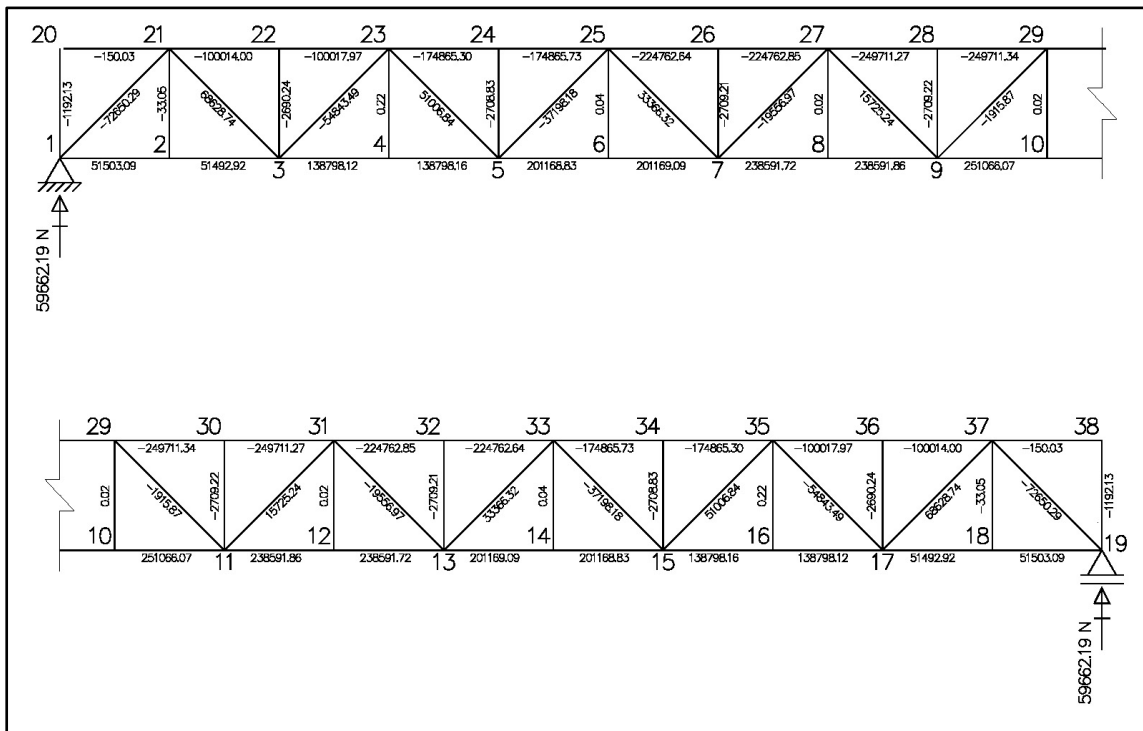
Ações		Combinações		
		Normais	Especiais ou de Construção	Excepcionais
P e r m a n e n t e s	Peso Próprio de Estruturas Metálicas	1,25	1,15	1,10
	Peso Próprio de Estruturas pré-moldadas	1,30	1,20	1,15
	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados	1,35	1,25	1,15
	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,40	1,30	1,20
	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	1,40	1,40	1,30
	Deformações impostas por recalques de apoio, imperfeições geométricas, retração e fluência do concreto	1,20	1,20	0,00
V a r i á v e i s	Efeito de temperatura	1,20	1,00	1,00
	Ação do vento	1,40	1,20	1,00
	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes de uso e ocupação	1,50	1,30	1,00

Fonte: Adaptado da NBR 8800:200

DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO EM AÇO

Após o levantamento de cargas, combinação das solicitações e lançamento do Layout das estruturas no *software Ftool*, foi possível a obtenção dos diagramas de esforços axiais apresentados na Figura 11, demonstrada abaixo. Para isso os valores obtidos no **Capítulo 7** foram lançados na vista frontal da treliça no software considerando que cada vista da treliça receberá metade das solicitações calculadas.

Figura 11 – Diagrama de Esforços Axiais da Estrutura em Aço



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

1.9 Verificação e Dimensionamento dos Banzos Superiores e Inferiores

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de tração e compressão dentre todas as barras. Na treliça, os banzos que apresentaram os maiores valores de compressão são as barras 28/29 e 29/30 ($-249.711,34 \text{ N}$). Já as barras que apresentam os maiores valores de tração são as barras 9/10 e 10/11 ($251.066,07 \text{ N}$). Para a análise foram desenvolvidas duas verificações, a primeira em relação a área da seção transversal em peças tracionadas e a segunda para as barras comprimidas. Foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções com verificações da ocorrência ou não de flambagem local.

- Verificação das solicitações de tração para escoamento da seção bruta nos banzos:
Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $3,1/2" \times 1/4"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 10,90 = 21,80 \text{ cm}^2$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$(R_{d,t})_{ESB} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$(R_{d,t})_{ESB} = \frac{21,8 \cdot 25}{1,1} = \mathbf{495,45 \text{ kN}}$$

Onde:

$(R_{d,t})_{ESB}$ = Resistência a tração de projeto para o escoamento da seção bruta (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN}/cm^2$)

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação das solicitações de tração para ruptura da seção líquida nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $3.1/2" \times 1/4"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 10,90 = \mathbf{21,80 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l}$$

$$C_t = 1 - \frac{2,46}{30} = \mathbf{0,92}$$

Onde:

C_t = Fator redutor aplicado à seção

e_c = Excentricidade do plano da ligação

l = Comprimento estimado de solda da ligação

$$A_{n,ef} = A_g \cdot C_t$$

$$A_{n,ef} = 21,8 \cdot 0,92 = \mathbf{20,01 \text{ cm}^2}$$

Onde:

$A_{n,ef}$ = Área da seção efetiva (cm^2)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

C_t = Fator redutor aplicado à seção

$$(R_{d,t})_{RSL} = \frac{A_{n,ef} \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$(R_{d,t})_{RSL} = \frac{20,01 \cdot 40}{1,35} = \mathbf{592,89 \text{ kN}}$$

Onde:

$(R_{d,t})_{RSL}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção líquida (kN)

$A_{n,ef}$ = Área da seção efetiva (cm^2)

f_u = Tensão de ruptura do Aço, no caso A36 ($f_y = 40 \text{ 25 kN/cm}^2$)

γ_{a2} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de ruptura, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,35$)

- Verificação das solicitações de compressão nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $3.1/2" \times 1/4"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 10,90 = \mathbf{21,80 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{K \cdot l}{i}$$

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{1 \cdot 150}{2,77} = \mathbf{1,22}$$

Onde:

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

K = Coeficiente de flambagem ($k = 1$ para peças bi rotuladas)

l = Comprimento entre apoios (cm)

i = Raio de giração (cm)

$$X = 0,658^{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \leq 1,50$$

$$X = 0,658^{1,22^2} = \mathbf{0,54}$$

Onde:

X = Parâmetro adimensional X

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

$$f_c = X \cdot f_y$$

$$f_c = 0,54 \cdot 25 = \mathbf{13,41}$$

Onde:

f_c = Tensão resistente à compressão simples

X = Parâmetro adimensional X

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

$$Q = 1,34 - 0,76 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

$$Q = 1,34 - 0,76 \cdot \frac{88,9}{6,35} \cdot \sqrt{\frac{25}{200.000}} = \mathbf{0,96}$$

Onde:

Q = Coeficiente de redução devido a presença de flambagem local

b = Comprimento da aba da cantoneira (cm)

t = Espessura da aba da cantoneira (cm)

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

E = Módulo de elasticidade do Aço A36 ($E = 200 \text{ GPa}$)

$$N_{d,res} = \frac{Q \cdot A_g \cdot f_c}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{d,res} = \frac{0,96 \cdot 21,8 \cdot 13,41}{1,1} = \mathbf{255,13 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{d,res}$ = Esforço resistente de projeto à compressão (kN)

Q = Coeficiente de redução devido a flambagem local

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_c = Tensão resistente à compressão simples

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à tração dos Banzos: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,t} \geq S_{d,t}$$

$$\mathbf{495,45 \text{ kN} \geq 251,07 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,t}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,t}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão dos Banzos: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$\mathbf{255,13 \text{ kN} \geq 249,71 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.10 Verificação e Dimensionamento das Diagonais

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de tração e compressão dentre todas as diagonais. Na treliça, as barras que apresentam os maiores valores de compressão são as 1/21 e 37/19 ($-72.650,29 \text{ N}$). Já as barras que apresentam os maiores valores de tração são as 21/3 e 17/37 ($68.628,74 \text{ N}$). Para a análise foram desenvolvidas duas verificações, a primeira em relação a área da seção transversal em peças tracionadas e a segunda, para os trechos comprimidos, foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções com verificações da ocorrência ou não de flambagem local.

- Verificação das solicitações de tração para escoamento da seção bruta nas diagonais:
Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 3/16"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 4,58 = \mathbf{9,16 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$(R_{d,t})_{ESB} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$(R_{d,t})_{ESB} = \frac{9,16 \cdot 25}{1,1} = \mathbf{208,18 \text{ kN}}$$

Onde:

$(R_{d,t})_{ESB}$ = Resistência a tração de projeto para o escoamento da seção bruta (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação das solicitações de tração para ruptura da seção líquida nas diagonais:
Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 3/16"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 4,58 = \mathbf{9,16 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l}$$

$$C_t = 1 - \frac{1,45}{20} = \mathbf{0,93}$$

Onde:

C_t = Fator redutor aplicado à seção

e_c = Excentricidade do plano da ligação

l = Comprimento estimado de solda da ligação

$$A_{n,ef} = A_g \cdot C_t$$

$$A_{n,ef} = 9,16 \cdot 0,93 = \mathbf{8,52 \text{ cm}^2}$$

Onde:

$A_{n,ef}$ = Área da seção efetiva (cm^2)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

C_t = Fator redutor aplicado à seção

$$(R_{d,t})_{RSL} = \frac{A_{n,ef} \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$(R_{d,t})_{RSL} = \frac{8,52 \cdot 40}{1,35} = \mathbf{252,44 \text{ kN}}$$

Onde:

$(R_{d,t})_{RSL}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção líquida (kN)

$A_{n,ef}$ = Área da seção efetiva (cm^2)

f_u = Tensão de ruptura do Aço, no caso A36 ($f_y = 40 \text{ kN/cm}^2$)

γ_{a2} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de ruptura, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,35$)

- Verificação das solicitações de compressão nas diagonais: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 3/16"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 4,58 = \mathbf{9,16 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{K \cdot l}{i}$$

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{1 \cdot 212}{1,58} = \mathbf{1,52}$$

Onde:

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

K = Coeficiente de flambagem ($k = 1$ para peças bi rotuladas)

l = Comprimento entre apoios (cm)

i = Raio de giração (cm)

$$X = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 > 1,50$$

$$X = \frac{0,877}{1,52^2} = \mathbf{0,38}$$

Onde:

X = Parâmetro adimensional X

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

$$f_c = X \cdot f_y$$

$$f_c = 0,38 \cdot 25 = \mathbf{9,50 \text{ MPa}}$$

Onde:

f_c = Tensão resistente à compressão simples (kN/cm^2)

X = Parâmetro adimensional X

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

$$N_{d,res} = \frac{Q \cdot A_g \cdot f_c}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{d,res} = \frac{1 \cdot 9,16 \cdot 9,50}{1,1} = \mathbf{76,61 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{d,res}$ = Esforço resistente de projeto à compressão (kN)

Q = Coeficiente de redução devido a flambagem local ($Q = 1$, devido a ausência de flambagem local na seção determinada)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_c = Tensão resistente à compressão simples

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à tração das Diagonais: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,t} \geq S_{d,t}$$

$$\mathbf{208,18 \text{ kN} \geq 68,63 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,t}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,t}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Diagonais: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$76,61 \text{ kN} \geq 72,65 \text{ kN}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.11 Verificação e Dimensionamento das Montantes Internas

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de compressão dentre todas as barras. Os elementos que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 28/9 e 30/11 ($-2.709,22 \text{ N}$). Para análise das barras foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções com verificações da ocorrência ou não de flambagem local.

