

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LUIZ EDUARDO PEREIRA
TAYLANA PICCININI SCOLARO**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS DE PONTES DE DIFERENTES
MATERIAIS COM VISTAS À CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2017**

LUIZ EDUARDO PEREIRA
TAYLANA PICCININI SCOLARO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS DE PONTES DE DIFERENTES
MATERIAIS COM VISTAS À CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Msc. Jairo Trombetta

PATO BRANCO

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS DE PONTES DE DIFERENTES MATERIAIS COM VISTAS À CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

Luiz Eduardo Pereira

e

Taylana Piccinini Scolaro

No dia 24 de novembro de 2017, às 08h15min, na SALA Q008 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 42-TCC/2017.

Orientador: Prof. Msc. JAIRO TROMBETTA (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^a Dr^a. ELIZÂNGELA MARCELO SILIPRANDI
(DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof^a Dr^a. HELOIZA PIASSA BENETTI (DACOC/UTFPR-PB)

RESUMO

PEREIRA, L. E.; SCOLARO, T. P. **Análise comparativa entre projetos de pontes de diferentes materiais com vistas à construção sustentável.** Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

O presente trabalho trata do estudo de projetos de pontes de diferentes materiais, desenvolvendo uma análise comparativa entre eles. Tem-se por objetivo principal a comparação do desempenho sustentável de superestruturas de pontes em madeira, concreto pré-fabricado e mista aço/concreto, através da adoção de modelos de pontes e da análise ambiental e econômica de cada um deles. Para tal, os seguintes métodos foram adotados: desenvolvimento do quantitativo de materiais, realização da análise de impactos ambientais a partir do quantitativo e dos valores que cada material apresenta por unidade de massa em cada parâmetro e composição da análise econômica com base nos custos de material e mão-de-obra de cada projeto. Como resultado, apresenta-se um comparativo de todos os modelos de ponte para três vãos diferentes. Na dimensão ambiental, os projetos foram comparados através do desempenho apresentado em parâmetros estabelecidos dentro de três categorias. No entanto, estes parâmetros são medidos por meio de diferentes unidades e, dessa forma, a comparação foi feita por parâmetro, não sendo possível eleger a estrutura com o comportamento ambiental global mais satisfatório através desta metodologia. No âmbito econômico, a ponte em madeira foi a que apresentou o menor preço em todos os três vãos analisados. Em relação às pontes em concreto pré-fabricado e mista aço/concreto, o menor preço varia conforme o vão. A avaliação do ponto de vista social foi desconsiderada por este estudo pela dificuldade em estabelecer parâmetros sociais de forma qualitativa, uma vez que possuem caráter puramente subjetivo.

Palavras-chave: Construção sustentável. Pontes. Análise comparativa.

ABSTRACT

PEREIRA, L. E.; SCOLARO, T. P. **Comparative analysis between bridge projects of different materials with a view to sustainable construction**. Monograph – Civil Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work is about the study of bridge projects using different materials, developing a comparative analysis between them. The main purpose of this study is to compare the sustainable performance of bridge superstructures constructed of wood, prefabricated concrete and mixed steel/concrete, through the adoption of bridge models and the environmental and economic analysis of each one. For such, the following methods were adopted: development of the materials quantitative, accomplishment of the environmental impacts analysis from the quantitative and the values that each material presents per unit of mass in each parameter and composition of the economic analysis based on the material and labor costs of each project. As outcome, a comparison of all the bridge models for three different spans is presented. In the environmental dimension, projects were compared through performance presented in parameters established within three categories. However, these parameters are measured by different units and, therefore, the comparison was made by parameter, it is not possible to choose the structure with the most satisfactory global environmental behavior through this methodology. In the economic sphere, the wooden bridge was the one that presented the lowest price in every spans analyzed. In relation to bridges in prefabricated concrete and mixed steel/concrete, the lowest price varies according to the span. The evaluation from the social point of view was disregarded by this study because of the difficulty in establishing social parameters in a qualitative way, since they have a purely subjective character.

Keywords: Sustainable construction. Bridges. Comparative analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de largura e peso de colheitadeiras modernas	39
Tabela 2 - Categorias e parâmetros de cada impacto ambiental	44
Tabela 3 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-7,50 – Vão 7m”	51
Tabela 4 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em madeira – Vão 7m	55
Tabela 5 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte mista aço/concreto - Vão de 7m.....	59
Tabela 6 - Comparativo ambiental dos modelos de ponte em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto	62
Tabela 7 - Comparativo econômico dos modelos de ponte em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto	64
Tabela 8 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-6,50” – Vão de 5m.....	76
Tabela 9 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-9,50 – Vão de 9m	79
Tabela 10 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em madeira – Vão 5m.....	82
Tabela 11 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte em madeira – Vão 9m.....	85
Tabela 12 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte mista aço/concreto – Vão 5m	88
Tabela 13 - Valores de impactos ambientais totais e por m ² da ponte mista aço/concreto – Vão de 9m	91

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-7,50" – Vão de 7m.....	47
Gráfico 2 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-7,50" – Vão de 7m.....	48
Gráfico 3 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA 7,50" – Vão de 7m - Com BDI 30%.....	49
Gráfico 4 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira - Vão de 7m	53
Gráfico 5 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em madeira – Vão de 7m	53
Gráfico 6 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em madeira – Vão de 7m - Com BDI 30%	54
Gráfico 7 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto - Vão 7m	57
Gráfico 8 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte mista aço/concreto - Vão 7m.....	57
Gráfico 9 - Preço por elemento da superestrutura da ponte mista aço/concreto – Vão de 7m - Com BDI 30%	58
Gráfico 10 - Comparativo da quantidade de material total e por m ² por vão e modelo de ponte	60
Gráfico 11 - Preços por vão e modelo de ponte	64
Gráfico 12 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-6,50" – Vão de 5m.....	74
Gráfico 13 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-6,50" – Vão de 5m.....	75
Gráfico 14 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-6,50" – Vão de 5m.....	75
Gráfico 15 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50" – Vão de 9m.....	77
Gráfico 16 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50 – Vão de 9m	78
Gráfico 17 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50 – Vão de 9m.....	78

Gráfico 18 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira – Vão 5m.	80
Gráfico 19 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em madeira – Vão 5m	81
Gráfico 20 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em madeira – Vão 5m	81
Gráfico 21 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira – Vão 9m.	83
Gráfico 22 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte em madeira – Vão 9m	84
Gráfico 23 - Preço por elemento da superestrutura em madeira – Vão 9m	84
Gráfico 24 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto – Vão 5m	86
Gráfico 25 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte mista aço/concreto – Vão 5m.....	87
Gráfico 26 - Preço por elemento da superestrutura mista aço/concreto – Vão 5m ...	87
Gráfico 27 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto– Vão de 9m	89
Gráfico 28 - Quantidade total e por m ² de cada material da ponte mista aço/concreto – Vão de 9m.....	90
Gráfico 29 - Preço por elemento da superestrutura mista aço/concreto – Vão de 9m	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conceito de sustentabilidade	15
Figura 2 - Elementos constituintes de pontes.....	17
Figura 3 - Esquema dos elementos nas pontes	18
Figura 4 - Ciclo de vida de um produto da construção	23
Figura 5 - Custos econômicos associados ao ciclo de vida dos materiais e componentes de construção	30
Figura 6 - Relação entre os perfis laminados e seus vãos máximos.....	36
Figura 7 - Disposição das cargas estáticas.....	37
Figura 8 - Posições mais desfavoráveis da carga móvel gerando em (a) maior momento positivo e em (b) maior momento negativo.....	38
Figura 9 - Resultado do pré-dimensionamento da placa de concreto	39
Figura 10 - Diagrama das etapas da pesquisa.....	42
Figura 11 - Elementos pré-fabricados da ponte de concreto.....	45
Figura 12 - Ponte em concreto pré-fabricado	46
Figura 13 - Ponte em madeira.....	52
Figura 14 - Ponte mista aço/concreto.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
2.1	A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E A SUA FUNDAMENTAÇÃO	15
2.2	AS PONTES E A SUA IMPORTÂNCIA	16
2.3	ELEMENTOS DE PONTES	17
2.3.1	Infraestrutura	17
2.3.2	Mesoestrutura	17
2.3.3	Superestrutura	18
2.3.4	Caracterização dos materiais da superestrutura de pontes	19
2.3.4.1	Superestrutura em concreto armado	19
2.3.4.2	Superestrutura em madeira	20
2.3.4.3	Superestrutura mista	20
2.4	ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE PONTES	22
2.4.1	Análise ambiental	22
2.4.1.1	Avaliação do ciclo de vida	24
2.4.1.2	Indicadores ambientais	25
2.4.1.2.1	Consumo de energia	25
2.4.1.2.2	Emissões atmosféricas	26
2.4.1.2.3	Esgotamento de recursos	28
2.4.2	Análise econômica	29
2.4.2.1	Indicadores econômicos	29
2.4.2.1.1	Custo de construção	30
2.4.2.1.1.1	Estimativa de custos	30
2.4.2.1.1.2	Processo orçamentário	31
2.4.3	Considerações sociais	32
2.4.4	Tomada de decisão	33
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	34
3.1	ETAPAS DA PESQUISA	34
3.1.1	Estudo das pontes	35
3.1.1.1	Adoção de modelos de pontes	35

3.1.1.1.1	Pré-dimensionamento da ponte mista aço/concreto.....	35
3.1.1.2	Estudo da geometria das pontes	39
3.1.2	Análise dos materiais constituintes das pontes	40
3.1.3	Comparação de desempenho econômico e ambiental entre as superestruturas das pontes.....	40
3.1.4	Unidade funcional	41
3.1.5	Limites de estudo.....	41
3.1.6	Diagrama	42
4	CASO PRÁTICO: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PONTES	43
4.1	DESEMPENHO AMBIENTAL	43
4.2	DESEMPENHO ECONÔMICO	44
4.3	PONTE EM CONCRETO PRÉ-FABRICADO	45
4.3.1	Descrição da estrutura.....	45
4.3.2	Análise da estrutura	46
4.4	PONTE EM MADEIRA.....	52
4.4.1	Descrição da estrutura.....	52
4.4.2	Análise da estrutura	52
4.5	PONTE MISTA AÇO/CONCRETO	56
4.5.1	Descrição da estrutura.....	56
4.5.2	Análise da estrutura	56
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS	60
4.6.1	Quantitativo de material	60
4.6.2	Desempenho ambiental	60
4.6.3	Desempenho econômico	64
4.6.4	Desempenho social	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE A	74
	APÊNDICE B	77
	APÊNDICE C	80
	APÊNDICE D	83
	APÊNDICE E	86
	APÊNDICE F.....	89
	APÊNDICE G	92

1 INTRODUÇÃO

O conceito de *desenvolvimento sustentável* surgiu em 1987 e foi definido pela Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento em Brundtland, Nações Unidas, como sendo “aquele que permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas” (RELATÓRIO BRUNDTLAND, 1991, p.12). Nesse contexto, a construção sustentável pode ser definida com base em três pilares: ambiental, econômico e social (CASTRO, 2012).

Atualmente, as pontes são projetadas principalmente sob as perspectivas econômica, técnica e de segurança, raramente integrando o desempenho ambiental no processo de tomada de decisão. No entanto, a construção de pontes é responsável por significativo uso de energia e de insumos de matérias-primas (DU et al., 2014).

Qualquer produto, seja ele composto por madeira, vidro, plástico, metal, etc., provoca impactos no meio ambiental, seja em função de seu processo produtivo, das matérias-primas que consome, ou devido ao seu uso ou disposição final (CASTRO, 2012).

A NBR ISO 14040, ABNT 2009, aborda a Avaliação o Ciclo de Vida (ACV) como uma técnica de gestão ambiental em desenvolvimento que estuda aspectos e impactos ambientais ao longo da vida de um produto. Através da análise das entradas e saídas pertinentes à um sistema produtivo e da avaliação dos impactos ambientais relacionados, a ACV permite interpretar os resultados das análises e buscar medidas de melhoria em fases do ciclo de vida do produto e nos processos de tomada de decisão pertinentes.

Desde o passado, a construção de pontes tem sido uma condição necessária para que a comunicação entre as cidades pudesse ser estabelecida.

Hoje, “o objetivo não é apenas a construção de pontes, mas de pontes sustentáveis” (PENADÉS-PLÀ et al., 2016, p.1).

Sendo as pontes componentes principais da comunicação territorial em uma sociedade, garantir uma estrutura sustentável é essencial para proporcionar segurança e serviço aos usuários (PENADÉS-PLÀ et al., 2016).

Tendo em vista que as pontes, ao longo do seu ciclo de vida, podem gerar impactos ambientais, questionou-se sobre os diferentes tipos e materiais constituintes de uma ponte e seu desempenho em determinadas etapas do ciclo.

Esse trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto do ponto de vista da construção sustentável. Buscou-se realizar uma análise econômica até a montagem dos elementos das pontes e ambiental do ciclo de vida da produção dos materiais do berço ao portão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar o desempenho sustentável de pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto no contexto da construção sustentável.

1.1.2 Objetivos específicos

- Adotar projetos de diferentes modelos de pontes e elaborar o quantitativo dos materiais e a relação de insumos utilizados na execução da superestrutura de pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto;
- Realizar análise ambiental do ciclo de vida da produção dos materiais construtivos do berço ao portão;
- Desenvolver análise econômica da execução da superestrutura das pontes.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento econômico e social de um país ou uma região depende fortemente da infraestrutura local. Nesse sentido, as pontes desempenham papel fundamental, uma vez que permitem o escoamento de produtos e insumos e possibilitam o deslocamento da população, expandindo fronteiras culturais e econômicas (DA SILVA; PHILIPPSEN, 2015).

A atividade construtiva e o ambiente construtivo tem grande impacto na sociedade, na medida em que contribuem de forma significativa para a economia mundial. No entanto, também provocam efeitos diretos no ambiente, tornando evidente a necessidade de trazer os conceitos sustentáveis à construção (CASTRO, 2012).

Segundo Milani (2010), as pontes estão passando por processo de deterioração devido à falta de inspeções e manutenção, ressaltando a importância da análise de materiais construtivos da superestrutura de pontes, tanto do ponto de vista econômico, como social e ambiental.

Considera-se viável o desenvolvimento deste trabalho uma vez que as informações necessárias das pontes de concreto encontram-se disponíveis pelo site do Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná (DER/PR), bem como o esquema estrutural da ponte de madeira foi desenvolvido e dimensionado no trabalho de Da Silva e Philippsen (2015). Ainda, para a ponte mista aço/concreto, foi desenvolvido um pré-dimensionamento com base em estudos feitos por Machado (2016) e Eller, De Paula e Ferreira (2011), com o auxílio do software AltoQI Eberick.

Dessa forma, este trabalho fornece um diagnóstico econômico e ambiental dos materiais utilizados na construção da superestrutura de pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto. Primeiramente, foi elaborado o quantitativo dos materiais e de posse dos valores encontrados, foram levantados o consumo de energia, as emissões atmosféricas e o esgotamento de recursos gerados pela produção dos materiais de cada uma das pontes. Além disso, a partir do quantitativo dos materiais, foi desenvolvido o orçamento de cada modelo estrutural.

Portanto, por tratar de processos de apoio que visam contribuir para o projeto de pontes com respeito à escolha do material da superestrutura, este estudo deve trazer subsídios aos gestores para que questionem-se em relação ao desempenho de pontes no contexto da construção sustentável.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E A SUA FUNDAMENTAÇÃO

A definição de desenvolvimento sustentável do Relatório Brundtland, já citada neste trabalho, pode ser interpretada com relação às pontes como o ato de projetar, construir e manter pontes em um contexto sensível de durabilidade a longo prazo, proporcionar baixos impactos ao ciclo de vida, ter sensibilidade na seleção de materiais e métodos, e gerar um mínimo impacto no ambiente ao longo da vida da ponte (AHLBORN, 2008).

Arelado ao desenvolvimento sustentável, é imprescindível citar a construção sustentável na execução de pontes. Uma definição para esse conceito foi criada em 1994, na primeira Conferência Internacional de Construção Sustentável em Tampa, Estados Unidos, por Charles Kibert, que descreveu a construção sustentável como sendo a “criação de um ambiente saudável construído baseado na utilização de recursos eficientes e princípios ecológicos” (KIBERT, 1994, p.3).

O conceito de sustentabilidade pode ser ilustrado pela Figura 1.



Figura 1 - Conceito de sustentabilidade
Fonte: Andrade (2013).

Com referência a conceituação de sustentabilidade, algumas dimensões devem ser observadas, são elas: econômica, ambiental e social.

A dimensão econômica é aquela que abrange valores econômicos tangíveis e intangíveis agregados, bem como prosperidade e aquisição de bens materiais e

financeiros por todas as partes interessadas (*stakeholders*), incluídos os acionistas (*shareholders*) e investidores nas empresas de negócios (FURTADO, 2010).

A dimensão ambiental, por sua vez, compreende:

Conservação e qualidade dos estoques de recursos renováveis, extensão de vida útil dos não renováveis e sustentação dos serviços naturais, como clima, recuperação de fertilidade do solo, garantia da cadeia de nutrientes, etc.; cargas, impactos e danos físicos, químicos, biológicos sobre meios naturais, com consequências para a saúde humana e qualidade dos ecossistemas naturais, representados por bens e serviços naturais (FURTADO, 2010, p.25).

E por fim, a dimensão social, segundo Furtado (2010), diz respeito ao bem estar e a justiça das pessoas, individualmente ou em comunidades. Além disso, inclui alimentação, abrigo, saúde e educação. Trata ainda de relacionamentos e interação social, senso de pertinência e enriquecimento espiritual.

2.2 AS PONTES E A SUA IMPORTÂNCIA

A infraestrutura é fator determinante para o desenvolvimento econômico de um país, uma vez que é fundamental para o desenvolvimento de suas atividades econômicas (ARAÚJO JÚNIOR, 2006).

Ao longo dos anos, o desenvolvimento da sociedade veio acompanhado pela evolução das pontes. As pontes são elementos que permitem a travessia de rios, estuários, canais, vias e vales, e podem ser ditas fundamentais no progresso econômico e social das comunidades. É de suma importância, ainda, que a sua gestão se faça otimizando os recursos existentes (ALMEIDA, 2013).

Um projeto de infraestrutura de pontes sustentável não depende exclusivamente do impacto estético e do desempenho funcional, mas também de preocupações fundamentais, como a integração de soluções e a sensibilização para os impactos da sociedade e da biodiversidade. Além disso, o projeto pode alcançar melhoramentos através da seleção integrada dos materiais e de uma concepção com base em análises de ciclo de vida, minimizando o impacto no ambiente, na sociedade e na economia ao longo da vida da ponte (BUFFENBARGER, 2014).

2.3 ELEMENTOS DE PONTES

Do ponto de vista funcional, as pontes podem ser divididas em três principais partes: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura, como ilustra a Figura 2 (MARCHETTI, 2008).

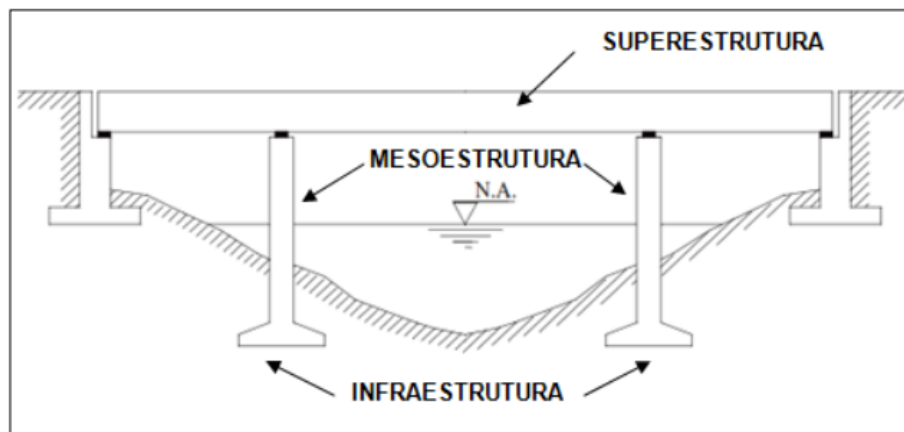


Figura 2 - Elementos constituintes de pontes
Fonte: Adaptado de El Debs e Takeya (2009).

2.3.1 Infraestrutura

A infraestrutura de uma ponte tem por finalidade transmitir para o solo todos os esforços oriundos da superestrutura e da mesoestrutura. É comumente constituída por blocos de fundação, sapatas, tubulões, estacas, entre outros (MARCHETTI, 2008).

2.3.2 Mesoestrutura

A mesoestrutura, segundo DNER (1996), é constituída pelos elementos intermediários que transmitem os esforços da superestrutura para a infraestrutura (fundação). Tais elementos, como mostra a Figura 3, podem ser pilares isolados ou aporticados, aparelhos de apoio metálicos ou de borracha e encontros.

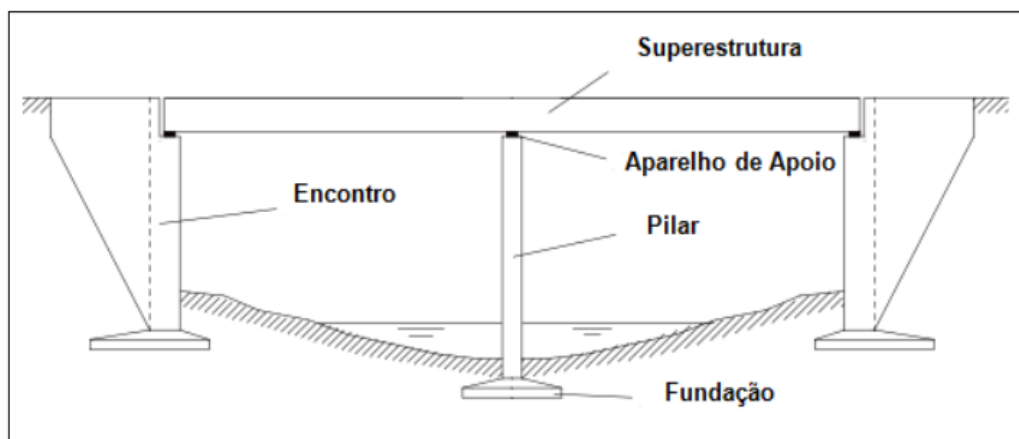


Figura 3 - Esquema dos elementos nas pontes
Fonte: El Debs e Takeya (2009).

2.3.3 Superestrutura

A principal função da superestrutura – objeto desse estudo – é receber e transmitir as cargas que trafegam sobre a ponte, podendo ser dividida em estrutura principal e secundária. A estrutura principal é responsável por vencer o vão e transmitir os esforços provenientes da estrutura principal para a mesoestrutura. É formada pelas vigas longitudinais também chamadas de longarinas. Já a estrutura secundária é formada pela laje ou tabuleiro e tem a função de receber as cargas diretas que circulam sobre a ponte e transferir para a estrutura principal (FREITAS, 1978).

A superestrutura pode ser dividida em diferentes categorias: pórticos, vigas, treliças, arcos, estaiadas ou pênsis (MARCHETTI, 2008).

A tipologia de pontes mais construída no Brasil é a de vigas. Estas vigas podem ser retas ou curvas, de alma cheia ou celulares, simplesmente apoiadas ou contínuas. As vigas simplesmente apoiadas são utilizadas quando existem vários vãos, sendo geralmente vigas pré-moldadas. Para este caso, se faz necessário o uso de elementos auxiliares para a ligação das vigas nos pilares. Já para as vigas moldadas no local, a continuidade proporciona uma redução dos momentos fletores no meio do vão. A flexão e o cisalhamento são os principais esforços atuantes nas vigas (PFEIL, 1990).

Para Possan e Penna (2014), a tomada de decisão para a escolha da melhor superestrutura e seus materiais depende de diversos fatores, como os tipos de cargas que irão trafegar na ponte, o comprimento do vão a ser vencido e a disponibilidade de material e mão de obra.

Além das análises mencionadas acima, este trabalho abordou o fator sustentabilidade. Para isso, foi imprescindível a caracterização dos materiais utilizados para a construção de diferentes tipos de superestrutura.

2.3.4 Caracterização dos materiais da superestrutura de pontes

Os materiais da superestrutura das pontes podem se apresentar da forma descrita na sequência.

2.3.4.1 Superestrutura em concreto armado

O concreto é um produto artificial formado por areias grossas (brita), areias finas, ligante hidráulico (cimento) e água. Além disso, outros elementos podem ser adicionados em pequenas quantidades com a finalidade de melhorar o desempenho do concreto. Como elemento único, o concreto apresenta boa resistência à compressão, no entanto baixa resistência à tração. Dessa forma, é recorrente o uso do concreto armado, em que o aço garante a resistência à tração da estrutura (EUROPEAN CONCRETE PLATFORM, 2009).

A característica semilíquida do concreto oferece maior liberdade de formas ao material. No entanto, se faz necessária uma estrutura secundária, esta geralmente é feita de madeira (CASTRO, 2012).

O concreto pode trazer benefícios à sustentabilidade devido à sua durabilidade, resistência ao fogo, comportamento termoacústico, adaptabilidade e reciclagem. Quando se considera a energia consumida no seu processo de produção e as suas propriedades inerentes de uso, o concreto é um dos materiais de construção mais sustentáveis (EUROPEAN CONCRETE PLATFORM, 2009).

A consideração do concreto como material sustentável deriva de várias razões, dentre elas está a eficiência de recursos, visto que o componente mais utilizado no cimento é o calcário, que por sua vez é abundante no meio ambiente. Vale lembrar que o cimento também faz o uso de cinzas volantes, escórias e sílica em sua composição, produtos residuais reutilizados de instalações elétricas, siderúrgicas e outras indústrias. Outro fator tocante à sustentabilidade do concreto está relacionado ao consumo de energia de sua produção, quando comparado à produção da madeira e do aço (CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRÁLIA, 2010).

2.3.4.2 Superestrutura em madeira

A madeira é considerada um dos mais antigos materiais de construção devido a sua disponibilidade na natureza e facilidade de manuseio. Comparada a outros materiais de construção convencionais, apresenta boa relação resistência/peso (PFEIL, 2003).

Sendo assim, a grande vantagem da madeira está relacionada com sua disponibilidade em quantidades aceitáveis e de qualidade próximas da obra. Por outro lado, a madeira apresenta baixa resistência ao fogo, baixa durabilidade, anisotropia e variabilidade. Vale lembrar que estas desvantagens podem ser reduzidas com tratamentos de melhoria do desempenho da madeira (STUCCHI, 2006).

Para a utilização em pontes, as madeiras podem se classificar em maciças (bruta, roliça, falquejadas e serradas) e industrializadas (compensada, laminada colada e recomposta) (PFEIL, 2003).

Os sistemas de pontes de madeira mais utilizados no Brasil são as pontes em placas e as pontes em vigas. Este último sistema é formado basicamente por pranchas de madeiras serradas, locadas transversalmente sob as vigas de madeira, que geralmente são toras maciças chamadas de longarinas. As longarinas podem ser formadas por vigas de madeira laminada e colada, vigas compostas de madeira serrada, vigas treliçadas, dentre outros (CALIL JUNIOR; GÓES, 2014).

A utilização da madeira roliça como longarina torna a madeira competitiva do ponto de vista técnico e econômico, visto que este processo construtivo permite a utilização da madeira em sua forma natural, ou seja, sem industrialização, manipulação e transporte. Ao mesmo tempo, é acelerado o processo de construção e aproveitamento da madeira (CALIL JUNIOR; GÓES, 2014).

2.3.4.3 Superestrutura mista

“A ponte mista é a junção de dois ou mais materiais. A construção de estrutura com dois ou mais materiais, compondo seções mistas, é uma prática que vem sendo cada vez mais difundida na construção civil” (MILANI, 2010, p.39).

É comum o uso de seções compostas em elementos estruturais fletidos com a finalidade de aumentar a resistência das peças resultantes. A combinação de diferentes materiais, em seções compostas, permite a utilização das principais

características e propriedades mecânicas de cada um, de forma que mais se possa contribuir para a resistência, rigidez e durabilidade do conjunto (PIGOZZO, 2004).

Para Machado (2016), um sistema misto de aço e concreto, dentro do contexto de pontes, é aquele onde um perfil metálico trabalha em conjunto com o concreto. Essa associação pode se dar por atrito, por meios mecânicos ou, em alguns casos, por aderência e repartição de cargas.

O aço é um material amplamente utilizado na indústria da construção, isso se dá pela sua versatilidade em desempenhar várias funções construtivas. Em sistemas estruturais metálicos, o aço é empregado como material laminado em perfis e chapas. Além disso, pode ser utilizado como um pré-esforço em estruturas de concreto armado ou em cabos de alta resistência (CASTRO, 2012).

Uma característica relevante do aço é a sua resistência à tração. No entanto, não apresenta bom desempenho relativo à resistência ao fogo, pois quando exposto à altas temperaturas o aço perde sua rigidez levando a estrutura ao colapso. Para reverter essa situação, é possível utilizar mecanismos de proteção do aço, como pinturas corta-fogo, placas ou o próprio concreto. Estes sistemas também podem proteger o aço da corrosão, evento que ocorre quando exposto a ambientes úmidos (CASTRO, 2012).