- Verificação das solicitações de compressão nos montantes internos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $1.1/2" \times 3/16"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 3,42 = 6,84 \text{ cm}^2$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{K \cdot l}{i}$$

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{1 \cdot 150}{1,17} = 1,45$$

Onde:

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

K = Coeficiente de flambagem ($k = 1$ para peças bi rotuladas)

l = Comprimento entre apoios (cm)

i = Raio de giração (cm)

$$X = 0,658^{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \leq 1,50$$

$$X = 0,658^{1,45^2} = 0,41$$

Onde:

X = Parâmetro adimensional X

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

$$f_c = X \cdot f_y$$

$$f_c = 0,41 \cdot 25 = \mathbf{10,37 \text{ MPa}}$$

Onde:

f_c = Tensão resistente à compressão simples (kN/cm^2)

X = Parâmetro adimensional X

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

$$N_{d,res} = \frac{Q \cdot A_g \cdot f_c}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{d,res} = \frac{1 \cdot 6,84 \cdot 10,37}{1,1} = \mathbf{64,48 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{d,res}$ = Esforço resistente de projeto à compressão (kN)

Q = Coeficiente de redução devido a flambagem local ($Q = 1$, devido a ausência de flambagem local na seção determinada)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_c = Tensão resistente à compressão simples

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Montantes Internas: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$\mathbf{64,48 \text{ kN} \geq 2,71 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.12 Verificação e Dimensionamento dos Montantes Externos

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de compressão dentre todas as barras. Na treliça, as barras que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 1/20 e 19/38 ($-1.192,13 N$). Para análise das barras foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções com verificações da ocorrência ou não de flambagem local.

- Verificação das solicitações de compressão nos montantes externos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $3" \times 1/4"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 9,29 = \mathbf{18,58 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{K \cdot l}{i}$$

$$\lambda_0 = 0,0113 \cdot \frac{1 \cdot 150}{2,36} = \mathbf{0,72}$$

Onde:

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

K = Coeficiente de flambagem ($k = 1$ para peças bi rotuladas)

l = Comprimento entre apoios (cm)

i = Raio de giração (cm)

$$X = 0,658^{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \leq 1,50$$

$$X = 0,658^{0,72^2} = \mathbf{0,80}$$

Onde:

X = Parâmetro adimensional X

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido

$$f_c = X \cdot f_y$$

$$f_c = 0,80 \cdot 25 = \mathbf{20,12 \text{ MPa}}$$

Onde:

f_c = Tensão resistente à compressão simples (kN/cm^2)

X = Parâmetro adimensional X

f_y = Tensão de escoamento do Aço, no caso A36 ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$)

$$N_{d,res} = \frac{Q \cdot A_g \cdot f_c}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{d,res} = \frac{1 \cdot 18,58 \cdot 20,12}{1,1} = \mathbf{339,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{d,res}$ = Esforço resistente de projeto à compressão (kN)

Q = Coeficiente de redução devido a flambagem local ($Q = 1$, devido a ausência de flambagem local na seção determinada)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

f_c = Tensão resistente à compressão simples

γ_{a1} = Coeficiente parcial de segurança para estados limites de escoamento e flambagem, no caso para combinações normais com Aço Estrutural ($\gamma_{a1} = 1,10$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Montantes Externas: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$\mathbf{339,85 \geq 1,19 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

LEVANTAMENTO DE CARGAS PARA ESTRUTURA EM RESINA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO

Apesar da ausência de normativas oficiais que regulamente e direcione os processos de dimensionamento de estruturas em resina polimérica reforçada com fibra de vidro algumas fabricantes possuem manuais de engenharia que determina procedimentos que devem ser seguidos para elaboração de projetos otimizados e seguros. Entretanto as divergências dos sistemas de medidas e variabilidade de fabricação dificultaram a paridade entre processos, apresentando cisões procedimentais entre as fabricantes no mundo todo.

Para sanar as problemáticas apresentadas, as Instituições de Ensino europeias, grupos e entidades ligados ao mercado de materiais compósitos, criaram em 1989 o grupo denominado “*The European Structural Polymeric Composites Group*” e editaram um manual de orientação no dimensionamento de materiais compósitos. Este material, denominado de “*Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP – Design Code and Handbook*”, teve sua primeira edição em 1996 e se aplica no dimensionamento de materiais compósitos com matriz polimérica em geral.

Com base nestes procedimentos Castro (2014), em seu Trabalho de natureza profissional apresentado ao instituto Politécnico do Porto em Portugal, faz uma síntese teórica e procedimental para projetos com perfis pultrudados em resina polimérica com reforço em fibra de vidro. Neste volume lançado consta especificações dos processos de fabricação, concepção e dimensionamento de estruturas compostas por perfis pultrudados resinados com fibra de vidro. Dotado deste manual e procedimentos foi possível desenvolver o dimensionamento da estrutura das treliças laterais a serem utilizadas na montagem da travessia.

1.13 Cargas Permanentes Comuns entre as Estruturas

Esta etapa do levantamento de solicitações de cargas comuns entre as duas estruturas estudadas é idêntica ao especificado no **Capítulo 7.1** devido a instalação hidráulica de tubulações para as duas soluções serem as mesmas.

1.14 Cargas Características Exclusivas da Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro

1.14.1 Cargas Permanentes Provenientes dos Pesos Próprios da Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro

As cargas permanentes provenientes dos pesos próprios dos elementos formadores das estruturas foram calculadas separadamente de acordo com suas nomenclaturas, conforme indicado pela Figura 10. Para isso foi considerado seções transversais previamente determinadas, seus pesos específicos de acordo com o Manual de Engenharia da Cogumelo e os comprimentos de acordo com o *layout* da estrutura.

- Peso dos Banzos Superiores e Inferiores: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, 6" × 3/8".

$$P_{Banzos} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Banzos} = 4 \cdot 2 \cdot 27 \cdot 4,732 = \mathbf{1022,11 \text{ kg}}$$

Onde:

P_{Banzos} = Peso Total dos Banzos (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Barras Diagonais: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, 6" × 3/8".

$$P_{Diagonais} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Diagonais} = 36 \cdot 2 \cdot 2,12 \cdot 4,732 = \mathbf{724 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Diagonais}$ = Peso Total das Diagonais (*kg*)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (*kg/m*)

l = Comprimento (*m*)

N = Número de peças (*un*)

n = Número de Cantoneiras associadas (*m*)

- Peso das Barras de Montante Internas: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 3/16"$.

$$P_{Mont.int.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Mont.int.} = 34 \cdot 2 \cdot 1,50 \cdot 0,789 = \mathbf{80,48 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Mont.int.}$ = Peso Total das Montantes Internas (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Montante Externas: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $1\ 1/2" \times 1/8"$.

$$P_{Mont.ext.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Mont.ext.} = 4 \cdot 2 \cdot 1,50 \cdot 0,387 = \mathbf{4,64 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Mont.ext.}$ = Peso Total das Montantes Externas (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Travamento Superior: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 1/4"$.

$$P_{Trav.sup.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Trav.sup.} = 19 \cdot 2 \cdot 0,90 \cdot 1,027 = \mathbf{35,12 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Trav.sup.}$ = Peso Total das Barras de Travamento Superior (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Apoio das Tubulações: Seção estimada de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 1/4"$.

$$P_{Apoio.tub.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Apoio.tub.} = 17 \cdot 2 \cdot 0,90 \cdot 1,027 = \mathbf{31,43 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Apoio.tub.}$ = Peso Total das Barras de Apoio das tubulações (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Barras de Diagonais Inferiores: Seção estimada de cantoneira simples de abas iguais, $2" \times 1/4"$.

$$P_{Diag.inf.} = N \cdot n \cdot l \cdot p_{nominal}$$

$$P_{Diag.inf.} = 16 \cdot 1 \cdot 1,75 \cdot 1,027 = \mathbf{28,76 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Diag.inf.}$ = Peso Total das Barras de Diagonais inferiores (kg)

$p_{nominal}$ = Massa Linear da Cantoneira (kg/m)

l = Comprimento (m)

N = Número de peças (un)

n = Número de Cantoneiras associadas (m)

- Peso das Chapas de Ligações dos Nós principais: Chapa em aço inoxidável estimada de $1/4"$.

$$P_{Chapa.lig.princ.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.lig.princ.} = 34 \cdot 0,1225 \cdot 49,80 = \mathbf{207,42 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Chapa.lig.princ.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações Principais (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações das Barras de Montante: Chapa em aço inoxidável estimada de 1/4".

$$P_{Chapa.lig.mont.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.lig.mont.} = 34 \cdot 0,045 \cdot 49,80 = \mathbf{76,19 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Chapa.lig.mont.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações das Barras de Montante (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações de Canto: Chapa em aço inoxidável estimada de 1/4".

$$P_{Chapa.chapa.canto.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.chapa.canto.} = 8 \cdot 0,09 \cdot 49,80 = \mathbf{35,86 \text{ kg}}$$

Onde:

$P_{Chapa.canto.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações de Canto (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso das Chapas de Ligações da Treliça no pilar e na manta de Neoprene: Chapa em aço inoxidável estimada de 3/8".

$$P_{Chapa.trel.pilar.} = N \cdot A \cdot p_{chapa}$$

$$P_{Chapa.trel.pilar.} = 4 \cdot 0,275 \cdot 74,48 = \mathbf{81,93\ kg}$$

Onde:

$P_{Chapa.trel.pilar.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações da Treliça no pilar e na manta de Neoprene (*kg*)

p_{chapa} = Massa por metro quadrado de Chapa (*kg/m²*)

N = Número de peças (*un*)

A = Área da peça (*m²*)

- Peso dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações: Peso estimado de 40 quilogramas por conjunto de apoio.

$$P_{Apoio} = N \cdot p_{Apoio}$$

$$P_{Apoio} = 10 \cdot 70 = \mathbf{700\ kg}$$

Onde:

P_{Apoio} = Peso Total dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações (*kg*)

p_{Apoio} = Massa estimada por conjunto (*kg/cj*)

N = Número de peças (*un*)

- Peso Total da Treliça: Somatória dos pesos das peças calculadas acrescido de 10% estimando os pesos das soldas, parafusos, arruelas e chumbadores.