Apesar de seu alto peso volumétrico, o aço apresenta elementos estruturais leves, isso ocorre devido a boa distribuição do material em uma peça. Por exemplo, o material no centro de uma viga fletida está sofrendo menos esforços que o material presente na extremidade do elemento, isso justifica o uso de perfis I, T ou tubulares (CASTRO, 2008).

Pode-se dizer que o aço é um material 100% sustentável. Esgotada a vida útil de uma estrutura, os elementos de aço podem ser recuperados e voltar aos fornos como sucata para se transformar em um novo aço sem perdas de qualidade. Este reprocessamento consome a mesma quantidade de energia, no entanto reduz a utilização de novos recursos naturais. Além disso, os resíduos de fabricação do aço, como a escória de alto forno, podem ser empregadas como agregados reciclados na fabricação de cimentos (CASTRO, 2012).

2.4 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE PONTES

A sustentabilidade de pontes tem por finalidade projetar, construir e gerenciar pontes que mantenham um equilíbrio entre os três pilares da sustentabilidade: considerações sociais, econômicas e ambientais (TAC, 2015).

Segundo Penadés-Plà et al. (2016), um consenso entre esses três pilares requer recorrer a um processo de tomada de decisão. Esse processo facilita a seleção racional de uma solução de ponte baseada em certas informações e julgamento sobre os critérios escolhidos para uma fase de ciclo de vida. Nesse sentido, o desenvolvimento sustentável deve ser considerado como uma estratégia de tomada de decisão e os seus sistemas de apoio aplicados diferentes etapas dos ciclos de vida das pontes incluem planejamento, projeto, construção, operação e manutenção.

Nos últimos anos, percebeu-se significativo foco na sustentabilidade da infraestrutura de transportes, como avaliação de impactos sobre o meio ambiente e o bem-estar social e econômico das comunidades vizinhas. Considerando a crescente conscientização da sustentabilidade, a maioria das autoridades reconhece que esse conceito necessita espaço na tomada de decisões (TAC, 2015).

Para o Centro de Transporte Sustentável no Canadá (2015), uma visão sustentável que integra e equilibra os objetivos sociais, econômicos e ambientais é guiada pelos seguintes princípios:

- Atender as necessidades básicas dos indivíduos com segurança da vida e da propriedade;
- Promover a circulação eficiente de pessoas e bens, de modo a apoiar a prospecção econômica e uma qualidade de vida sustentável;
- Respeitar o legado ambiental das futuras gerações, guiando-se por processos de avaliação e planejamento ambiental nas decisões de transporte.

2.4.1 Análise ambiental

Segundo Castro (2012), nos dias de hoje é reconhecida a necessidade de seguir caminhos que levem a um desenvolvimento sustentável. Nesse percurso, o setor da construção desempenha um papel importante pelo seu peso na economia e pela sua responsabilidade na criação de ambientes. Por estas razões, é imprescindível adaptar a construção à conceitos sustentáveis.

Nesse contexto, uma visão estratégica a longo prazo desafia projetistas a procurarem otimizar meios e recursos, minimizando o desperdício e as emissões em várias etapas da construção. Além disso, o respeito pela biodiversidade, a promoção da eficiência energética, a reutilização e a reciclagem dos elementos construtivos representam alguns dos objetivos da construção sustentável. Uma variedade de impactos ambientais em diferentes etapas do ciclo de vida pode ser gerada pelos materiais utilizados e é na fase de projeto que estas questões podem ser consideradas (CASTRO, 2012).

De acordo com Andrade (2013), metodologias foram elaboradas para auxiliar na escolha de materiais e produtos mais adequados para cada etapa da construção, podendo ser abordadas de acordo com três variáveis distintas: *'cradle to gate'* ('berço ao portão'), *'cradle to grave'* ('berço ao túmulo') e *'cradle to cradle'* ('berço ao berço'), conforme exposto abaixo:

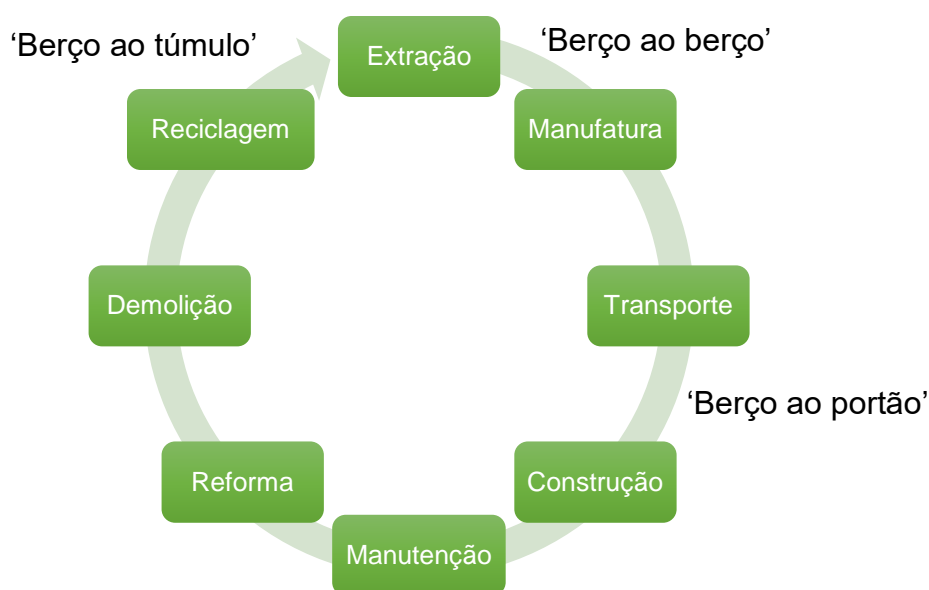


Figura 4 - Ciclo de vida de um produto da construção
Fonte: Adaptado de Anderson (2012).

Todo produto gera impacto sobre o meio ambiente, seja na fase de fabricação, de utilização ou no final de sua vida útil. Todos esses estágios se denominam coletivamente de ciclo de vida (ANDERSON, 2012).

A análise ambiental pode ter diferentes limites, como mostra a Figura 4. Assim, a análise *'cradle to gate'* considera todas as etapas que o produto passa desde a sua extração até o término do processo de fabricação (CASTRO, 2012). Conforme Andrade (2013), esse modelo de análise é o mais desenvolvido e estudado atualmente.

Quando incluímos desde a etapa de extração até a utilização e deposição, dizemos que a análise é do tipo '*cradle to grave*'. Por fim, a análise '*cradle to cradle*', inclui a reciclagem ou reutilização dos produtos utilizados, além das etapas anteriores (CASTRO, 2012; ANDRADE, 2013).

Existe ainda outro tipo de análise, segundo Castro (2012), '*gate to grave*', quando são consideradas as etapas de utilização e fim de vida de um produto.

2.4.1.1 Avaliação do ciclo de vida

A ACV é uma ferramenta que permite avaliar todos os impactos ambientais associados a um produto, desde a obtenção da matéria-prima, processo produtivo, uso e disposição final. O uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas são algumas das categorias de impactos ambientais que necessitam ser incluídas (NBR ISO 14040, ABNT 2009).

Segundo Buffenbarger (2014), os impactos ambientais associados ao longo da vida útil de pontes, incluindo fases como aquisição, criação, transporte e construção de pontes, podem ser avaliados pelo método da ACV.

O relato dos dados ambientais de produtos baseados na ACV e em outras informações relevantes de acordo com a norma ISO 14025 é chamado declaração ambiental de produto (EPD). Seus parâmetros específicos podem incluir o potencial de aquecimento global, o esgotamento do ozônio, a acidificação, a eutrofização, a poluição fotoquímica, a ecotoxicidade, o esgotamento dos recursos e a redução da energia incorporada líquida (BUFFENBARGER, 2014).

A metodologia ACV é uma técnica adaptada à realidade construtiva, pois compreende todos os impactos significativos de cada um dos seus componentes em cada fase do seu ciclo de vida. Dessa forma, a ACV é uma técnica única adequada para a abordagem dos impactos ambientais causados pelos processos e produtos construtivos e pode, então, avaliá-los de forma a realizar a tomada de decisão mais sustentável (ANDRADE, 2013).

Segundo Castro (2012), a parte inicial da ACV compreende o inventário do ciclo de vida (ICV), caracterizado como um estudo detalhado de todos os fluxos internos e externos ao sistema: os recursos e a matéria-prima, tipo de energia utilizada e liberação de emissões para o ar, água e terra. Um inventário busca identificar todas

as entradas e saídas de fluxos do processo considerado e as etapas que constituem o âmbito do estudo.

Uma análise ACV distribui os dados do ICV pelas categorias de impacto ambiental e estuda a contribuição de cada um, sendo que um mesmo ICV pode influenciar mais de uma categoria (BRAGANÇA; MATEUS, 2011).

Os estudos de ACV em geral têm sido morosos e de custos elevados, uma vez que implicam a consideração de inúmeros dados. Além disso, através da sua manipulação, diferentes indicadores e seus respectivos pesos podem ser adotados, permitindo que sejam alcançados resultados discrepantes para um mesmo produto. A ACV é, portanto, o resultado de um conjunto de decisões tomadas a partir de uma análise de propriedades quantificadas, envolvendo questões significativamente subjetivas, o que requer muitas vezes uma análise de sensibilidade (CASTRO, 2012).

2.4.1.2 Indicadores ambientais

Os valores de impactos ambientais são analisados por categorias e parâmetros, apresentando quantidades distintas para cada material. Em cada categoria ambiental, são estabelecidos e quantificados parâmetros a analisar. A partir das diretrizes dos trabalhos desenvolvidos por Castro (2012), Andrade (2013) e Cardoso (2015), adotaram-se as categorias ambientais base deste estudo: consumo de energia, emissões atmosféricas e contribuição para o esgotamento de recursos naturais.

Nesta avaliação, são considerados os processos que colaboram para a quantificação dos impactos ambientais associados à fase '*cradle to gate*', ou seja, desde a extração da matéria-prima até a fabricação do produto.

2.4.1.2.1 Consumo de energia

Os processos construtivos estão diretamente relacionados com grande parte da energia produzida no planeta. Uma obra sustentável atenta à elaboração de projetos, aos processos executivos e aos materiais empregados (FERNANDES, 2009).

O cenário econômico atual e a potencial escassez de energia impulsionam a busca por fontes energéticas alternativas e a melhoria da eficiência energética dos sistemas existentes (CASTRO, 2012).

O consumo de energia pode ser distinguido em duas etapas: a energia incorporada, presente tanto nos insumos utilizados na construção, quanto no transporte e a energia operacional, associada à fase de utilização, computando iluminação e climatização (FERNANDES, 2009). Admitindo que as fases de utilização e manutenção estão fora dos limites deste estudo, a energia operacional não foi considerada.

Sendo assim, dois parâmetros foram levados em consideração: a energia não renovável incorporada (ENR) e a energia renovável incorporada (ER). Ambos os parâmetros exprimem o consumo de energia durante as fases que se incluem no período '*cradle to gate*'.

2.4.1.2.2 Emissões atmosféricas

As emissões atmosféricas, em escala regional ou global, alteram as condições naturais e agravam problemas já existentes, atingindo e prejudicando diretamente o meio ambiente. Sendo a construção civil responsável por grande parte da geração de poluição, evidencia-se a importância da consideração das emissões por parte do setor (RESENDE, 2007). O Protocolo de Quioto, proposto em 1997 e posto em prática em 2005, é visto como um primeiro passo importante para um regime verdadeiramente global de redução de emissões que estabilizará as emissões de gases do efeito estufa (UNITED NATIONS, 2014).

A partir da busca por edificações mais eficientes surgiram os Edifícios de Energia Zero. A ideia é que os edifícios possam satisfazer toda a sua demanda de energia anual a partir de fontes de energia renováveis instaladas no próprio local (TORCELLINI, PLESS, et al., 2006). Nesse sentido, os Edifícios de Energia Zero podem ser vistos como uma solução para a mitigação das emissões dos gases efeito estufa e para o consumo de energia no setor de construção civil (MARSZAL et al., 2011).

Nesta categoria são considerados cinco parâmetros: o potencial de aquecimento global, o potencial de destruição da camada de ozônio, o potencial de acidificação, o potencial de eutrofização e o potencial de formação de ozônio troposférico. Todos estes fatores visam esclarecer a contribuição de materiais para as diferentes ações que intensificam as emissões atmosféricas (CASTRO, 2012).

O potencial de aquecimento global (GWP) é uma medida relativa da contribuição de um determinado gás para o aquecimento global em relação à mesma

quantidade de gás carbônico (CO_2). O GWP é, portanto, uma forma de quantificar o impacto potencial sobre a mudança climática de um determinado gás, normalizado para o GWP de CO_2 . É na fase de extração e fabricação que a quantidade de emissões de CO_2 é mais significativa (ANDERSON, 2012).

O potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) refere-se ao potencial de destruição relativo de uma substância em relação à uma massa similar de clorofluorcarbono 11 (CFC-11), que possui ODP igual a 1 (PROTOCOLO DE MONTREAL, 2011). Segundo Anderson (2012), os gases destrutores da camada de ozônio causam danos à camada de ozônio ao liberarem moléculas radicais livres que rompem o ozônio (O_3). Estes danos reduzem a capacidade do ozônio estratosférico de impedir que a luz ultravioleta (UV) entre na atmosfera terrestre. A destruição da camada de ozônio permite que maior quantidade da radiação ultravioleta atinja o planeta, trazendo prejuízos à durabilidade dos materiais, à saúde dos seres vivos e aos ecossistemas (CARDOSO, 2015).

O potencial de acidificação (AP) é medido utilizando a capacidade de uma substância libertar íons H^+ , que é a causa da acidificação, ou pode ser medida em relação a uma libertação equivalente de dióxido de enxofre (SO_2). O potencial de acidificação total de uma substância é calculado com base na quantidade de uma substância multiplicada pelo seu fator de caracterização do potencial de acidificação (ANDERSON, 2012). Em outras palavras, o AP leva em conta a capacidade de conversão das emissões para a atmosfera em substâncias ácidas que são depositadas como partículas ou chuva ácida (CARDOSO, 2015). Este fenômeno tem repercussões graves na vegetação e nas edificações ao entrar em contato com a superfície terrestre (CASTRO, 2012).

A eutrofização é medida utilizando a unidade de referência de kg de nitrogênio ou equivalentes de fosfato. Nitratos e fosfatos em concentrações aumentadas na água podem estimular o crescimento excessivo de algas e reduzir o oxigênio dentro da água. A ocorrência da eutrofização pode levar a danos aos ecossistemas, reduzindo a biodiversidade e trazendo efeitos sobre os animais não aquáticos e seres humanos que dependem destes ecossistemas. Na indústria da construção, esse parâmetro pode ser influenciado pelo mau escoamento dos locais de obras, pela falta de manutenção dos sistemas de drenagem ou esgotos e pela produção intensiva de produtos que contribuam para a eutrofização (ANDERSON, 2012).

Por fim, o potencial de formação de ozônio troposférico (POCP) é uma medida da capacidade relativa de uma substância para produzir ozônio na presença de óxidos de nitrogênio (NO_x) e luz solar. O POCP é expresso utilizando a unidade de referência, kg de compostos orgânicos voláteis não metanados (NMVOC) ou kg de equivalente de etileno. Em atmosferas contendo NO_x e compostos orgânicos voláteis (COV_s), ozônio e outros poluentes do ar podem ser criados na presença de luz solar. Embora o ozônio proteja contra a radiação ultravioleta na alta atmosfera, em baixos níveis implica em impactos diversos como na incidência de doenças respiratórias (ANDRESON, 2012).

2.4.1.2.3 Esgotamento de recursos

Na busca por reduzir os impactos ambientais e visando a preservação dos recursos naturais, o setor da construção civil tem buscado alternativas por meio de ações sustentáveis. Nesse sentido, a busca pela sustentabilidade certamente configura-se uma vantagem competitiva para empresas desse segmento (OLIVEIRA; SPOSTO, 2012).

Tendo em vista a necessidade de extração e utilização de recursos naturais para a produção dos materiais constituintes das pontes, foram considerados no potencial de esgotamento de recursos: o potencial de recursos abióticos e a energia não renovável incorporada nos materiais utilizados (CASTRO, 2012).

O potencial de diminuição abiótica (ADP) é determinado para cada extração de elementos com base nas reservas remanescentes e taxa de extração. O ADP é comparado ao caso de referência, antimônio (Sb), resultando em unidades de depleção abiótica de equivalente kg de Sb (ANDERSON, 2012). Em termos gerais, o ADP relaciona a garantia da saúde humana com a preservação dos ecossistemas e objetiva avaliar a diminuição da disponibilidade dos recursos naturais (CARDOSO, 2015).

Já o indicador energia não renovável incorporada (ENR) trata da contribuição do uso de fontes energéticas não renováveis para o esgotamento de recursos naturais (CASTRO, 2012).

2.4.2 Análise econômica

De acordo com Bragança e Mateus (2006), a atual realidade é incompatível com os princípios do desenvolvimento sustentável, em que busca-se uma relação harmônica entre os três pilares da sustentabilidade.

A análise econômica é de extrema importância para o estudo de viabilidade de uma construção. Segundo Eick (2010), a análise de viabilidade de qualquer negócio é iniciada pela dimensão econômica. A fim de comprovar a consistência dos dados, a análise deve ser embasada em estimativas confiáveis e coerentes dos elementos de custos e de receitas, permitindo projetar o fluxo de caixa, isso permite verificar se os benefícios gerados com o investimento compensam os gastos realizados.

Uma construção é sustentável quando, após a aplicação dos indicadores de sustentabilidade, apresentar custo coerente com os custos da construção tradicional. Sendo assim, a construção deve reduzir os custos de manutenção, utilizando sistemas construtivos simples, padronizados e com mão-de-obra reduzida (CARDOSO, 2015).

Nesse contexto, deve haver um equilíbrio entre a análise econômica perante as demais dimensões. Para Mateus (2004), quando a análise de custos dos materiais se compara com a totalidade do ciclo de vida da construção, o custo inicial pode ser justificado desde que os custos futuros sejam reduzidos. Bem como o custo inicial elevado pode ser justificado se o produto apresentar bom comportamento ambiental durante seu ciclo de vida.

2.4.2.1 Indicadores econômicos

Grande parte das avaliações de sustentabilidade são embasadas em análises de indicadores (BRAGANÇA; MATEUS, 2006). Os autores ainda citam:

Um indicador é geralmente um valor derivado da combinação de diversos parâmetros. Um parâmetro é uma propriedade mensurável ou observável, que fornece informação acerca de um fenômeno, ambiente ou área. Como os resultados de uma avaliação apresentam uma elevada dependência em relação ao número e do tipo de indicadores considerados, os indicadores a analisar devem ser definidos de uma forma clara, transparente, objetiva e concisa. Depois, será indispensável a definição das áreas de avaliação e dos respectivos parâmetros (BRAGANÇA; MATEUS, 2006, p.2).

Na análise de sustentabilidade na construção, os diferentes indicadores adotados nem sempre possuem relação entre si ou apresentam a mesma grandeza.

Nesse sentido, é inviável convergir os parâmetros dos indicadores para um valor absoluto, visto que eles não são dependentes entre si. Uma solução que apresenta bom desempenho ambiental, deixa de ser sustentável quando apresenta baixa funcionalidade, por exemplo. De outra forma, uma solução também não é dita sustentável quando apresenta boa funcionalidade, mas possui um custo de construção superior ao custo de construção de soluções convencionais (BRAGANÇA; MATEUS, 2006).

Nesse contexto, um indicador econômico representa de maneira direta e quantitativa uma realidade econômica. Geralmente trata-se de uma estatística de medições de variáveis. A correta interpretação dos indicadores econômicos permite a obtenção conhecimento acerca de uma situação econômica, a realização de projeções e estimativas.

Entre indicadores econômicos comumente utilizados para avaliações de sustentabilidade e análise de ciclo de vida, cabem os custos do produto. Estes custos surgem no decorrer do ciclo de vida da obra.

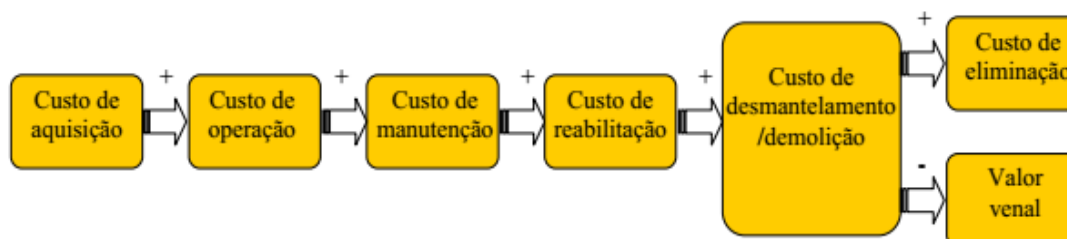


Figura 5 - Custos econômicos associados ao ciclo de vida dos materiais e componentes de construção
Fonte: Mateus (2004).

Diferentemente da avaliação ambiental, o presente trabalho traz uma avaliação econômica até a etapa de montagem dos elementos da ponte. No entanto, os custos de manutenção, reabilitação, demolição e eliminação, estão fora do limite deste estudo.

2.4.2.1.1 Custo de construção

Para um melhor entendimento de como é obtido o custo de construção, deve-se primeiramente explicar os conceitos de estimativa de custos e orçamento.

2.4.2.1.1.1 Estimativa de custos

Uma estimativa de custo é realizada na fase preliminar de um projeto. Compreende o levantamento de quantidades de materiais e serviços, pesquisas de

preços médios e aplicação dos coeficientes de correção (SAMPAIO, 1991). A estimativa de custos é amplamente utilizada em estudos de viabilidade, uma vez que trata de uma previsão de custos, indicando a viabilidade da implantação de determinado projeto. Esta estimativa deve fornecer um grau de precisão aceitável definido pelo estimador para o custo do empreendimento (LOSSO, 1995).

Várias etapas de um empreendimento são cabíveis do uso da estimativa de custos, mesmo que com precisão inferior a um orçamento discriminado, que por sua vez, mostra-se o mais preciso dos métodos (OTERO, 2000).

Losso (1995) afirma ainda que não é objetivo da estimativa de custos apresentar um valor preciso da obra, mas sim um intervalo aceitável no contexto de utilização dos resultados.

2.4.2.1.1.2 Processo orçamentário

Orçamento é definido como a previsão das receitas e despesas de uma empresa, sustentado na descrição detalhada dos materiais e serviços necessários para realização de uma obra. Dessa forma, para realizar orçamento discriminado de um empreendimento se faz indispensável a descrição de todos os projetos, memoriais descritivos, disponibilidade de insumos, prazos de execução, todos vinculados com a capacidade financeira da incorporadora (LOSSO, 1995).

O processo orçamentário, a partir de um plano de execução pré-determinado, estabelece os gastos necessários à realização de um projeto, devendo cumprir os seguintes objetivos: definir o custo de execução dos serviços, servir de base para o faturamento e análise de investimentos e, por fim, fornecer informações para o desenvolvimento de coeficientes técnicos confiáveis tornando a empresa mais competitiva (LIMA, 2000).

Além disso, o orçamento aborda o aspecto financeiro, que é interesse de qualquer empreendedor. Dessa forma, o orçamento deve ser o mais preciso possível (LOSSO, 1995).

Nesse contexto, o orçamento de uma obra pode ser dividido em três etapas: orçamento preliminar, orçamento analítico ou detalhado e orçamento sintético. Sampaio (1991) define cada um deles como sendo:

- Orçamento preliminar: É realizado na etapa de anteprojeto, relacionando-se com a estimativa de custos, preços médios, quantidade de materiais e serviços para uma avaliação de custos da obra;

- Orçamento analítico ou detalhado: É a avaliação de custos realizada através do levantamento das quantidades de materiais e serviços e da composição unitária, realizada na etapa de execução do projeto;
- Orçamento sintético: Em poucas palavras, representa o orçamento analítico de forma resumida em planilhas com os principais itens e seus custos.

Para a elaboração de orçamentos é imprescindível o uso de algumas ferramentas e metodologias. Nesse sentido, o método da composição unitária tem gerado resultados precisos dos custos de uma obra. Para Losso (1995), uma composição unitária de custo “é o conjunto das quantidades de insumos, materiais e mão de obra, necessários para execução de uma unidade do serviço em questão, relacionadas a seus custos”.

Cabral (1988) ressalta que as grandezas da medição do serviço e da composição devem ser compatíveis. Por exemplo, ao se medir m² de alvenaria, deve-se verificar se a composição está condizente com a medição. Além disso, para toda quantidade de insumo, é adicionado um percentual relativo à maior ou menor dificuldade de execução do serviço e às perdas de materiais nos canteiros. (ANDRADE; SOUZA, 2002).

Os custos totais de uma operação são resultados da soma dos custos unitários multiplicados pelas respectivas quantidades necessárias à execução de uma unidade elementar na medição do trabalho da construção (FONSECA, 2007, *apud* CASTRO, 2012). Portanto, o valor total de um investimento é o somatório dos valores totais de cada operação incluindo custos diretos, indiretos e lucro (CASTRO, 2012).

2.4.3 Considerações sociais

A dimensão social, como um dos pilares da sustentabilidade, engloba os aspectos que influenciam diretamente na saúde, segurança e conforto da sociedade.

Com relação a dimensão social Cardoso (2015) destaca:

O desenvolvimento social sustentável deve permitir uma sociedade equilibrada e racional na procura de um estilo de vida adaptado ao presente e ao mesmo tempo a pensar no futuro e nas gerações vindouras. Desta forma, procura-se que o desenvolvimento da sociedade se expresse numa melhoria significativa da qualidade de vida da população mundial, através da procura da justiça social, da segurança e da paz (CARDOSO, 2015).

Neste trabalho foi desconsiderado o desempenho social, devido à grande dificuldade de eleger e comparar indicadores sociais para a comparação dos materiais da superestrutura das pontes.

2.4.4 Tomada de decisão

Andrade (2013) afirma que, geralmente, a atividade construtiva não é favorável ao ambiente devido aos impactos gerados no meio. No entanto, no campo dos edifícios, é crescente a preocupação com o desenvolvimento sustentável. Dessa forma, faz-se necessária uma abordagem por parte das organizações acerca dos impactos ambientais causados pelos processos e produtos da construção ao longo do ciclo de vida, bem como avaliá-los de forma a realizar uma tomada de decisão sustentável.

A tomada de decisões em projetos ambientais pode ser complexa, principalmente devido aos conflitos de escolhas inerentes a fatores sociopolíticos, ambientais, ecológicos e econômicos. A seleção de estratégias apropriadas geralmente envolve vários critérios adicionais, como a distribuição de custos e benefícios, impactos ambientais para diferentes populações, segurança, risco ecológico ou valores humanos (KIKER et al., 2005).

Estes critérios são difíceis de se condensar em um valor monetário, em parte porque as preocupações ambientais envolvem, muitas vezes, princípios éticos e morais que podem não estar relacionados à qualquer uso ou valor econômico. Além disso, mesmo que fosse possível agregar vários rankings de critérios em uma unidade comum, essa abordagem nem sempre seria desejável porque a capacidade de acompanhar as preferências conflitantes de partes interessadas pode ser perdida no processo. Conseqüentemente, a seleção de alternativas diferentes envolve frequentemente fazer uma escolha que não satisfaz um ou mais grupos de partes interessadas (KIKER et al., 2005).

O presente trabalho compara diferentes soluções construtivas em pontes compostas por diferentes materiais com o objetivo de auxiliar no processo de tomada de decisão.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este estudo caracteriza-se como pesquisa exploratória que, de acordo com Gil (2002, p.41), “tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses”.

Acerca dos procedimentos técnicos desenvolvidos, têm-se uma pesquisa bibliográfica e documental. Foram levantados todos os dados e parâmetros necessários, bem como metodologias de estudo para que posteriormente fossem desenvolvidas as análises.

Os procedimentos de coleta e análise das informações possuem abordagem quantitativa, fornecendo índices numéricos que apontam os resultados da pesquisa.

Este estudo limita-se às análises ambiental e econômica da superestrutura dos modelos de ponte selecionados. Não serão estudados os elementos que compõem a infraestrutura e a mesoestrutura. Além disso, o trabalho tem por objetivo o estudo de pequenas pontes, usuais em estradas vicinais. Marchetti (2007), apud Machado (2016) classifica pontes que possuem vãos de 2 a 10 m como pontilhões. De acordo com Machado (2016), pontilhões são pontes de pequenos vãos e larguras, com apenas uma faixa de tráfego.

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

O presente trabalho desenvolveu-se, basicamente, em três etapas. Primeiramente, foram obtidos os projetos e modelos de pontes já dimensionadas constituídas uma por concreto pré-fabricado e outra por madeira, bem como elaborado um pré-dimensionamento de uma estrutura mista constituída por aço e concreto. Em seguida, determinou-se o modelo geométrico ideal para as pontes, com base nas necessidades de tráfego da região.