$$\begin{aligned} P_{Total.treli.} = & (P_{Banzos} + P_{Diagonais} + P_{Mont.int.} + P_{Mont.ext.} + P_{Trav.sup.} + P_{Apoio.tub.} \\ & + P_{Diag.inf.} + P_{Chapa.lig.princ.} + P_{Chapa.lig.mont.} + P_{Chapa.chapa.canto.} \\ & + P_{Chapa.trel.pilar.} + P_{Apoio}) \cdot 1,10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{Total.treli.} = & (1.022,1 + 724,0 + 80,48 + 4,64 + 35,12 + 31,43 + 28,76 + 207,42 \\ & + 76,19 + 35,86 + 81,93 + 700) \cdot 1,10 \end{aligned}$$

$$P_{Total.treli.} = \mathbf{3.330,73\ kg}$$

Onde:

$P_{Total.treli.}$ = Peso Total da Treliça (*kg*)

P_{Banzos} = Peso Total dos Banzos (*kg*)

$P_{Diagonais}$ = Peso Total das Diagonais (*kg*)

$P_{Mont.int.}$ = Peso Total das Montantes Internas (kg)

$P_{Mont.ext.}$ = Peso Total das Montantes Externas (kg)

$P_{Trav.sup.}$ = Peso Total das Barras de Travamento Superior (kg)

$P_{Apoio.tub.}$ = Peso Total das Barras de Apoio das tubulações (kg)

$P_{Diag.inf.}$ = Peso Total das Barras de Diagonais inferiores (kg)

$P_{Chapa.lig.princ.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações Principais (kg)

$P_{Chapa.lig.mont.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações das Barras de Montante (kg)

$P_{Chapa.chapa.canto.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações de Canto (kg)

$P_{Chapa.trel.pilar.}$ = Peso Total das Chapas de Ligações da Treliça no pilar e na manta de Neoprene (kg)

P_{Apoio} = Peso Total dos Elementos de Apoios e Abraçadeiras das Tubulações (kg)

- Carga Solicitante na estrutura: Carga total solicitante característica resultante do Peso Próprio da Estrutura.

$$F_{PPE,k} = P_{Total.treli.} \cdot g$$

$$F_{PPE,k} = 3.330,73 \cdot 9,81 = \mathbf{32.674,46 \text{ N}}$$

Onde:

$F_{PPE,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso próprio da estrutura (kN)

$P_{Total.treli.}$ = Peso Total da Treliça (kg)

g = Gravidade (m/s^2)

1.14.2 Carga Proveniente da Força do Vento Atuando na Estrutura em Resina Reforçada com Fibra de Vidro

O levantamento e determinação das solicitações de cálculo proveniente dos esforços gerados pela ação dos ventos nas estruturas em Resina reforçada com Fibra de Vidro foi considerada as mesmas condicionantes de cálculo da estrutura em aço.

- Velocidade do Vento: Velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano apresentada no gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s do Anexo C da NBR 6123:2013.

$$V_0 = 35 \text{ m/s}$$

Onde:

V_0 = Velocidade básica do Vento (m/s)

- Fator Topográfico S_1 : Fator que leva em consideração as condições topográficas do terreno onde será implantado o projeto, neste caso foi considerado um terreno plano ou fracamente acidentado.

$$S_1 = 1,0$$

Onde:

S_1 = Fator Topográfico S_1

- Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (Fator S_2): Fator que leva em consideração o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação. O valor discriminado abaixo foi retirado da tabela 2 da NBR 6123:2013, considerando um Terreno plano em região lisa do Rio (Categoria I), maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m (Classe B) e $z < 5 \text{ metros}$.

$$S_2 = 1,04$$

Onde:

S_2 = Fator de Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

- Fator Estatístico S_3 : baseia-se em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Foi considerado Grupo 3.

$$S_3 = 0,95$$

Onde:

S_3 = Fator Estatístico

- Velocidade Característica do Vento: Velocidade do vento determinada para as características específicas do projeto.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

$$V_k = 35 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot 0,95 = \mathbf{34,58 \text{ m/s}}$$

Onde:

V_k = Velocidade característica do Vento (m/s)

V_0 = Velocidade básica do Vento (m/s)

S_1 = Fator Topográfico S_1

S_2 = Fator de Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

S_3 = Fator Estatístico

- Pressão dinâmica: Pressão dinâmica do vento determinada para as características do projeto.

$$q = 0,613 \cdot V_k^2$$

$$q = 0,613 \cdot 34,58^2 = \mathbf{733,01 \text{ N/m}^2}$$

Onde:

q = Pressão dinâmica do Vento (N/m^2)

V_k = Velocidade característica do Vento (m/s)

- Área lateral das tubulações: Área efetiva lateral das tubulações DN600 que sofre ação do vento.

$$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot \emptyset \cdot C}{2}$$

$$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot 0,635 \cdot 27}{2} = \mathbf{26,93 \text{ m}^2}$$

Onde:

A_{tubo} = Área lateral do tubo incidente de Pressão dinâmica (m^2)

$\emptyset$ = Diâmetro externo da tubulação (m)

C = Comprimento da Tubulação (m)

- Área de perfis: Área estimada efetiva de perfis incidente da Pressão dinâmica.

$$A_{perfis} = 17,00 \text{ m}^2$$

Onde:

A_{perfis} = Área de perfis incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Área de chapas: Área estimada efetiva de chapas incidente da Pressão dinâmica.

$$A_{chapas} = 3,76 \text{ m}^2$$

Onde:

A_{chapas} = Área de chapas incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Área dos perfis e tubulações: Área efetiva que sofre ação do vento.

$$A = A_{tubo} + A_{perfis} + A_{chapas}$$

$$A = 26,93 + 17,00 + 3,76 = 47,69 \text{ m}^2$$

Onde:

A = Área total incidente de Pressão dinâmica (m^2)

A_{tubo} = Área lateral do tubo incidente de Pressão dinâmica (m^2)

A_{perfis} = Área lateral de perfis incidente da Pressão dinâmica (m^2)

A_{chapas} = Área de chapas incidente da Pressão dinâmica (m^2)

- Força do Vento: Força do Vento atuando na estrutura. Considerou-se $C_a = 1$.

$$F_{v,k} = C_a \cdot q \cdot A$$

$$F_{v,k} = 1 \cdot 733,01 \cdot 47,69 = 34.957,27 \text{ N}$$

Onde:

$F_{v,k}$ = Força do Vento Característica (N)

C_a = Coeficiente de Arrasto

q = Pressão estática do Vento (N/m^2)

A = Área total incidente de Pressão dinâmica (m^2)

1.15 Cálculo e Determinação das Solicitações de Projeto

Em similaridade com estruturas metálicas com as cargas características obtidas de peso próprio, peso da tubulação em carga e força atuante do vento foi necessário desenvolver os cálculos de combinação majorada para determinar as solicitações de projeto conforme as descrições abaixo. Para isso a NBR 8800:2008 adota uma padronização compatível com as demais normas nacionais e internacionais de segurança, aplicando coeficientes de majoração e ações combinadas expressando as situações com efeitos mais desfavoráveis.

- Força solicitada de peso próprio da estrutura e força do vento disposta em cargas distribuídas: Solicitação de projeto majorada de acordo com os coeficientes γ_f prescritos na norma para combinações normais de cargas permanentes e variáveis (disposto na Tabela 5).

$$F_{d,d} = \frac{F_{PPE,k} \cdot \gamma_{f1} + F_{v,k} \cdot \gamma_{f3}}{c}$$

$$F_{d,d} = \frac{32.674,46 \cdot 1,25 + 34.957,25 \cdot 1,4}{27} = \mathbf{3.325,30 \text{ N/m}}$$

Onde:

$F_{d,d}$ = Força distribuída de projeto gerada pelo peso próprio da estrutura e ação do vento (N/m)

$F_{PPE,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso próprio da estrutura (N)

γ_{f1} = Coeficiente de Segurança Parcial para Peso Próprio similar ao de Estruturas Metálicas

$F_{v,k}$ = Força do Vento Característica (N)

γ_{f3} = Coeficiente de Segurança Parcial para Ação do vento

C = Comprimento da Trelíça (m)

- Força atuante oriunda de peso próprio das tubulações em carga disposta em solicitações concentradas: Solicitação de projeto pontual devido a dissipação das cargas da tubulação para a estrutura serem feitas pelos 10 apoios de tubos projetados. Valores majorados de acordo com os coeficientes γ_f prescritos na norma para combinações normais de cargas permanentes e variáveis (disposto na Tabela 5, foi considerado o mesmo coeficiente ao de estruturas metálicas devido ao critério de produção e pouca variabilidade de pesos).

$$F_{p,d} = \frac{F_{Comum,k} \cdot \gamma_{f2}}{n}$$

$$F_{p,d} = \frac{112.889,37 \cdot 1,25}{10} = 14.111,17 \text{ N}$$

Onde:

$F_{p,d}$ = Força pontual de projeto gerada pelo peso das tubulações (N)

$F_{comum,k}$ = Cargas características solicitantes devido ao Peso dos Tubos e Esgoto (N)

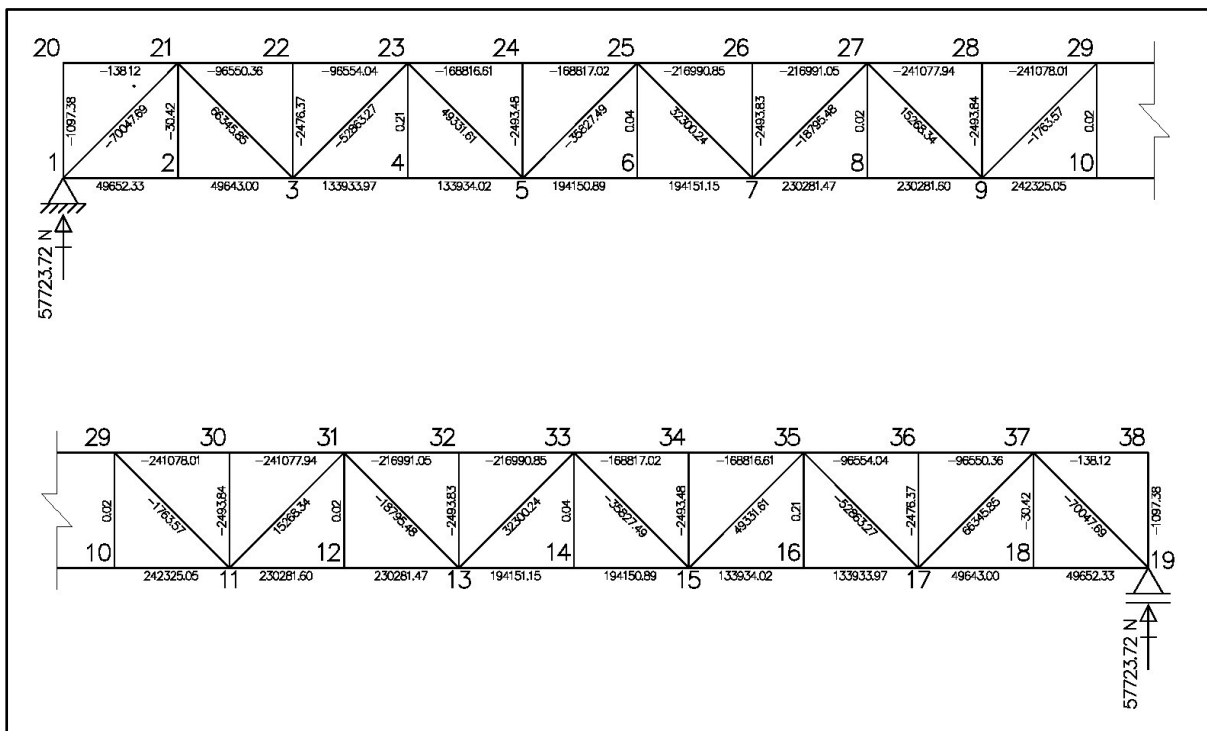
γ_{f2} = Coeficiente de Segurança Parcial para Elementos construtivos em geral e equipamentos

n = Número de apoios

DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO EM RESINA REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO

Após o levantamento de cargas, combinação das solicitações e lançamento do Layout das estruturas no *software Ftool* foi possível a obtenção dos diagramas de esforços axiais, disponibilizado na Figura 12 abaixo. Para isso os valores obtidos no tópico 9 foram lançados na vista frontal da treliça no software considerando que cada vista da treliça receberá metade das solicitações calculadas.