Prosseguindo a pesquisa, realizou-se um estudo acerca dos materiais componentes da superestrutura das pontes por meio de quantitativos, da análise de impacto ambiental e econômica de cada modelo de ponte.

De posse dessas verificações, foi possível desenvolver um comparativo entre a sustentabilidade das superestruturas das pontes, tendo em vista indicadores ambientais e econômicos.

3.1.1 Estudo das pontes

3.1.1.1 Adoção de modelos de pontes

Desenvolvendo-se busca por modelos de pontes compostas por materiais distintos, foram selecionadas estruturas constituídas, uma por concreto pré-fabricado, uma por madeira e outra mista aço/concreto.

O manual de construções de pontes municipais, contendo as especificações técnicas, projetos tipo e montagem, bem como os projetos de vigas, placas e guardarodas de concreto, foram disponibilizados pelo site do DER/PR para a ponte pré-fabricada de concreto.

Para o estudo da ponte de madeira, utilizou-se do modelo descrito e dimensionado por Da Silva e Philippsen (2015).

Por fim, para a ponte mista aço/concreto, por não ter sido encontrado um modelo já dimensionado com as mesmas dimensões dos demais projetos adotados, realizou-se um pré-dimensionamento.

3.1.1.1.1 Pré-dimensionamento da ponte mista aço/concreto

A adoção dos perfis I em aço laminado que sustentam o tabuleiro de concreto, foi baseada nos resultados encontrados por Machado (2016) e Eller, De Paula e Ferreira (2011), conforme apresentado na Figura 6. Sendo assim, pelo fato de estes autores terem adotado como largura do tabuleiro um valor menor do que neste estudo, perfis de dimensões imediatamente superiores aos perfis calculados por estes trabalhos foram adotados, de maneira a 'compensar' o acréscimo de largura da ponte para cada vão. Portanto, para os vãos de 5, 7 e 9 metros foram adotados os perfis W 460x68, W 460x106 e W 610x140 respectivamente. As relações entre os perfis I e os vãos máximos suportados encontram-se na Figura 6.

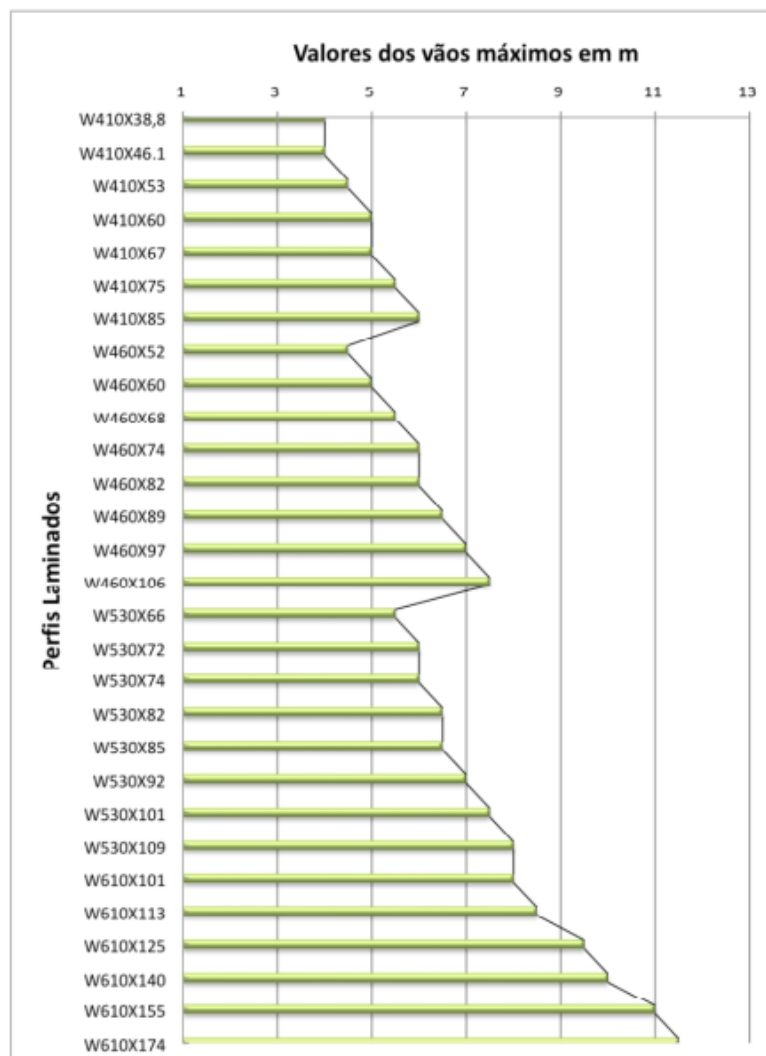


Figura 6 - Relação entre os perfis laminados e seus vãos máximos
Fonte: Eller, De Paula e Ferreira (2011).

Para o dimensionamento do tabuleiro em concreto armado, foi utilizado o software AltoQI Eberick. No cálculo das cargas móveis, embora a NBR 7188, ABNT 2013 indique como carga móvel rodoviária mínima o tipo TB-240 para estradas vicinais, adotou-se o trem tipo TB-450, assim como nos projetos adotados para as pontes pré-fabricada de concreto e em madeira, de forma a padronizar os projetos e prever a passagem de veículos pesados.

A NBR 7188, ABNT 2013 cita a carga móvel TB-450 como sendo definida por um veículo tipo de 450 kN, com seis rodas aplicando uma carga $P = 75$ kN cada uma, três eixos de carga afastados 1,5 metros entre si, área de ocupação de 18 m², circundada por uma carga distribuída constante $p = 5$ kN/m², conforme mostra a Figura 7.

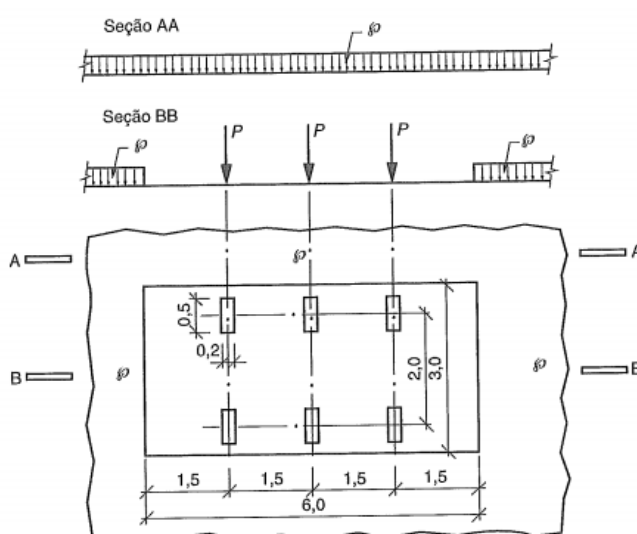


Figura 7 - Disposição das cargas estáticas
Fonte: NBR 7188, ABNT 2013.

A NBR 7188, ABNT 2013 ainda cita que a carga móvel assume qualquer posição na pista de rolamento, inclusive acostamento e faixas de segurança. Dessa forma, para o dimensionamento do tabuleiro da ponte mista, foram locadas as cargas móveis nas duas posições que geravam os maiores momentos positivos e negativos, assumindo assim as duas posições mais desfavoráveis.

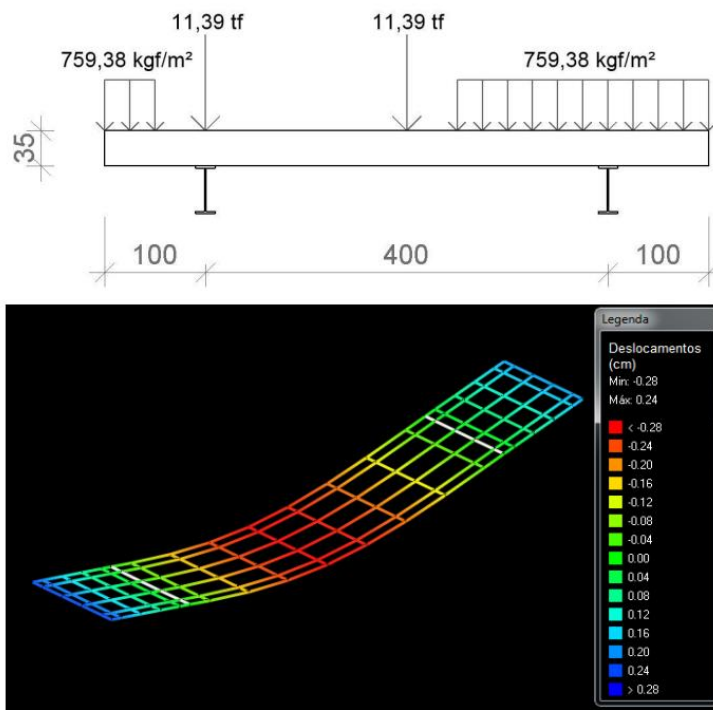
Para o tabuleiro da ponte mista, foi optado por utilizar placas de concreto pré-moldadas de modo a facilitar a execução, visto que, não é possível avaliar a dificuldade da instalação das escoras das formas no caso do tabuleiro moldado in loco. Portanto, foram estabelecidas as dimensões da placa como sendo 6m de largura (largura da ponte) e 1m de comprimento. No caso de execução, estas placas seriam içadas e locadas lado a lado até atingir o vão total de cada ponte, facilitando assim, a execução do tabuleiro.

Como o comprimento de cada placa é de 1m, somente um eixo da carga móvel foi locado sobre a placa para modelagem no software AltoQi Eberick, uma vez que a distância de cada eixo de carga é 1,5 metros. Além disso, aplicaram-se sobre as cargas P e p os coeficientes de impacto vertical, estabelecidos pela NBR 7188, ABNT 2013.

A Figura 8 apresenta as posições mais desfavoráveis da carga móvel sobre o tabuleiro e também o deslocamento da placa em cada situação fornecido pelo software AltoQi Eberick. Para uma melhor visualização a escala dos deslocamentos

foi aumentada em 100 vezes. A Figura 8-(a) apresenta o maior momento positivo gerado na placa, já a Figura 8-(b) mostra o maior momento negativo.

(a)



(b)

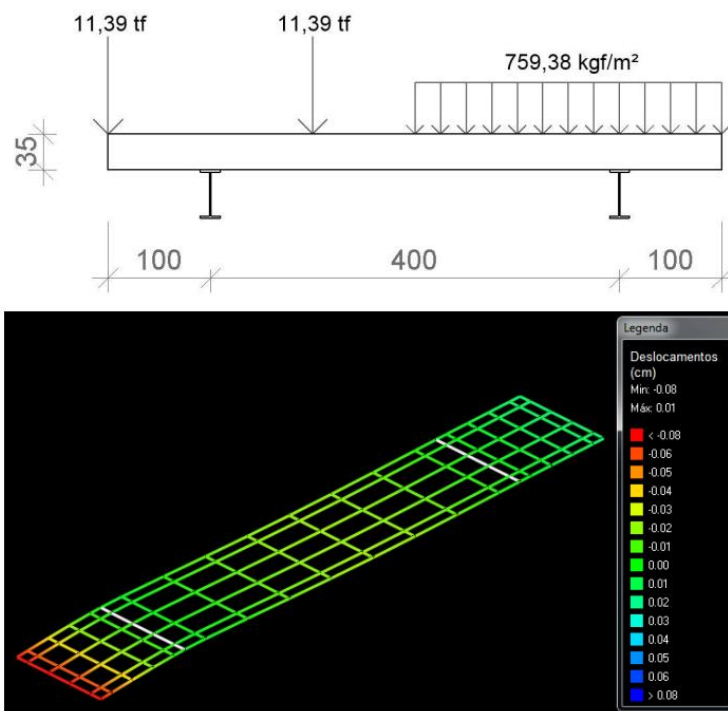


Figura 8 - Posições mais desfavoráveis da carga móvel gerando em (a) maior momento positivo e em (b) maior momento negativo.
Fonte: Autores (2017).

A espessura da placa foi estabelecida em 35 cm, uma vez que é suficiente para combater a flecha máxima ($L/250$) estabelecida pela NBR 6118, ABNT 2014. Já os resultados das armaduras, tanto positivas quanto negativas, foram fornecidas pelo software AltoQi Eberick, como pode ser observado na Figura 9. Os guarda-rodas da ponte mista aço/concreto foram os mesmos utilizados na ponte de concreto pré-fabricado.

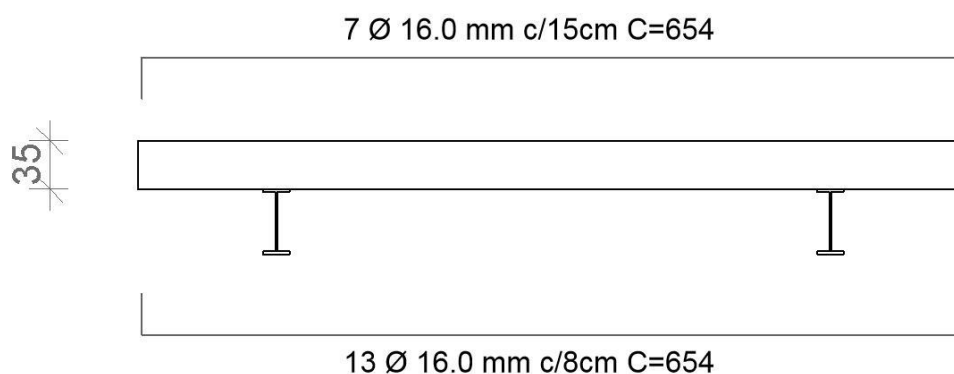


Figura 9 - Resultado do pré-dimensionamento da placa de concreto
Fonte: Autores (2017).

3.1.1.2 Estudo da geometria das pontes

Com base no trabalho de Da Silva e Philippsen (2015), as características das estradas vicinais da região Sudoeste do Paraná definiram a geometria das pontes. A partir de dados de fabricantes a respeito da distância externa entre pneus dianteiros de algumas das colheitadeiras disponíveis no mercado brasileiro, expostos na Tabela 1, foi estipulada a largura da ponte como sendo 6 metros.

Tabela 1 - Dados de largura e peso de colheitadeiras modernas

Marca	Modelo	Tipo de pneu	Largura entre pneus dianteiros (extremidade externa - interna em metros)	Peso (kg)
CASE	AXIAL - FLOW 7120	Duplo - 520/85R42	5,14 - 3,617	14943
CASE	AXIAL - FLOW 8120	Duplo - 520/85R43	5,14 - 3,617	16488
MASSEY FERGUSON	MF - 9795	Duplo - 520/85R44	5,23 - 2,53	19420
MASSEY FERGUSON	MF - 9895	Duplo - 620/70R42	5,35 - 2,41	19540

Fonte: Da Silva e Philippsen (2015).