Figura 12 – Diagrama de Esforços Axiais da Estrutura em PRFV



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

1.16 Verificação e Dimensionamento dos Banzos Superiores e Inferiores

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de tração e compressão dentre todas as barras. Na treliça, as barras que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 28/29 e 29/30 ($-241.078,01 \text{ N}$). Já as barras que apresentam os maiores valores de tração são as barras 9/10 e 10/11 ($242.325,05 \text{ N}$). Para análise das barras foram desenvolvidas duas verificações, a primeira em relação a área da seção transversal em peças tracionadas e a segunda, para as barras comprimidas, foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções.

Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material: Considerados para as condições de fornecimento dos materiais disponíveis no mercado brasileiro de acordo com Castro (2014).

$$\gamma_m = \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3}$$

$$\gamma_m = 1,15 \cdot 1,1 \cdot 3 = \mathbf{3,80}$$

Onde:

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material

$\gamma_{m,1}$ = Coeficiente de Segurança devido ao desvio das propriedades do material relativamente aos ensaios ($\gamma_{m,1} = 1,15$ para pultrusão obtidas de testes de amostras)

$\gamma_{m,2}$ = Coeficiente de Segurança devido Material e processo de produção ($\gamma_{m,2} = 1,10$ para pultrusão com peças completamente pós-curadas na aplicação)

$\gamma_{m,3}$ = Coeficiente de Segurança devido ao Efeitos ambientais e duração do carregamento ($\gamma_{m,3} = 3,0$ para Temperatura de dimensionamento de operação entre 25 – 30 graus Celsius com carregamentos de longo prazo e HDT entre 55 – 80 graus Celsius)

- Verificação das solicitações de tração para ruptura da seção bruta nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $6" \times 3/8"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$(N_{t,Rd})_{RSB} = \frac{A_g \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m}$$

$$(N_{t,Rd})_{RSB} = \frac{56,20 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{305,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$(N_{t,Rd})_{RSB}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção bruta (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm²)

$\sigma_{x,t,k}$ = Tensão resistente à tração da seção na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{x,t,k} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação das solicitações de tração para ruptura da seção líquida nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, 6" × 3/8".

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm²)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm²)

n = Número de peças associadas

$$A_e = A_g - n \cdot (\emptyset_{parafuso} - 2 - 1,5) \cdot t$$

$$A_e = 56,20 - 2 \cdot (1,59 - 0,2 - 0,15) \cdot 0,95 = \mathbf{53,84 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_e = Área líquida da seção (cm²)

A_g = Área bruta da seção (cm²)

n = Número de furos na seção considerada

$\emptyset_{parafuso}$ = Diâmetro externo do parafuso estimado com Ø5/8" (cm)

t = Espessura da seção (cm)

$$(N_{t,Rd})_{RSL} = \frac{0,9 \cdot A_e \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m}$$

$$(N_{t,Rd})_{RSL} = \frac{0,9 \cdot 53,84 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{263,70 \text{ kN}}$$

Onde:

$(N_{t,Rd})_{RSL}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção líquida (kN)

A_e = Área líquida da seção (cm²)

$\sigma_{x,t,k}$ = Tensão resistente à tração da seção na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{x,t,k} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação das solicitações de compressão nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, 6" × 3/8".

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm²)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm²)

n = Número de peças associadas

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{56,20 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{305,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm²)

$\sigma_{c,Rd}$ = Tensão resistente à compressão na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{c,Rd} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação da resistência á flambagem nos banzos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais com contenção lateral a cada 150 cm, 6" × 3/8".

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot E_{x,d} \cdot J}{(k \cdot L)^2 \cdot \gamma_m}$$

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot 1.725,97 \cdot 2 \cdot 638,90}{(1 \cdot 150)^2 \cdot 3,80} = \mathbf{254,58 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

$E_{x,d}$ = Módulo de Elasticidade à Compressão ($E_{x,d} = 1.725,97 \text{ kN/cm}^2$)

J = Momento de inércia (cm^4)

L = Comprimento do membro (m)

k = Fator do comprimento efetivo, no caso ($k = 1$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à tração dos Banzos: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,t} \geq S_{d,t}$$

$$\mathbf{263,70 \text{ kN} \geq 242,33 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,t}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,t}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão dos Banzos: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$\mathbf{254,58 \text{ kN} \geq 241,08 \text{ kN}}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.17 Verificação e Dimensionamento das Diagonais

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de tração e compressão dentre todas as barras. Na treliça, as barras que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 1/21 e 37/19 ($-70.047,69 \text{ N}$). Já as barras que apresentam os maiores valores de tração são as barras 21/3 e 17/37 ($66.345,85 \text{ N}$). Para análise das barras foram desenvolvidas duas verificações, a primeira em relação a área da seção transversal em peças tracionadas e a segunda, para as barras comprimidas, foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções.

- Verificação das solicitações de tração para escoamento da seção bruta nas diagonais:
Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $6" \times 3/8"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$(N_{t,Rd})_{RSB} = \frac{A_g \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m}$$

$$(N_{t,Rd})_{RSB} = \frac{56,20 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{305,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$(N_{t,Rd})_{RSB}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção bruta (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

$\sigma_{x,t,k}$ = Tensão resistente à tração da seção na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{x,t,k} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação das solicitações de tração para ruptura da seção líquida nas diagonais:
Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $6" \times 3/8"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$A_e = A_g - n \cdot (\emptyset_{\text{parafuso}} - 2 - 1,5) \cdot t$$

$$A_e = 56,20 - 2 \cdot (1,59 - 0,2 - 0,15) \cdot 0,95 = \mathbf{53,84 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_e = Área líquida da seção (cm^2)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

n = Número de furos na seção considerada

$\emptyset_{\text{parafuso}}$ = Diâmetro externo do parafuso estimado com $\emptyset 5/8''$ (cm)

t = Espessura da seção (cm)

$$(N_{t,Rd})_{RSL} = \frac{0,9 \cdot A_e \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m}$$

$$(N_{t,Rd})_{RSL} = \frac{0,9 \cdot 53,84 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{263,70 \text{ kN}}$$

Onde:

$(N_{t,Rd})_{RSL}$ = Resistência a tração de projeto para a ruptura da seção líquida (kN)

A_e = Área líquida da seção (cm^2)

$\sigma_{x,t,k}$ = Tensão resistente à tração da seção na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{x,t,k} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação das solicitações de compressão nas diagonais: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $6'' \times 3/8''$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 28,1 = \mathbf{56,20 \text{ cm}^2}$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{56,20 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{305,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

$\sigma_{c,Rd}$ = Tensão resistente à compressão na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{c,Rd} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação da resistência á flambagem nas diagonais: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais com contenção lateral a cada 212,5 cm, 6" × 3/8".

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot E_{x,d} \cdot J}{(k \cdot L)^2 \cdot \gamma_m}$$

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot 1.725,97 \cdot 2 \cdot 638,90}{(1 \cdot 212,5)^2 \cdot 3,82} = \mathbf{126,85 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

$E_{x,d}$ = Módulo de Elasticidade à Compressão ($E_{x,d} = 1.725,97 \text{ kN/cm}^2$)

J = Momento de inércia (cm^4)

L = Comprimento do membro (m)

k = Fator do comprimento efetivo, no caso ($k = 1$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à tração das Diagonais: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,t} \geq S_{d,t}$$

$$263,70 \text{ kN} \geq 66,35 \text{ kN}$$

Onde:

$R_{d,t}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,t}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Diagonais: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$126,85 \text{ kN} \geq 70,05 \text{ kN}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.18 Verificação e Dimensionamento das Montantes Internas

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de compressão dentre todas as barras. Os elementos que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 28/9 e 30/11 ($-2.493,84 \text{ N}$). Para análise das barras foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções.

- Verificação das solicitações de compressão nos montantes internos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $2" \times 3/16"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 4,65 = 9,30 \text{ cm}^2$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{9,30 \cdot 20,68}{3,80} = \mathbf{50,61 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

$\sigma_{c,Rd}$ = Tensão resistente à compressão na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{c,Rd} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação da resistência á flambagem nos montantes internos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais com contenção lateral a cada 150 cm, 2" × 3/16 ".

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot E_{x,d} \cdot J}{(k \cdot L)^2 \cdot \gamma_m}$$

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot 1.725,97 \cdot 2 \cdot 11,40}{(1 \cdot 150)^2 \cdot 3,80} = \mathbf{4,54 \text{ kN}}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

$E_{x,d}$ = Módulo de Elasticidade à Compressão ($E_{x,d} = 1.725,97 \text{ kN/cm}^2$)

J = Momento de inércia (cm^4)

L = Comprimento do membro (m)

k = Fator do comprimento efetivo, no caso ($k = 1$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Montantes Internas: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$4,54 \text{ kN} \geq 2,49 \text{ kN}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

1.19 Verificação e Dimensionamento das Montantes Externas

Para este cálculo, considerou-se os maiores valores das reações de compressão dentre todas as barras. Na treliça, as barras que apresentam os maiores valores de compressão são as barras 1/20 e 19/38 ($-1.097,38 \text{ N}$). Para análise das barras foi verificado o dimensionamento calculando as tensões resistentes das seções com verificações da ocorrência ou não de flambagem local.

- Verificação das solicitações de compressão nos montantes externos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $1,1/2" \times 1/8"$.

$$A_g = n \cdot A_p$$

$$A_g = 2 \cdot 2,34 = 4,68 \text{ cm}^2$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

A_p = Área da seção individual de cada peça (cm^2)

n = Número de peças associadas

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{4,68 \cdot 20,68}{3,80} = 25,47 \text{ kN}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

A_g = Área bruta da seção (cm^2)

$\sigma_{c,Rd}$ = Tensão resistente à compressão na direção longitudinal, no caso ($\sigma_{c,Rd} = 20,68 \text{ kN/cm}^2$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação da resistência á flambagem nos montantes externos: Seção de cantoneiras duplas de abas iguais, $1.1/2" \times 1/8"$.

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot E_{x,d} \cdot J}{(k \cdot L)^2 \cdot \gamma_m}$$

$$(N_{c,Rd})_{flamb.} = \frac{\pi^2 \cdot 1.725,97 \cdot 2 \cdot 3,26}{(1 \cdot 150)^2 \cdot 3,80} = \mathbf{1,30\ kN}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$ = Resistência a compressão de projeto (kN)

$E_{x,d}$ = Módulo de Elasticidade à Compressão ($E_{x,d} = 1.725,97\ kN/cm^2$)

J = Momento de inércia (cm^4)

L = Comprimento do membro (m)

k = Fator do comprimento efetivo, no caso ($k = 1$)

γ_m = Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material ($\gamma_m = 3,80$)

- Verificação Final da capacidade de suporte à compressão das Montantes Internas: Foi comparada a menor resistência calculada com a solicitação de projeto.

$$R_{d,c} \geq S_{d,c}$$

$$\mathbf{1,30\ kN \geq 1.10\ kN}$$

Onde:

$R_{d,c}$ = Esforço resistente de projeto à tração (kN)

$S_{d,c}$ = Esforço solicitante de projeto à tração (kN)

COMPARATIVO TÉCNICO

A alternativa estrutural com materiais compósitos estruturais de resina polimérica reforçados com fibra de vidro se apresenta, em condições adequadas de projetos e aplicabilidade, como uma nova opção para a construção civil. Comparado ao Aço, as alternativas em PRFV vêm se tornando uma solução viável para aplicações mais modernas e arrojadas em que a variabilidade e versatilidade dos componentes do material seja o elemento primordial para o desenvolvimento de projetos mais resistentes, duradouros e tecnológicos.

Já as estruturas metálicas comumente projetadas e que são amplamente difundidas apresentam ao projetista maior seguridade de cálculo, respaldo normativo e experiência técnica disseminada. Tal sensação se dá pelo rigor e técnica industrial de fabricação, desenvolvimento de estudos e disciplinas nas instituições de ensino superior, execução de projetos desde o século XIX, disposição de ampla bibliografia e padronização normativa internacional. Entre a seguridade do aço e a variabilidade do PRFV fica a critério do engenheiro determinar quais as condições devem ser levadas em considerações para identificar a solução mais adequada.

Para isso a análise técnica entre os materiais deve ser elaborada de modo a prever as possíveis condições em que cada solução passa a ser mais vantajosas. Tal análise necessita contemplar possíveis requisitos comparativos característicos de acordo com as relações de custo-benefício, capacidade técnica de elaboração dos projetos, disponibilidade de mão de obra especializada, materiais de qualidade, agilidade de execução, conforto e durabilidade.

1.20 Capacidade Técnica de Elaboração de Projetos

Atualmente os projetos estruturais em aço representam boa parte dos sistemas construtivos executados no cenário nacional. A disposição de projetistas especializados e com competência técnica para elaboração destes projetos se tornou abrangente devido presença de disciplinas acadêmicas ministradas na totalidade das instituições de ensinos superiores brasileiros. A alta disponibilidade de pós-graduações e elaboração de pesquisas acadêmicas de mestrado, doutorado e pós-doutorado ampliou o conhecimento sobre o material, preparando a comunidade técnica para a desenvolvimento do mercado nacional de estruturas metálicas.

Por outro lado, os materiais compósitos ainda se encontram em estágio inicial de crescimento no mercado nacional. Não são encontrados grandes projetistas de estruturas em compósitos fora das fabricantes presentes nos centros Rio-São Paulo, pois boa parte dos projetos de pequeno porte (patamares, escadas e torres) executados são desenvolvidos pelas próprias produtoras dos perfis para casos específicos. A ausência de normatização e informação escassa dos modos de desenvolvimento dos projetos dificultam a disseminação do material e apresentação de novas soluções ao atual cenário da construção civil.

Atualmente são encontrados cursos de pós-graduação em materiais compósitos fornecidos pela Associação latino-americana em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, mestrados e doutorados ministrados pela Universidade Federal Fluminense e Departamento de engenharia de materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1.21 Disponibilidade de Mão de Obra

A disponibilidade de mão de obra especializada para execução correta das estruturas em PRFV também são um problema para a ampliação do número de projetos no mercado brasileiro. Neste tópico o aço apresenta uma solução mais vantajosa em grande parte da realidade nacional devido a maior facilidade da elaboração de uma equipe com conhecimento técnico na área de execução e montagem de estruturas metálicas. Inegavelmente grande parte dos trabalhadores especializados em materiais compósitos se encontram, atualmente, no corpo técnico das grandes fabricantes.

1.22 Qualidade e Disponibilidade dos Materiais

Atualmente o mercado brasileiro possui grandes fabricantes de perfis pultrudados com certificações internacionais, apresentando materiais com qualidade, durabilidade, variabilidade de resinas, fibras e aditivos de acordo com a necessidade do cliente. As principais empresas de pultrudados brasileiras (Cogumelo, Enmac e Stratus) disponibilizam ao mercado nacional um catálogo de produtos que variam entre guarda-corpos, leitos para bandejamento elétrico, grades de piso, escadas, perfis estruturais com diversas seções até 8" e projetos estruturais pré-fabricados e montados previamente em fábrica (patamares, passarelas, escadas, etc).

Figura 13 – Variabilidade de Perfis



Fonte: Catálogo da COGUMELO.

Apesar de materiais de extrema qualidade serem desenvolvidos e distribuídos no Brasil é extremamente importante tomar alguns cuidados na compra e inspeção dos perfis em obra, objetivando identificar erros de fabricação que possam vir a comprometer a capacidade estrutural das peças. A ALMACO desenvolveu o Guia de Compra e Inspeção para o Mercado de Pultrusão, indicando quais verificações devem ser aplicadas para a obtenção de materiais sem apresentação de danos. O documento indica explicitamente a necessidade da escolha correta dos perfis, atentando-se ao tipo de seção, indicação dos reforços e tipo de resina aditivada a ser utilizada na fabricação dos produtos.

Para a definição da seção deve ser analisada, vetorialmente, o tipo de esforço a qual os elementos serão submetidos e relaciona-la aos índices de resistências do material. Deste modo são identificados os tipos de perfis adequados, dentre todas as variações disponibilizadas pelos fabricantes, para a utilização específica projetada, evitando subdimensionamentos, altas deformações e rompimento da estrutura. Para a determinação dos reforços devem ser levados em consideração as dimensões e pesos dos cabos de fibra, a garantia do fabricante de conseguir impregnar resina por todos os elementos (não há problemas caso o fabricante garanta a molhabilidade de cabos pesados) e a direção do esforço para determinar a distribuição dos reforços.

Na especificação da fibra também é necessário se atentar ao *blinder*, produto químico que cobre os filamentos para melhorar a aderência entre o reforço e a matriz de resina, compatibilizando-a com a resina escolhida pelo cliente. Por fim, escolhe-se a resina e seus possíveis aditivos. São encontradas inúmeras opções de resinas disponíveis no mercado internacional, entretanto no Brasil as mais utilizadas pelo processo de pultrusão são as de poliéster, éster-vinílicas, acrílicas, epóxi e fenólicas, permitindo produzir perfis com características diversas, adequados às aplicações existentes a nossa realidade. Os fabricantes de resinas definem em seus boletins técnicos os índices de resistência mecânica e a produtos químicos em variadas concentrações e temperaturas de uso.

Além da escolha da resina, o fabricante deve aditar o composto resinado utilizado no processo, visando à melhoria da performance para obtenção da cura, atendimento aos requisitos específicos solicitados pelo cliente, precisão dimensional aumentada, resistência ao fogo, não emissão de fumaça tóxica, diminuição do parâmetro de absorção de água, resistência a raios UV, entre outras. Após a definição dos perfis, dimensionamentos, desenvolvimento de todo o projeto e definição final da solução deverão ser iniciados os procedimentos executórios das obras. Nesta etapa é de extrema importância o seguimento dos procedimentos adequados para que a estrutura implantada consiga suprir todas as exigências para qual foi projetada.

Sendo assim a utilização dos materiais com a qualidade apresentada pelas fabricantes é primordial. Para isso a ALMACO apresentou em seu guia um resumo com enfoque na inspeção visual dos produtos de acordo com a norma internacional ASTM D4385-13. Segue abaixo relação de defeitos a serem evitados pela inspeção visual:

- Desvios de acabamentos:
 - Definição: Fendas, ressaltos, falta de material de superfície ou a combinação destes. Geralmente resultados de pequenos desvios nos processos de acabamento das peças;
 - Nota técnica: Em geral estes defeitos não afetam a funcionalidade estrutural das peças;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável ou não dependendo das especificações do produto. Ou seja, caso o aspecto de beleza arquitetônica do produto seja primordial ao projeto poderá ser solicitado a troca das peças.

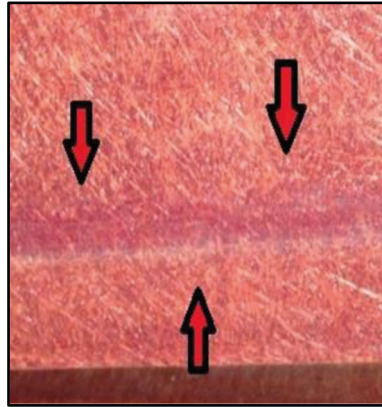
Figura 14 – Defeitos de acabamentos



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Desvios de apresentação de partes do perfil com excesso de resina:
 - Definição: Áreas que apresentam ligeiro excesso de resina;
 - Nota técnica: Defeito estético raro em pultrudados devido aos procedimentos do processo de fabricação;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável desde que seja identificado que não houve redução do número de cabos do reforço neste ponto da seção.

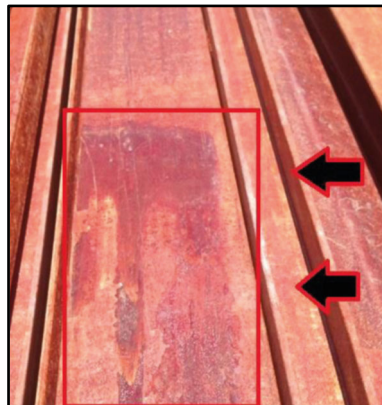
Figura 15 – Áreas com excesso de resinas



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Desvios de apresentação de cascas soltas no perfil:
 - Definição: Placas ou fragmentos de resinas despendidas dos moldes e aderidas na superfície dos perfis;
 - Nota técnica: Não apresenta comprometimento estrutural caso os critérios de aceitação sejam atendidos;
 - Critério de aceitação/rejeição: Permitido exclusivamente caso a remoção da placa rígida não exponha as fibras.

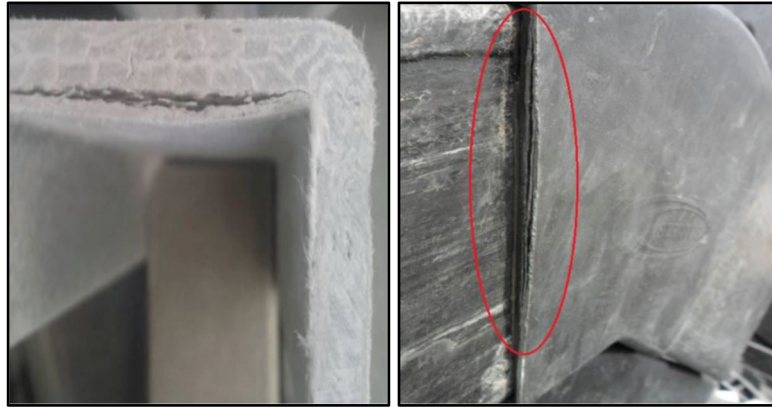
Figura 16 – Casca na superfície do perfil



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Delaminação:
 - Definição: Separação de duas ou mais camadas do reforço no interior do pultrudado;
 - Nota técnica: Compromete a funcionalidade estrutural do perfil;
 - Critério de aceitação/rejeição: Inaceitável.