O intervalo de comprimento do vão a ser vencido foi definido com base em dados referentes às pontes existentes no município de Pato Branco (PR), obtidos na dissertação de Milani (2010). Tratando-se do estudo de pontilhões, foram adotados, então, para este trabalho os vãos de 5, 7 e 9 metros, julgados comuns na região.

3.1.2 Análise dos materiais constituintes das pontes

De posse dos modelos das pontes, realizou-se a modelagem dos projetos para cada um dos vãos do intervalo utilizando o software Autodesk Revit. Os modelos tridimensionais das estruturas permitiram a extração dos valores correspondentes ao volume de peças dos projetos.

A partir das dimensões definidas pelos materiais de apoio e da volumetria dos elementos da ponte, foram confeccionadas planilhas de cálculo pelos autores com o auxílio do Microsoft Office Excel. Elaboradas as planilhas, obteve-se o quantitativo total de materiais de cada modelo de ponte selecionado, bem como informações adicionais necessárias.

Para a análise ambiental, as unidades de medida do quantitativo foram todas transformadas em unidade de massa (kg) para posteriormente comparar aos índices de impacto ambiental, expressos em mesma medida.

A análise econômica foi realizada com base em dados fornecidos pelas planilhas de composição de serviços SINAPI: DEZEMBRO de 2016 - Vigência: FEVEREIRO de 2017, TCPO 13ª edição e também por pesquisas no mercado da região de Pato Branco/ PR.

3.1.3 Comparação de desempenho econômico e ambiental entre as superestruturas das pontes

Utilizando os dados obtidos pelas análises ambiental e econômica, compararam-se as superestruturas das pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto do ponto de vista da geração de impactos no meio e também perspectiva econômica.

Esta metodologia de estudo não determina qual é a melhor estrutura ou o melhor processo em termos de rentabilidade e funcionalidade, mas sim, serve como ferramenta de apoio para a tomada de decisão acerca da construção sustentável.

3.1.4 Unidade funcional

Segundo Johnson (2006), a unidade funcional de uma avaliação do ciclo de vida tem por objetivo criar uma comparação legítima e precisa dos materiais. Sendo assim, para que fosse possível comparar os materiais com base no desempenho estrutural, foram definidas três unidades funcionais – uma para cada vão adotado.

Tomaram-se como unidades funcionais as quantidades necessárias de material para compor a superestrutura de pontes com cerca de 30m² (6,00m x 5,00m), 42m² (6,00m x 7,00m) e 54m² (6,00m x 9,00m). No entanto, de maneira a tornar possível a utilização do trabalho como referência para outras análises comparativas, optou-se por transformar os valores relativos à estrutura total em valores de referência por m² de área útil.

3.1.5 Limites de estudo

Para a análise de impactos ambientais, tendo como diretrizes as publicações *Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão* (Castro, 2012) e *Integração da Análise do Ciclo de Vida nas Práticas de Projetos de Edifícios* (Andrade, 2013), foi considerada a fase '*cradle to gate*' como base de estudo.

Assim, foram contabilizados os impactos envolvidos na extração da matéria-prima e na transformação em produtos de construção, ou seja, essa etapa do ciclo de vida termina na porta da fábrica, excluindo deste estudo processos que interferem no resultado final da análise.

Sendo assim, este trabalho não contempla a análise de impactos ambientais e custos nas fases de uso e manutenção das pontes, nem no processo de fim de vida. Esta escolha deve-se a maior dificuldade de quantificação dos dados nessas etapas e a falta de informações nas bases de dados da ACV.

Na análise econômica, os valores dos materiais incluíram as etapas de extração da matéria-prima, produção dos produtos, bem como a montagem das estruturas. Além disso, contabilizou-se a utilização de equipamentos, mão de obra e despesas indiretas.

Assume-se ainda que este trabalho limita-se a comparar a superestrutura dos modelos de ponte, excluindo do processo a infra e a mesoestrutura.

3.1.6 Diagrama

Para melhor entendimento das etapas descritas, representou-se graficamente a metodologia através da Figura 10.

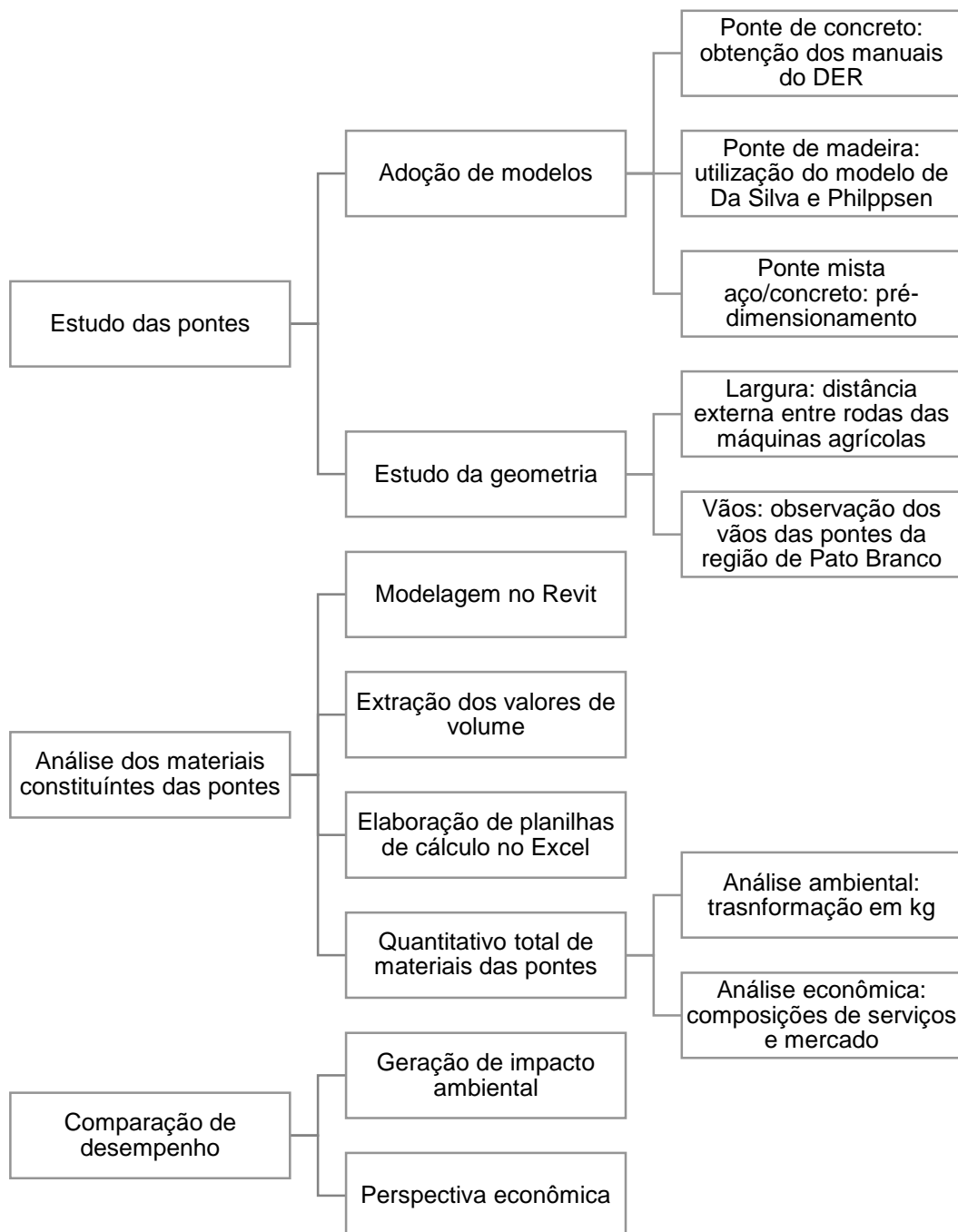


Figura 10 - Diagrama das etapas da pesquisa
Fonte: Autores (2017).

4 CASO PRÁTICO: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PONTES

Este estudo apresenta o comparativo entre os valores resultantes em cada parâmetro ambiental, bem como o comparativo de custos para os três modelos de ponte considerados. Além disso, para cada um dos projetos de ponte, foram avaliados três diferentes vãos: 5, 7 e 9m, intervalos julgados comuns em pontes existentes no município de Pato Branco (PR), de acordo com dados de Milani (2010).

Nesta seção, serão apresentados os resultados e considerações acerca das pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto apenas para o vão de 7m, estando os dados referente aos vãos de 5 e 9m nos Apêndices de A a F deste trabalho.

4.1 DESEMPENHO AMBIENTAL

A comparação direta de valores dos parâmetros analisados é a maneira mais simples de contrastar diferentes resultados. Sendo assim, para cada parâmetro é possível identificar a estrutura com melhor desempenho (CASTRO, 2012).

A base de dados considerada contempla os impactos ambientais associados à fase '*cradle to gate*' e utiliza uma unidade funcional de 1 kg. Nesta avaliação, são considerados os processos que contribuem para a quantificação de impactos ambientais desde a extração de matérias-primas, fabricação e transporte entre os dois locais (ANDRADE, 2013).

Metodologias existentes e escolhas pessoais, decorrentes da leitura bibliográfica, fundamentaram a seleção dos indicadores ambientais. Sendo assim, os resultados desta análise assumem caráter subjetivo e devem ser interpretados no conjunto deste trabalho, tendo em vista as considerações feitas ao longo do estudo.

Os valores de impactos ambientais por categoria e parâmetros considerados neste estudo foram retirados da base de dados apresentada na dissertação de Andrade (2013) são apresentados na Tabela 2, com os respectivos valores para cada material utilizado.

Tabela 2 - Categorias e parâmetros de cada impacto ambiental

IMPACTOS AMBIENTAIS									
CATEGORIA	CONSUMO DE ENERGIA		EMISSÕES ATMOSFÉRICA (AQUECIMENTO GLOBAL)					ESGOTAMENTO DE RECURSOS	
PARÂMETRO	Energia Renovável Incorporada (ER)	Energia Não-Renovável Incorporada (ENR)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Potencial de Destruição de Ozônio (ODP)	Potencial de Acidificação (AP)	Potencial de Eutrofização (EP)	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Energia Não-Renovável Incorporada (ENR)
UNIDADE	MJ equiv	MJ equiv	Kg CO ₂ equiv	Kg CFC 11 equiv	Kg SO ₂ equiv	Kg (PO ₃) ₄ equiv	Kg Etano equiv	Kg Sb equiv	MJ equiv
Aço vergalhão (kg)	1,52 E-01	3,27 E+01	1,25 E+00	6,16 E-08	5,57 E-03	1,30E-03	8,29E-04	1,29E-02	3,27E+01
Aço em perfil (kg)	1,16 E-01	8,66 E+00	5,71 E-01	5,40 E-08	3,04 E-03	4,86E-04	1,85E-04	4,54E-03	8,66E+00
Concreto (kg)	6,24 E-03	5,56 E-01	1,10 E-01	3,55 E-09	1,79 E-04	2,84E-05	6,49E-06	2,38E-04	5,56E-01
Madeira (kg)	1,58 E+01	1,98 E+00	- 1,20 E+00	1,28 E-08	8,05 E-04	1,29E-04	7,29E-05	1,02E-03	1,98E+00

Fonte: Adaptado de Andrade (2013).

Este trabalho adotou como valores dos parâmetros para o aço dos pregos, os mesmos que os descritos por Andrade (2013) para aço vergalhão. Da mesma forma que considerou-se para madeira roliça os mesmos valores que os dados para madeira serrada.

4.2 DESEMPENHO ECONÔMICO

Na dimensão econômica, este estudo leva em consideração uma só categoria: o custo de construção das pontes, que por sua vez têm em consideração o custo de materiais, custo de equipamento e custo de mão de obra. Como já referido, os custos relacionados com a fase de utilização e manutenção estão fora do limite deste

trabalho, bem como os custos associados à demolição e deposição em aterro, ou reciclagem.

Ainda sobre o custo de construção das pontes, foram consultados: SERVIÇOS DE EDIFICAÇÕES - COM DESONERAÇÃO Resolução Conjunta SEIL/PRED 002/2017 Referência SINAPI: DEZEMBRO de 2016 - Vigência: FEVEREIRO de 2017 e Tabelas de Composição de Preços para Orçamento TCPO 13ª EDIÇÃO, bem como realizada cotação de mercado. Para a formação do preço foi adotado BDI de 30%.

Além disso, sendo as estradas vicinais o foco deste estudo, considerou-se neste trabalho uma distância hipotética de 10km da ponte aos centros urbanos para a realização do orçamento dos custos com transporte durante a montagem dos elementos das pontes. Fez-se essa consideração de forma igual para todos os modelos de pontes.

4.3 PONTE EM CONCRETO PRÉ-FABRICADO

4.3.1 Descrição da estrutura

O projeto adotado foi obtido do Manual de Construção de pontes – Especificações Técnicas, Projetos Tipo e Montagem do DARM – Diretoria de Apoio Rodoviário aos Municípios do DER /PR – Departamento de Estradas e Rodagem.

Como este trabalho refere-se à pontes com vãos determinados de 5, 7 e 9m, foram estudados projetos compostos por vigas pré-fabricadas modelo DER/PR tipo “T”: “TA 6,50”, “TA-7,50” e “TA-9,50” (com vãos livres máximos respectivamente iguais a 6, 7 e 9m) com placas e guarda-rodas em concreto armado, conforme mostra a imagem abaixo.

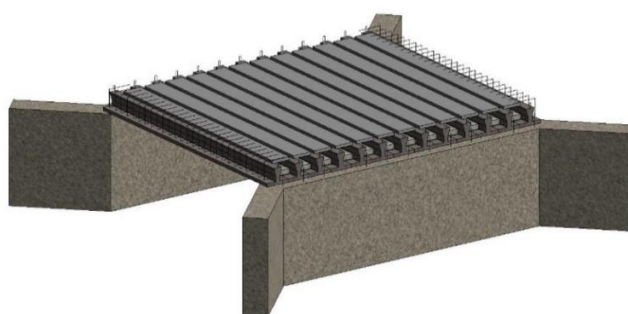


Figura 11 - Elementos pré-fabricados da ponte de concreto
Fonte: Autores (2017).

Além dos elementos pré-fabricados de concreto e de armaduras de amarração, que são mostrados na Figura 11, o projeto da ponte inclui concreto lançado entre vigas e de cobertura, finalizando estrutura da ponte, como exposto na Figura 12.