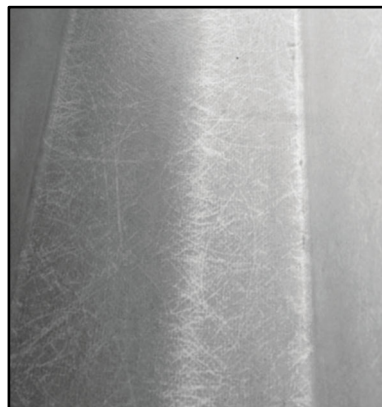
Figura 17 – Estruturas que apresentaram delaminação.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Descoloração:
 - Definição: Mudança de faixa ou outro padrão visual, logo após sua fabricação, na superfície do perfil;
 - Nota técnica: Defeito estético que pode ocorrer no processo de pultrusão. Não afeta funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável ou não dependendo das especificações do produto. Ou seja, caso o aspecto de beleza arquitetônica do produto seja primordial ao projeto poderá ser solicitado a troca das peças.

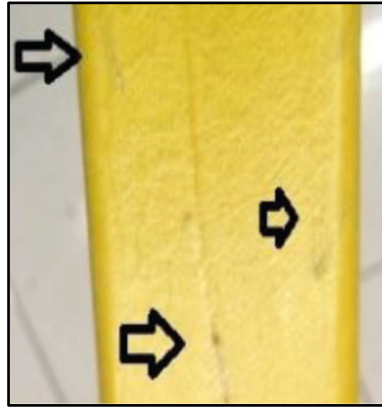
Figura 18 – Estrutura que apresentou descoloração.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Apresentação visível das emendas de reforço:
 - Definição: Visualização da emenda de reforços por sobreposição;
 - Nota técnica: Defeito estético e não afeta funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Permitido caso não haja alteração das dimensões do perfil.

Figura 19 – Exposição das emendas dos reforços.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Desvio dos eixos e empenamento:
 - Definição: Distorções nos pultrudados dos planos em relação aos eixos originais;
 - Nota técnica: Geralmente não afeta a funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável caso a flecha seja inferior a 30 milímetros em um comprimento total de 6,0 metros.

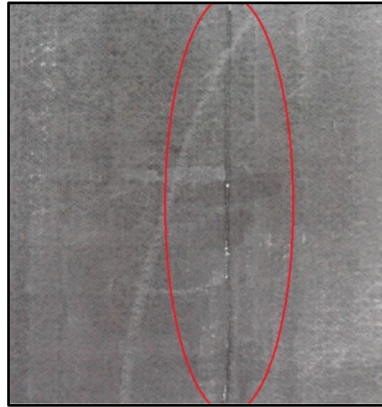
Figura 20 – Perfil empenado.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Apresentação de fendas:
 - Definição: Múltiplas fendas (intermitentes ou contínuas) na superfície do pultrudado, não implicando na exposição dos reforços;
 - Nota técnica: Defeito estético e não apresenta comprometimento estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável caso a largura da fenda seja menor que 3 milímetros e não apresente redução da espessura do perfil em mais de 10%.

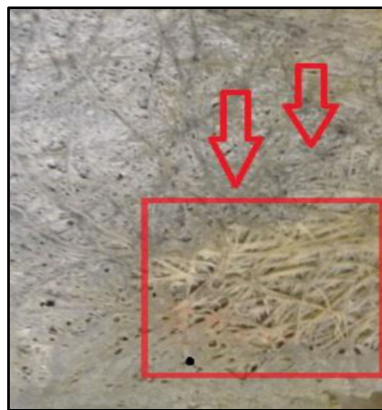
Figura 21 – Fenda transversal em perfil pultrudado.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Exposição do reforço por falta de resina:
 - Definição: Fibras secas não impregnadas corretamente por resina durante o processo de pultrusão;
 - Nota técnica: Defeito estético e não apresenta comprometimento estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável caso a largura da fenda seja menor que 3 milímetros e não apresente redução da espessura do perfil em mais de 10%.

Figura 22 – Superfície de compósitos com fibras secas expostas.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Desenvolvimento de fissuração interna:
 - Definição: Fissuras encontradas no interior do perfil em casos onde haja reforços transversais aos filamentos longitudinais;
 - Nota técnica: Normalmente não afetam funcionalidade estrutural caso os critérios de aceitação forem rigorosamente cumpridos;

- Critério de aceitação/rejeição: Permitido se as fissuras não atingirem a superfície dos produtos (não expondo as fibras) e não houver ruptura dos reforços longitudinais. Testes com amostras para validação podem ser solicitados.

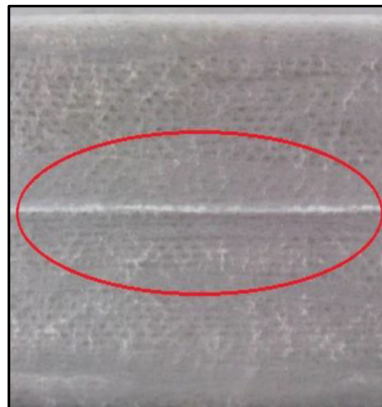
Figura 23 – Perfil E que apresentou fissurações internas.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Linhas de divisão dos moldes:
 - Definição: Saliências longitudinais ao longo das superfícies do perfil pultrudado;
 - Nota técnica: Normalmente não afetam funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Aceitável caso a altura da saliência não exceda meio milímetro.

Figura 24 – Identificação das linhas de divisão dos moldes no perfil.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Apresentação de manchas escuras nas superfícies:
 - Definição: Manchas escuras superficiais estritamente incapazes de serem removidas por limpeza, lavagem ou aplicação de solventes;
 - Nota técnica: Normalmente são defeitos estéticos, não afetando a capacidade estrutural de carga dos perfis;

- Critério de aceitação/rejeição: As áreas de manchas não devem ser superiores a 10%. Caso contrário a aceitação deverá ser avaliada sob maiores critérios.

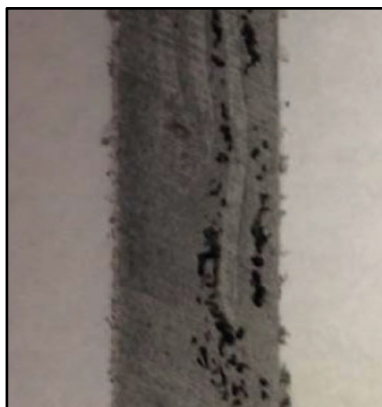
Figura 25 – Manchas escuras em perfis.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Apresentação de porosidades e vazios internos:
 - Definição: Presença considerável de cavidade sob a superfície do pultrudado. Geralmente pode ser observado exclusivamente nas seções transversais do perfil;
 - Nota técnica: Defeito grave caso comprometa a resistência estrutural do perfil;
 - Critério de aceitação/rejeição: No corte transversal do perfil, para cada 1,6 mm de espessura e 25,4 mm de largura, podem aparecer no máximo duas cavidades. Portanto, em um perfil de 3,2 mm de espessura, a cada 25,4 mm podem haver 4 cavidades; para perfil de 4,8 mm, 6 cavidades; para perfil de 6,35 mm, 8 cavidades. Só serão aceitos quando a absorção de água é de 0,5% em peso. Se as características (incluindo absorção de água) atenderem às informações acima, a forma pode ser aceita.

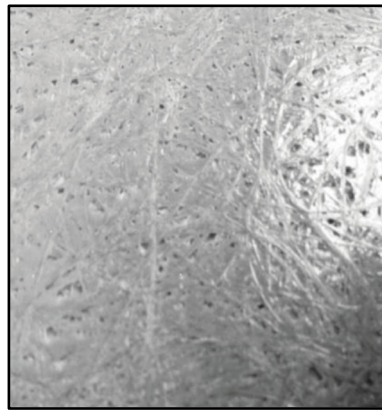
Figura 26 – Seção transversal em perfil que apresenta porosidade interna.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Apresentação de porosidades e vazios superficiais:
 - Definição: Presença de pequenos poros na superfície do composto;
 - Nota técnica: Não apresenta comprometimento das funcionalidades estruturais caso os critérios de aceitação sejam cumpridos;
 - Critério de aceitação/rejeição: Em peças especificadas com véu superficial são permitidos poros com dimensões máximas de 2 mm e 0,5 mm de profundidade, com o máximo de 20 poros por centímetros quadrados. Caso não haja exigência de véu qualquer quantidade de poros é permitida.

Figura 27 – Seção transversal em perfil que apresenta porosidade superficial.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Materiais que apresentam rupturas:
 - Definição: Rachaduras e fissuras resultantes de danos físicos aos materiais;
 - Nota técnica: Esses defeitos afetam a funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Não aceitável.

Figura 28 – Peças rompidas.

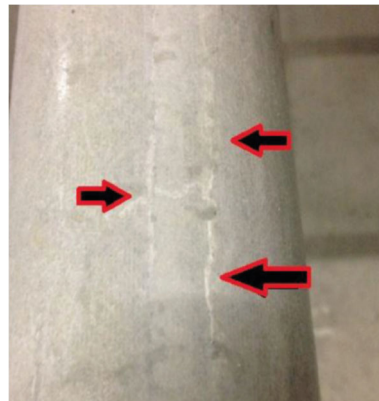




Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

- Materiais que apresentam trincas:
 - Definição: Separação de uma camada inteira, ou mais, de reforço com penetração abaixo da superfície do produto;
 - Nota técnica: Esses defeitos afetam a funcionalidade estrutural;
 - Critério de aceitação/rejeição: Não aceitável.

Figura 29 – Peças com trincas.



Fonte: Guia de Compra e inspeção para o mercado de pultrusão da ALMACO.

1.23 Montagem, Logística de Execução em Obra e Manutenção

Neste aspecto os elementos estudados possuem similaridades consistentes referentes a facilidade de montagem quando comparadas a soluções estruturais estabelecidas anteriormente como o concreto armado e madeira. Ambas possuem possibilidade de recebimento do material na obra em módulos pré-montadas em chão de fábrica, com furação, pintura e indicações feitas pelo projeto. Tal método permite, dentre suas principais características, as seguintes vantagens e desvantagens:

- Maior agilidade de montagem;

- Menor complexidade de instalação;
- Redução dos custos de mão de obra em campo;
- Custos de frete mais elevados devido a acomodação da estrutura pré-montada ser mais complexa;
- Maiores custos da compra dos materiais devido ao custo de montagem em fábrica;
- Possibilidade de apresentação de dificuldades de execução devido a incompatibilidades entre projeto e campo;
- Maiores prazos para entrega dos materiais em obra devido ao tempo solicitado para pré-montagem.

Também é possível o recebimento dos perfis soltos para serem montados e instalados em campo. Suas principais vantagens são:

- Maior precisão devido a furação e montagem seguir as dimensões e necessidades de campo, evitando incompatibilidades;
- Redução dos custos de frete devido a acomodação mais coesa e paletizadas para carga, transporte e descarga facilitados;
- Redução dos custos de materiais devido a ausência dos adicionais de preço das montagens em fábrica;
- Maior agilidade de fornecimento dos materiais posto em obra, devido a ausência dos prazos de pré-montagem.

Especificamente nestas etapas de montagem a fibra de vidro apresenta uma solução mais leve, permitindo maior agilidade e mobilidade manual em obra com redução de custos na locação de equipamentos pesados para transporte dos módulos e peças a serem instaladas. A manutenibilidade das duas soluções apresenta procedimentos semelhantes, porém com periodicidades diferentes. Em ambas as alternativas devem ser elaborados manutenções rotineiras visuais anuais com o objetivo de identificar pontos de fragilidade na estrutura, verificar a causa da patologia e apresentar possíveis soluções.

Em estruturas metálicas, especificamente neste tipo de solução projetada, deve ser identificado pontos de alta corrosão, descontinuidades e perda de material da estrutura e elementos de ligação (parafusos e soldas). A aplicação de ensaios não destrutivos é extremamente importante para a quantificação e classificação das patologias, podendo ser aplicado ensaios visuais com equipamentos, ensaios por líquido penetrante, ensaio por ultrassom ou ensaio por partículas magnéticas. Com a identificação da causa do defeito e sua

respectiva classificação de degradação é possível apresentar soluções viáveis para a correção da estrutura, objetivando restabelecer a segurança original da unidade.

Já em estruturas com materiais compósitos deverão ser identificados elementos que apresentam fissuração devido ao ressecamento da resina por ataque de irradiação UV, exposição das fibras, empenamento do perfil e delaminação em pontos de compressão. É extremamente importante a verificação rotineira e planejamento das manutenções anuais para a pintura dos pontos de ressecamento e exposição das fibras com tintas a base de poliuretano alifático e o seguimento dos parâmetros de cargas e sobrecargas definidos em etapa de projeto e utilizações conforme orientações dos fabricantes.

Para ambas as soluções possíveis o tipo de correção varia de acordo com o grau de comprometimento da estrutura. Tais intervenções variam de lixamento e pintura, reforço da seção, reforço da ligação, troca da peça, troca parcial da estrutura e, em casos extremos, condenação do elemento estrutural e demolição de toda estrutura para reconstrução.

RESULTADOS

De acordo com as condicionantes determinadas para o estudo e seu respectivo desenvolvimento teórico foi possível apresentar para ambas as soluções uma base sólida dimensionada para o comparativo técnico proposto pelo trabalho. A solução metálica projetada de acordo com a ABNT NBR 8800:2014 apresenta um projeto mais comumente disponível no mercado nacional. Já a proposta em materiais compósitos se apresenta como uma solução mais arrojada, moderna, delicada e com grande potencial, mas sua disponibilidade teórica normativa ainda é rasa e dificilmente encontrada.

O sistema lateral estudado e dimensionado em Aço foi projetado com elementos metálicos de seção tipo cantoneira de abas iguais, em associação dupla, de diversos tamanhos, conforme Tabela 6. A menor seção dimensionada possui abas de $1.1/2"$ ($38,1\text{ mm}$) e espessura de $3/16"$ ($4,76\text{ mm}$) a ser montada nos montantes externos devido suas baixas solicitações axiais. Já os trechos dimensionados que possuíam maiores elementos tracionados e comprimidos do projeto são os banzos superiores e inferiores de cantoneiras de abas iguais, em associação dupla, de $3.1/2"$ ($88,9\text{ mm}$) e espessura de $1/4"$ ($6,35\text{ mm}$).

Tabela 6 – Lista de Materiais da Estrutura Lateral em Aço

07	Chapas de ligação das barras de montante. Dim. 150 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço ASTM-A36	pç	34,00	95,96 Kg
06	Chapas de ligação dos nós de canto. Dim. 300 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço ASTM-A36	pç	8,00	45,16 Kg
05	Chapas de ligação dos nós principais. Dim. 350 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço ASTM-A36	pç	34,00	261,23 Kg
04	Barras de montante das extremidades em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 3" x 1/4".	Aço ASTM-A36	m	6,00	87,48 Kg
03	Barras de montante em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 1.1/2" x 3/16".	Aço ASTM-A36	m	51,00	273,36 Kg
02	Barras diagonais laterais em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 2" x 3/16".	Aço ASTM-A36	m	76,50	554,08 Kg
01	Banzos em cantoneira dupla de abas iguais, 3.1/2" x 1/4"	Aço ASTM-A36	m	108,00	1.848,96 Kg
ITEM	DISCRIMINAÇÃO	MATERIAL	UNID.	QTD.	Peso total 3.166,23 Kg P E S O
LISTA DE MATERIAIS – TRELIÇA METÁLICA SOBRE CÓRREGO TAQUARAL					
*CONSIDEROU-SE 5% DE ACRÉSCIMO NO PESO FINAL DEVIDO AS PERDAS.					

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Nesta solução as chapas de ligação também foram definidas em Aço ASTM A36 em espessura padrão de 5/16" (7,94 mm) em dimensões diferentes para os nós de ligação principais, nós de ligação dos montantes e nós de ligação de canto. Toda estrutura metálica deverá receber tratamento anticorrosivo por pintura com primeira demão em Primer de alto desempenho a base de resina alquídica, secagem rápida com pigmentação inibidora de corrosão em espessura mínima da camada de 40 à 60 micrometros. Já a segunda demão deverá ser de tinta acabamento a base de resina alquídica de secagem rápida em espessura de 60 à 80 micrometros de cor não especificada.

Tais observações e execuções de pintura objetivam a proteção e ampliação da vida útil de toda a estrutura devido as suas condições de exposições aos ataques de intempéries comuns ao tempo. Com isso foi possível desenvolver e verificar todas as peças e seções validando a solução estrutural com o peso total das duas treliças laterais de 3.166,23 kg com um custo aproximado de R\$ 11,48/ kg, conforme Tabela 7 abaixo. Os valores apresentados pela tabela foram obtidos através de cotações dos insumos efetuadas com empresas situadas na grande Goiânia. Apresentando um custo total dos elementos estruturais de R\$ 36.348,32.

Tabela 7 – Valores cotados dos perfis metálicos

Cotação de Materiais				
Empresa	Data	Peso	Valor Total	R\$/kg
Perfinasa	24/02/2021	3166,23	36.238,61	11,45
Metalforte	23/02/2021	3166,23	36.448,24	11,51
Ferrobraz	Não ofereceu proposta			
Média entre os valores (R\$/kg):				11,48

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Já o sistema lateral estudado e dimensionado em resina reforçada com fibra de vidro foi projetado com elementos estruturais desenvolvidos pelo mercado nacional de compósitos

em resina isoftálica com proteção UV. Os perfis dimensionados são, exclusivamente, cantoneiras em associação dupla de dispostas em toda a treliça lateral conforme Tabela 8. O maior elemento dimensionado está disposto nos Banzos em associação de cantoneiras de 6" (152,4 mm) com espessura 3/8" (9,53 mm). O menor trecho projetado também foi especificado em associação de cantoneiras de 1.1/2" (38,1 mm) com espessura 1/8" (3,18 mm) nos montantes externos.

Tabela 8 – Lista de Materiais da Estrutura Lateral em Resina Reforçada com Fibra de Vidro

07	Chapas de ligação das barras de montante. Dim. 150 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço Inox AISI-304	pç	34,00	76,19 Kg
06	Chapas de ligação dos nós de canto. Dim. 300 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço Inox AISI-304	pç	8,00	35,86 Kg
05	Chapas de ligação dos nós principais. Dim. 350 x 300mm e espessura de 5/16".	Aço Inox AISI-304	pç	34,00	207,42 Kg
04	Barras de montante das extremidades em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 1.1/2" x 1/8".	PRFV	m	6,00	4,64 Kg
03	Barras de montante em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 2" x 3/16".	PRFV	m	51,00	80,48 Kg
02	Barras diagonais laterais em cantoneira dupla de abas iguais. Dim. 6" x 3/8".	PRFV	m	76,50	724,00 Kg
01	Banzos em cantoneira dupla de abas iguais, 6" x 3/8"	PRFV	m	108,00	1.022,11 Kg
ITEM	D I S C R I M I N A Ç Ã O	MATERIAL	UNID.	QTD.	Peso total 2.150,70 Kg P E S O
LISTA DE MATERIAIS – TRELIÇA EM COMPÓSITO SOBRE CÓRREGO TAQUARAL					
*CONSIDEROU-SE 10% DE ACRÉSCIMO NO PESO FINAL DEVIDO AS PERDAS.					

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O processo de dimensionamento, desenvolvido e apresentado por Castro (2014) em seu trabalho técnico do Instituto politécnico do Porto, demonstrou uma ampliação das dimensões dos perfis nos trechos com solicitações de compressão. Tais elementos tiveram suas seções consideravelmente aumentadas devido ao alto Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material (γ_m) definido para as condicionantes de utilização do projeto, e aos comprimentos elevados das diagonais e banzos.

Especificamente nestes elementos, cujo comprimento efetivo e coeficientes comprometeram a tensão resistente dos trechos, foi identificada um superdimensionamento nos elementos tracionados. Em exemplificação podem ser citadas as diagonais, onde a solicitação de projeto a tração é dada por **66,35 kN**, enquanto sua respectiva resistência limitante a tração calculada foi de **263,70 kN**. Sendo assim a proporção representativa em porcentagem entre solicitação e resistência é de **25,16%**, representado o superdimensionamento a tração.

Analisando as solicitações comprimidas das diagonais foi desenvolvido o dimensionamento com a proporção representativa em porcentagem entre solicitação e resistência de **55,22%**, cuja solicitação foi de **70,05 kN** e sua respectiva resistência de **126,85 kN**. Especificamente nas diagonais não foi possível especificar os perfis menores pois não apresentavam resistência suficiente para suportar as solicitações, comprometendo a

estrutura. Dado esta solução foi possível efetuar cotações solicitando propostas para as principais empresas de fibra de vidro do mercado nacional, cujos valores estão apresentados na Tabela 9.

Sendo assim, o custo da estrutura será dividido entre os perfis pultrudados e as chapas em aço inox, referenciadas pela tabela SINAPI datada do mês 12/2020 não desonerada, com custo unitário de R\$ 973,43/ m^2 referenciado no item 12760, cuja descrição é indicada como “CHAPA ACO INOX AISI 304 NUMERO 4 (E = 6 MM), ACABAMENTO NUMERO 1 (LAMINADO A QUENTE, FOSCO)”. As chapas apresentaram um custo de R\$ 6.249,42.

Já os perfis pultrudados apresentam o valor aproximado de R\$ 31,00/kg conforme demonstrado na Tabela 9 abaixo. Portanto, as treliças laterais em PRFV são cotadas no valor de insumos totais de R\$ 56.768,13. Ao todo a estrutura representa preço total de R\$ 63.017,55.

Tabela 9 – Valores cotados dos perfis pultrudados

Cotação de Materiais		
Empresa	Data	R\$/kg
ENMAC	24/02/2021	31,00
COGUMELO	Não apresentou proposta	
STRATUS	Não apresentou proposta	
Média entre os valores (R\$/kg):		31,00

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

CONCLUSÃO

Dentre as opções disponibilizadas no mercado para o desenvolvimento de travessias de tubulação, ambos os materiais estudados são possibilidades reais de aplicação. O Aço, em sua versão mais utilizada e amplamente difundida no mercado nacional (ASTM A36 ou MR250), e os materiais compósitos possuem vantagens e desvantagens a serem consideradas para o desenvolvimento do projeto. Tal análise crítica deve ser ampla e suficientemente abrangente para a escolha e desenvolvimento da melhor solução buscada pelo cliente e gestor da obra.