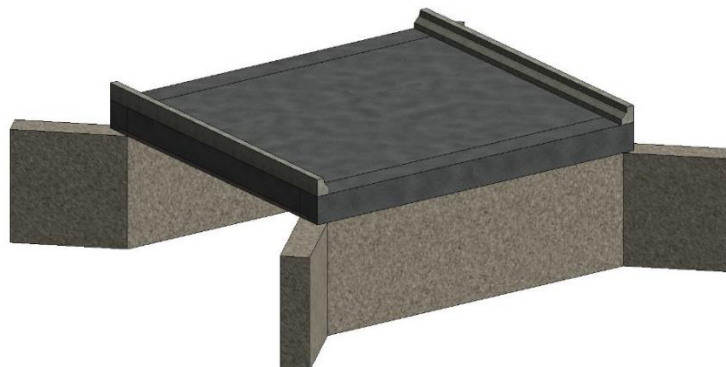


Figura 12 - Ponte em concreto pré-fabricado
Fonte: Autores (2017).

4.3.2 Análise da estrutura

Os valores referentes as quantidades de concreto e aço em vergalhão, em kg, de cada elemento constituinte da ponte de concreto pré-fabricado para o projeto com viga “TA-7,50”, vão de 7m, é apresentado no Gráfico 1.

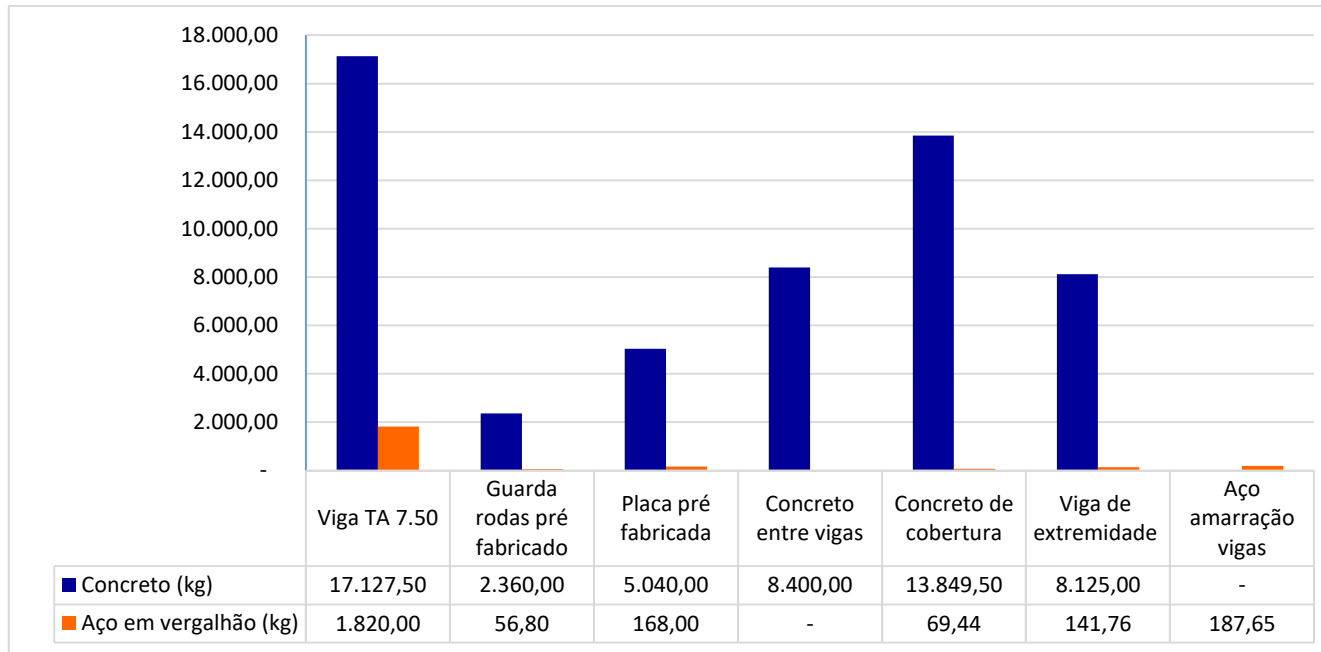


Gráfico 1 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-7,50" – Vão de 7m
Fonte: Autores (2017).

Observando os dados do Gráfico 1, verifica-se a relevante contribuição do concreto em todos os elementos da ponte, comparativamente à participação do aço em vergalhão.

Para melhor análise da aplicação dos dois materiais na ponte de concreto pré-fabricado, encontram-se abaixo as quantidades totais de concreto e aço em vergalhão na estrutura. De forma a tornar possível a utilização deste estudo como referência para outras análises de comparação, o Gráfico 2 apresenta também as quantidades de material por m² útil da estrutura da ponte para o vão de 7m (“TA-7,50”).

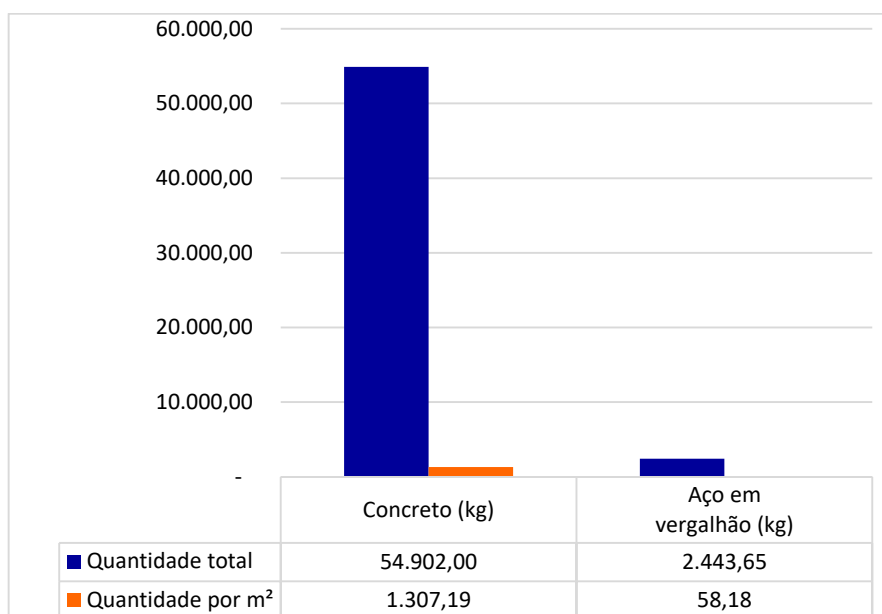


Gráfico 2 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-7,50” – Vão de 7m
Fonte: Autores (2017).

A ponte em concreto pré-fabricado apresenta o concreto como principal material em sua composição, sendo responsável por quase que a totalidade do peso da estrutura em todos os casos. Assim, o aço em vergalhão presente nas armaduras representa apenas cerca de 5% do peso total da estrutura.

O Gráfico 3, a seguir, faz referência aos preços por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com vão de 7m.

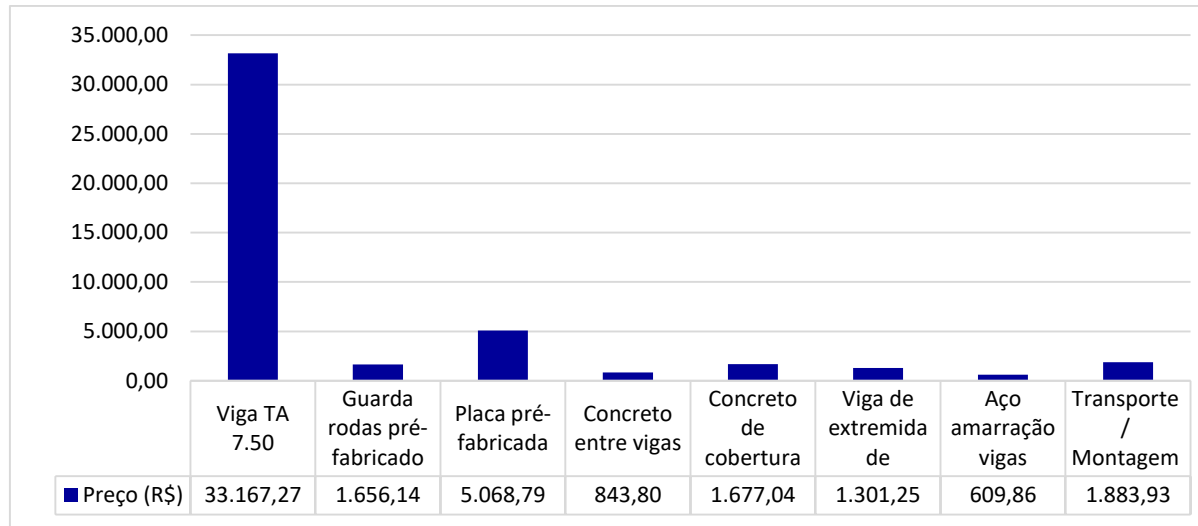


Gráfico 3 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA 7,50" – Vão de 7m - Com BDI 30%
Fonte: Autores (2017).

Observa-se que o maior preço encontrado refere-se ao elemento em maior quantidade nesta ponte, a viga pré-fabricada “TA-7,50”. São no total 13 vigas alocadas lado a lado na direção do tráfego, conforme mostra a Figura 11.

A partir do produto dos valores extraídos do quantitativo, em kg, da ponte em concreto pré-fabricado pelos valores do impacto ambiental de cada parâmetro (descritos na Tabela 2) para os materiais concreto e aço vergalhão, foi possível obter o valor do impacto ambiental de cada material nos parâmetros listados. A Tabela 3 ilustra os valores por material e por parâmetro contabilizando o total da superestrutura e também por m² útil.

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	CONCRETO TOTAL	AÇO VERGALHÃO TOTAL	TOTAL	CONCRETO POR M ²	AÇO VERGALHÃO POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	3,43E+02	3,71E+02	7,14E+02	8,16E+00	8,85E+00	1,70E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	3,05E+04	7,99E+04	1,10E+05	7,27E+02	1,90E+03	2,63E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	6,04E+03	3,05E+03	9,09E+03	1,44E+02	7,28E+01	2,17E+02
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,95E-04	1,51E-04	3,45E-04	4,64E-06	3,59E-06	8,23E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	9,83E+00	1,36E+01	2,34E+01	2,34E-01	3,24E-01	5,58E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	1,56E+00	3,18E+00	4,74E+00	3,71E-02	7,57E-02	1,13E-01
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	3,56E-01	2,03E+00	2,38E+00	8,48E-03	4,82E-02	5,67E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	1,31E+01	3,15E+01	4,46E+01	3,11E-01	7,51E-01	1,06E+00
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	3,05E+04	7,99E+04	1,10E+05	7,27E+02	1,90E+03	2,63E+03

Tabela 3 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-7,50 – Vão 7m”
Fonte: Autores (2017).

4.4 PONTE EM MADEIRA

4.4.1 Descrição da estrutura

O modelo de ponte em madeira utilizado neste trabalho trata-se do projeto proposto por Da Silva e Philippsen, 2015. A ponte é composta por vigas roliças nas longarinas e nos guarda-rodas e por madeira serrada no tabuleiro e no rodeiro. As peças são em madeira de floresta plantada da espécie '*Eucalyptus dunnii*' e são fixadas por pregos de aço.

O '*Eucalyptus dunnii*' tem se destacado no sul do Brasil pela forma das árvores, rápido crescimento, uniformidade dos talhões e por ser uma alternativa para regiões com grande ocorrência de geadas (CARPANEZZI, 1986).

A Figura 13 ilustra o modelo da ponte em madeira.

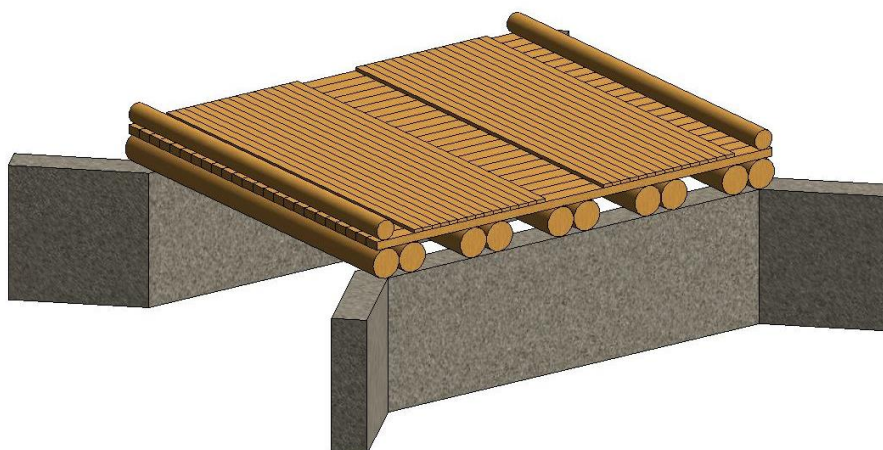


Figura 13 - Ponte em madeira
Fonte: Autores (2017).

4.4.2 Análise da estrutura

Como já referido anteriormente, a superestrutura da ponte em madeira é formada por madeira da espécie '*Eucalyptus dunnii*' e por aço em prego. Os gráficos abaixo exibem a quantidade de cada um desses materiais na estrutura para o vão de 7m.

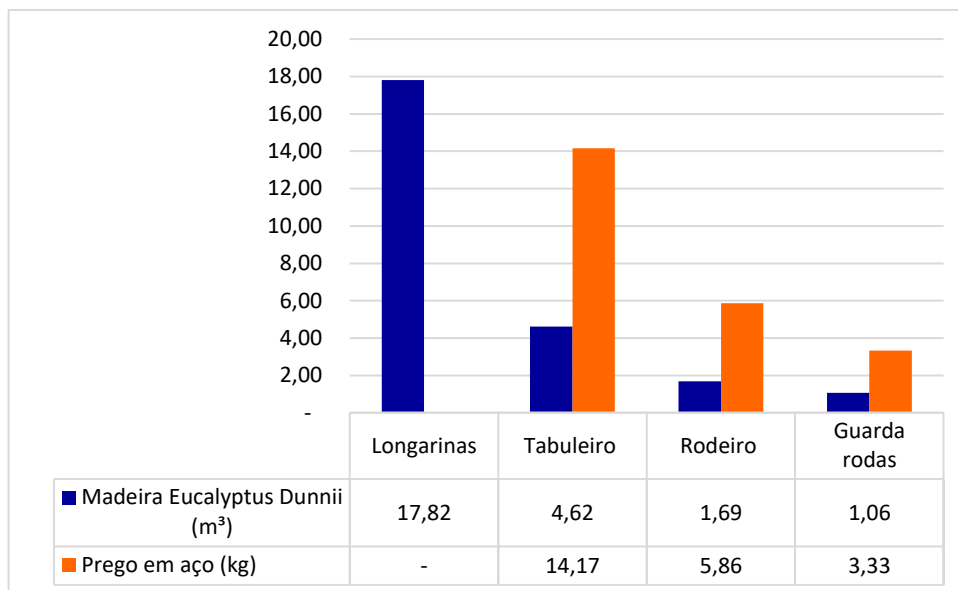


Gráfico 4 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira - Vão de 7m
Fonte: Autores (2017).