A versão estudada e apresentada com a solução metálica é, indiscutivelmente, a opção que apresenta menores custos totais, maior disponibilidade de mão de obra e amplo acervo técnico para apoio tecnológico e teórico ao projetista. Tal acervo, disponibilizado por livros didáticos, disciplinas ministradas em universidades, cursos comercializados por profissionais já estabelecidos no mercado e normatizações nacionais e internacionais representam, primordialmente, um dos principais aspectos positivos para este material.

Outro ponto positivo versa sobre a maior disponibilidade em território nacional de profissionais projetistas capacitados para o desenvolvimento da solução. Tais características tornam o material mais viável para projetos vultosos, cuja estrutura receba altas solicitações, não apresente contribuição considerável do seu peso próprio para as cargas previstas pelo projeto, e em soluções de engenharia que não necessitem um tipo de material tão específico, pois apresentam perfis com seções clássicas e de maiores dimensões já disseminados pelo mercado.

É inegável a disponibilidade de distribuidores deste tipo de insumos em todos os estados brasileiros, proporcionando melhor logística de compra dos recursos necessários para o desenvolvimento da estrutura. Outro aspecto importante a ser analisado é a acessibilidade a mão de obra qualificada para execução de estruturas metálicas que, apesar de escassa e especializada, é encontrada com maior facilidade nas capitais e municípios mais relevantes economicamente de cada unidade federativa. Atualmente, em Goiás, a mão de obra técnica utilizada em obras em aço está disponível e disponibilizada na maioria das macrorregiões do estado.

Apesar de não apresentar neste trabalho dimensionamentos para esforços não axiais, vale salientar que estruturalmente a solução metálica permite uma melhor utilização em elementos fletidos e sob cisalhamento, devido sua isotropia e capacidade do material de resistir de modo extremamente eficiente os esforços em todos os sentidos de solicitação. Deve ser reforçado que especificamente neste trabalho não foram estudadas tais solicitações, entretanto é sabida as maiores fragilidades dos materiais compósitos em resina polimérica reforçada com fibra de vidro quando solicitadas ao cisalhamento.

Já a solução em resina polimérica reforçada com fibra de vidro representa atualmente uma opção mais viável quando limitada a pequenas estruturas, mas que possui um enorme potencial mercadológico. Sua formação dada pela associação de resina e reforço dá ao material seus principais pontos positivos, mas também suas fragilidades mais relevantes. A heterogeneidade e anisotropia do material permite grandes variabilidades e inúmeras possibilidades de fabricação, mas também impõe ao material vulnerabilidades inerentes aos seus compostos formadores.

Deve se ter em mente que os pontos positivos e negativos de um material compósito são extremamente variáveis, e que seguem as características individuais da matriz e reforço. É possível desenvolver e apresentar soluções com fibra de carbono ou aramida, que possua aditivos tipo *blinder* para melhorar a aderência entre seus elementos, fibras injetadas e reforços que aumente a resistência ao cisalhamento dos perfis. Também podem ser definidos resinas

cuja resistência química consiga atender inúmeros tipos de ataques corrosivos, com proteção a raios UV e aditivos objetivando reduzir a emissão de fumaça em situações de incêndio.

A adaptabilidade das soluções de acordo com as necessidades do projeto também é corroborada pelo processo de fabricação desenvolvido para os materiais estruturais. A pultrusão permite que seja possível desenvolver inúmeros moldes para conformar seções diversas que se adequem ao tipo de solicitação e ligações impostas pelo projeto. Atualmente são apresentados nos catálogos de empresas nacionais perfil I, perfil H, perfil U, cantoneiras de abas iguais, cantoneiras de abas desiguais, tubos quadrados e cilíndricos, tarugos, perfil sapata, barra ômega, barra W, perfil E, cantoneira Y e outros, conforme **Figura 13** disponível no **Capítulo 11.3**.

Especificamente no caso estudado as principais características do compósito são o baixo peso específico, elevada resistência química, baixa condutividade elétrica, alta resistência a tração e resistência limitada ao cisalhamento. A matriz polimérica imprime ao material as boas características de resistência química, condutividade elétrica, baixíssimo peso específico e aumenta a dissipação de cargas pelo reforço. Já a alta resistência a tração e fragilidade ao cisalhamento são características dadas pelas condições intrínsecas da fibra de vidro.

Assim, o dimensionamento da estrutura em compósito vai além do lançamento do *layout* e verificação das seções, pois também deve ser analisado quais perfis são viáveis e como suas cargas serão distribuídas para evitar solicitações de tipos cisalhantes que podem fragilizar pontos, condenando todo sistema. Apesar da estrutura ser mais leve e possuir solicitações inferiores, as seções em PRFV foram definidas com dimensões superiores aos seus elementos semelhantes em Aço.

Tais variações originaram-se da diferença entre o aço e o compósito quando comparado os coeficientes de minoração da resistência e também pela menor tensão resistente longitudinal a ruptura dos perfis compósitos em PRFV. Quando analisado o superior coeficiente de segurança do material resinado foi suposto que tal variabilidade se dá pelo tipo de carregamento a longo prazo, associado com a temperatura de deflexão térmica do material compósito entre 55 – 80°C. Não foi sabido os resultados de ensaios HDT dos produtos brasileiros, por isso considerou-se o pior caso já que os materiais poliméricos apresentam menores pontos de fusão e, portanto, podem apresentar maiores flechas sob altas temperaturas.

Se tratando de resistências, o material compósito quando solicitado a tração e compressão, apresenta resistência longitudinal a ruptura de $20,68 \text{ kN/cm}^2$, representando cerca de 82,72% dos $25,0 \text{ kN/cm}^2$ da tensão resistente ao escoamento do aço e 51,7% dos $40,0 \text{ kN/cm}^2$ da tensão resistente a ruptura do material metálico. Resultando também em um aumento de seção em seu dimensionamento.

Deve ser comentado que certas características de aplicação dos materiais no *layout* da estrutura também geraram o aumento da seção transversal das peças. Nos casos em que os elementos comprimidos cujos comprimentos efetivos foram mais elevados necessitou-se da indicação de enrijecimentos para contenção lateral da barra ou alteração da seção transversal, com o objetivo de evitar processos de flambagem. Tal dificuldade foi identificada, principalmente, nas diagonais, aumentando muito a seção das cantoneiras quando comparada ao mesmo trecho em aço carbono.

Por fim, o custo de implantação por quilograma dos materiais pultrudados ainda representam custos elevados quando comparados ao aço, entretanto a baixa densidade torna o material muito competitivo pois o peso total da estrutura apresenta reduções consideráveis. Existem poucas fabricantes concentradas no sudeste e sul que fornecem para todo o país. Entretanto a maioria dos produtos são sob encomenda, sem presença de distribuidores em outras regiões do país, dificultando o processo logístico eficiente e mais ágil de adquirir o produto.

Conclui-se então que ambos os materiais são excelentes soluções no mercado que ocupam espaços de utilização tecnológica diferentes. O aço se torna extremamente competente e viável em estruturas mais vultosas e que não estejam sendo implementadas em ambientes agressivos e corrosivos. Já a solução em resina polimérica reforçada com fibra de vidro representa uma solução muito ampla e com enorme potencial mercadológico, mas atualmente mais viável para pequenas estruturas que necessitam ser leves, de rápida montagem e extremamente eficiente em ambientes agressivos.

A agressividade do ambiente impõe o material um custo-benefício extremamente competitivo, principalmente pela manutenibilidade do compósito ser baixíssima devido sua resistência a ataques químicos. Em casos de obras em indústrias e saneamento, o PRFV também recebe pontos positivos pela montagem ágil e eficiente, pré-fabricada e extremamente leve, evitando o comprometimento produtivo por longos períodos de tempo. Atualmente a aplicação de patamares, escadarias, guarda-corpos e passarelas de compósitos nas obras de saneamento e industriais tomaram o mercado e representam possibilidades tecnológicas extremamente viáveis e competitivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7007**: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15708**: Indústrias do petróleo e gás natural — Perfis pultrudados. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 247 p.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS – ALMACO (São Paulo) (org.). **Guia de Compra e Inspeção para o Mercado de Pultrusão**. 2019. Disponível em: <<http://almaco.org.br/comites-setoriais-2/mercado-de-perfis-pultrudados/>>. Acesso em: 29 set. 2020.

BATISTA, Eduardo de Miranda. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos Pultrudados de Matriz Polimérica com Reforço de Fibra de Vidro**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 8. ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

CAMPBELL, Flake C.. **Manufacturing Processes For Advanced Composites**. New York: Elsevier, 2004.

CONSTRUCTION SECTOR GROUP PUBLICATION (Reino Unido). Composites Uk Trade Association. **London Kings Cross Station Southern Colonnade Entrance**. 2015. Disponível em: <<https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/construction/case-studies>>. Acesso em: 29 set. 2020.

CONSTRUCTION SECTOR GROUP PUBLICATION (Reino Unido). Composites Uk Trade Association (org.). **Aberfeldy Footbridge**. 2015. Disponível em:

<<https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/construction/case-studies>>.

Acesso em: 29 set. 2020.

CORREIA, Manuel Mendes. **Comportamento estrutural de perfis pultrudidos de GFRP reforçados com mantas de CFRP**. 2012. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

DANIEL, Isaac M.; LSHAI, Ori. **Engineering Mechanics Of Composite Materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.

GAY, Daniel; HOA, Suong V.; TSAI, Stephen W.. **COMPOSITE MATERIALS: design and applications**. New York: Crc Press, 2003.

KERSTING, Daniel de Freitas. **Avaliação de Resinas Epóxi para Fabricação de Materiais Compósitos pelo Processo de Pultrusão**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MONTEIRO, Anne Caroline Linhares. **Análise teórica e experimental de cantoneiras pultrudadas PRFV submetidas à compressão**. 2020. 263 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

NUNES, Francisco Felício. **Comportamento estrutural de perfis pultrudidos de GFRP reforçados com mantas de CFRP: caracterização experimental e modelação numérica**. 2012. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático de acordo com a nbr 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009. 357 p.

PROENÇA, Miguel Enrech Casaleiro Mascarenhas. **Comportamento de ligações aparafusadas entre perfis de compósito GFRP: estudo experimental e numérico**. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

PIERIN, Igor. **Estudo de Estabilidade de perfis pultrudados de materiais PRFV**. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

SERUTI, Carlos Alexandre. **Caracterização Mecânica e Desempenho Estrutural de Elementos Pultrudados**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SERUTI, Carlos Alexandre; LANDESMANN, Alexandre; BATISTA, Eduardo de Miranda. **Análise Numérico-computacional de Estruturas de Passarelas Produzidas Com Compósitos Poliméricos Ref. In: Iberian Latin-american Congress On Computational Methods In Engineering**, 34., 2013, Pirenópolis, Go, Brazil. Pirenópolis, Go, Brazil: Cílamce, 2013. p. 1-20.

TOGASHI, Bárbara Sumie. **Materials Science and Engineering**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.