A partir do Gráfico 4, nota-se que o maior volume de madeira encontra-se nas longarinas, que são as peças mais volumosas da estrutura. O tabuleiro da ponte é o elemento que mais consome pregos para a fixação, considerando a quantidade em kg.

Na sequência, apresenta-se a quantidade total e por m² útil de madeira (em m³) e prego em aço (em kg) constituinte da ponte, conforme mostrado abaixo.

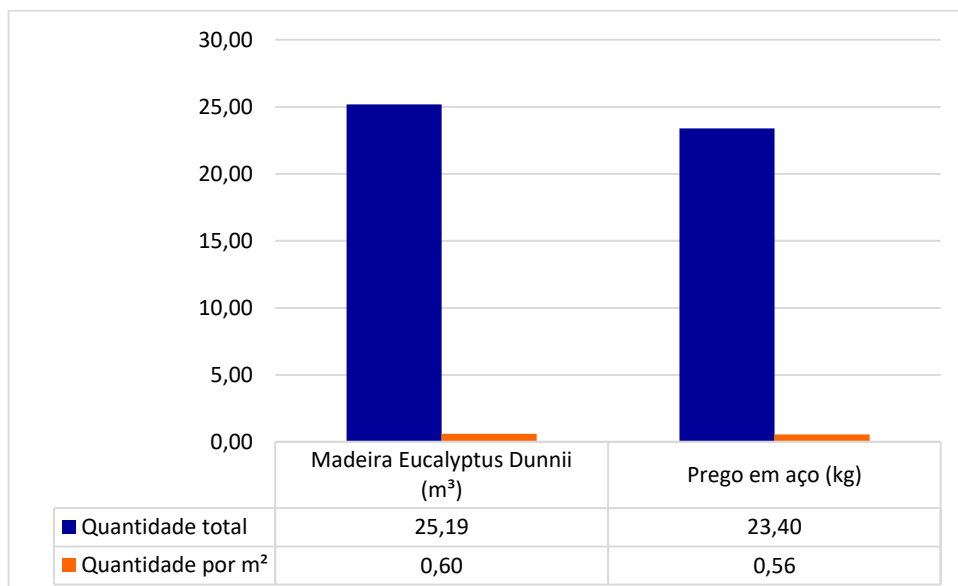


Gráfico 5 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em madeira - Vão de 7m
Fonte: Autores (2017).

Na continuação, foram analisados o preços dos materiais da ponte em madeira, conforme demonstra o Gráfico 6.

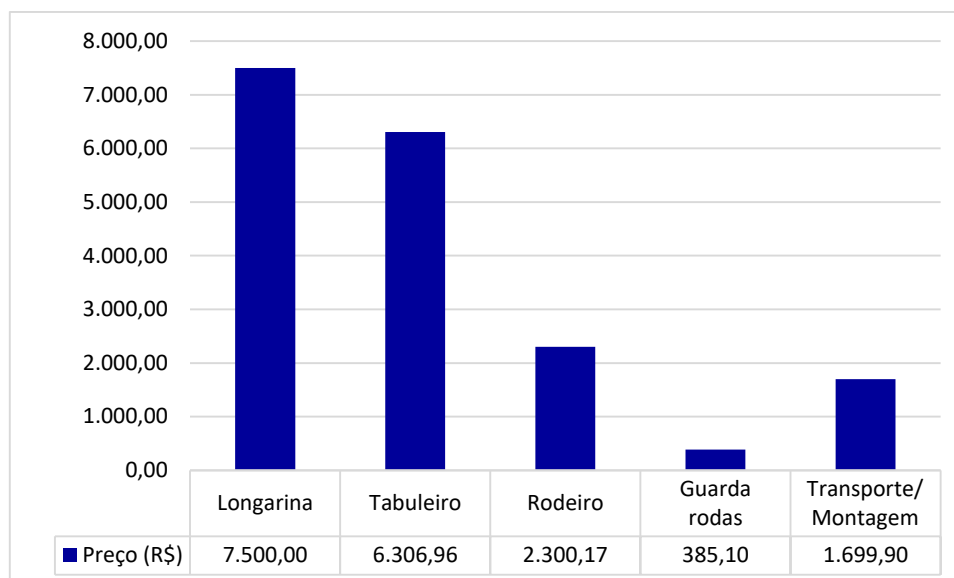


Gráfico 6 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em madeira – Vão de 7m - Com BDI 30%

Fonte: Autores (2017).

Verifica-se que na ponte de madeira, os maiores custos fazem referência aos elementos de maior volume, o que era esperado, uma vez que todos são compostos essencialmente por madeira.

A Tabela 4 ilustra os valores de impacto ambiental por material e por parâmetro contabilizando o total da superestrutura e também por m² útil. Vale lembrar que a multiplicação entre o valor do parâmetro é feito por kg de material. No caso da ponte em madeira, o quantitativo citado no Gráfico 4 exibe a madeira de *Eucalyptus Dunnii* em m³ apenas para facilitar a visualização. Para a obtenção dos resultados abaixo, utilizou-se a quantidade em kg.

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	AÇO VERGALHÃO TOTAL	MADEIRA TOTAL	TOTAL	AÇO VERGALHÃO POR M ²	MADEIRA POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	3,56E+00	2,75E+05	2,75E+05	8,51E-02	6,54E+03	6,54E+03
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	7,65E+02	3,44E+04	3,52E+04	1,83E+01	8,19E+02	8,38E+02
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	2,93E+01	-2,09E+04	-	7,00E-01	-4,97E+02	-
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,44E-06	2,22E-04	2,24E-04	3,45E-08	5,30E-06	5,33E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,30E-01	1,40E+01	1,41E+01	3,12E-03	3,33E-01	3,36E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	3,04E-02	2,24E+00	2,27E+00	7,28E-04	5,34E-02	5,41E-02
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	1,94E-02	1,27E+00	1,29E+00	4,64E-04	3,02E-02	3,06E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	3,02E-01	1,77E+01	1,80E+01	7,22E-03	4,22E-01	4,29E-01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	7,65E+02	3,44E+04	3,52E+04	1,83E+01	8,19E+02	8,38E+02

Tabela 4 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em madeira – Vão 7m
Fonte: Autores (2017).

4.5 PONTE MISTA AÇO/CONCRETO

4.5.1 Descrição da estrutura

Como já citado no item 3.1.1.1, o modelo de projeto para ponte mista constitui de um pré-dimensionamento realizado pelos autores, devido à ausência de projetos disponíveis na bibliografia dentro das medidas exigidas para a comparação com os outros dois modelos de ponte.

O projeto considera uma ponte composta por um tabuleiro de placas pré-fabricadas de concreto com espessura de 35cm, guarda-rodas pré-fabricados de concreto, duas vigas (perfis I laminados) em aço que funcionam como longarinas sustentando o tabuleiro e conectores de cisalhamento do tipo Stud Bolt, conforme mostra a Figura 14. Estes últimos fazem a ligação do tabuleiro com os perfis I. Os perfis I adotados foram o W 460x68 para o vão de 5m, o W 460x106 para o vão de 7m e o W 610x140 para o vão de 9 metros.



Figura 14 - Ponte mista aço/concreto
Fonte: Autores (2017).

4.5.2 Análise da estrutura

Os materiais que constituem a ponte mista apresentada neste trabalho são: concreto, aço vergalhão e perfis I em aço, nestes últimos estão inclusos os conectores de cisalhamento do tipo Stud Bolt. O quantitativo de materiais por elemento para este modelo de ponte, com vão de 7m, é exposto no Gráfico 7.

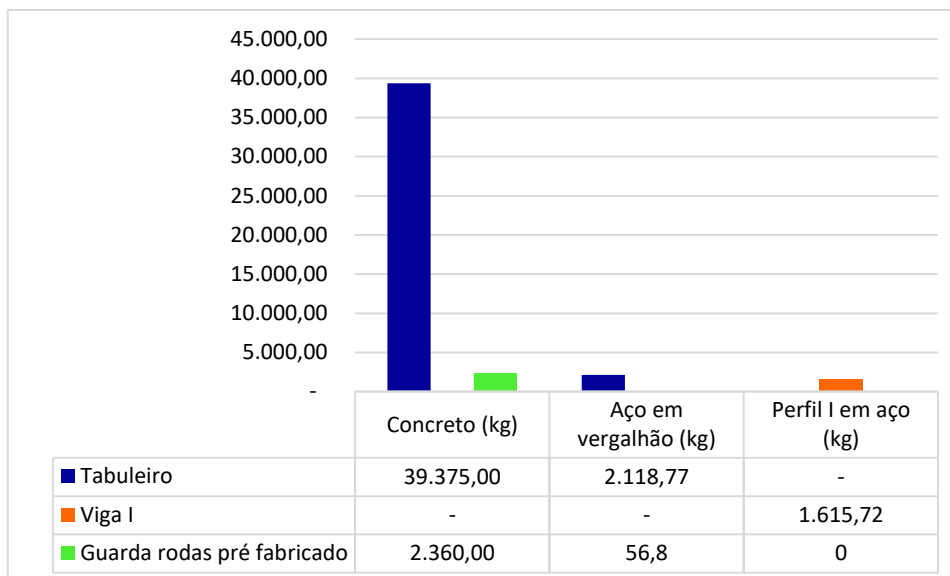


Gráfico 7 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto - Vão 7m
Fonte: Autores (2017).

Percebe-se, neste caso, a significativa quantidade de concreto em relação ao aço, tanto em vergalhão, quando em perfil, na estrutura da ponte. Isso deve-se ao fato de o maior elemento da estrutura (tabuleiro) ser constituído em sua maior parte por concreto. Além disso, uma peculiaridade deste projeto consiste no fato de que apenas duas vigas (perfis I) em aço suportam o tabuleiro, ao contrário da ponte em concreto pré-fabricado, que faz uso de 13 vigas pré-fabricadas, ou da ponte de madeira, que tem em sua estrutura um total de 10 longarinas de madeira roliça para receber os esforços transmitidos pelo tabuleiro.

O Gráfico 8 apresenta a quantidade total de materiais da ponte mista aço/concreto e por m² útil da estrutura.

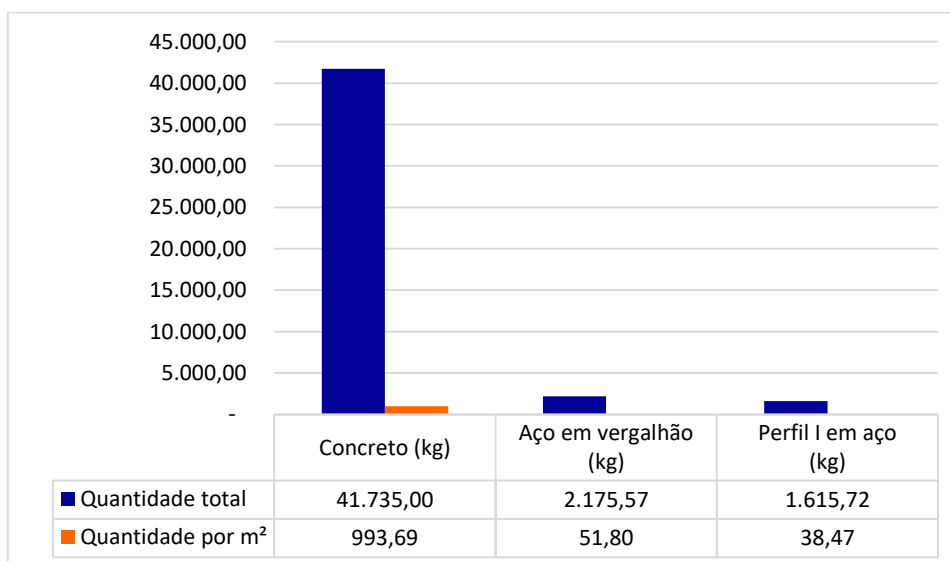


Gráfico 8 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte mista aço/concreto - Vão 7m
Fonte: Autores (2017).

Na sequência, o Gráfico 9 ilustra o preço por elemento da superestrutura da ponte mista aço/concreto para o vão de 7m.

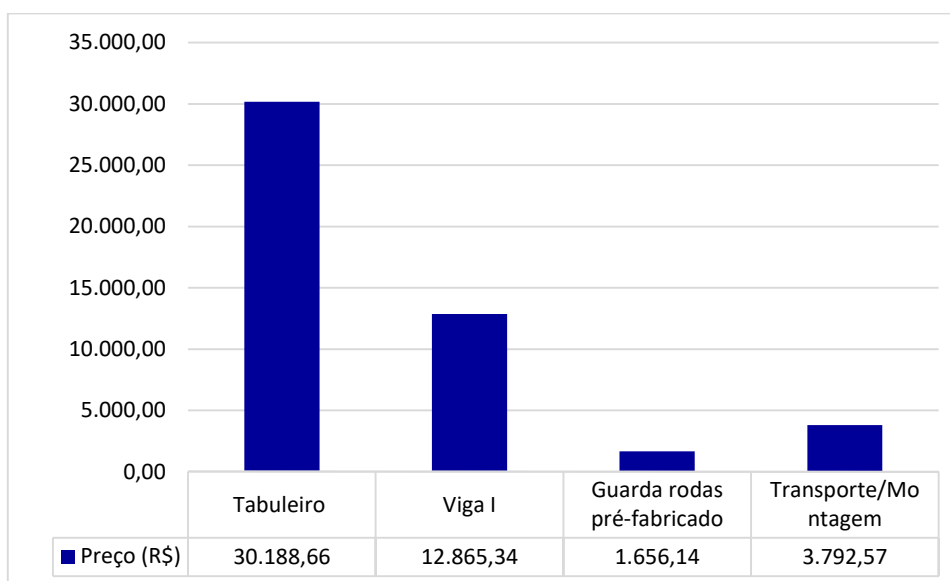


Gráfico 9 - Preço por elemento da superestrutura da ponte mista aço/concreto – Vão de 7m - Com BDI 30%
Fonte: Autores (2017).

Observa-se que o tabuleiro é o elemento da ponte de maior preço, representando mais de 60% do preço total da superestrutura da ponte mista aço/concreto.

A Tabela 5 traz o valor do impacto ambiental gerado por cada material da superestrutura da ponte mista em cada parâmetro. São apresentados também os valores do impacto ambiental em cada parâmetro gerados pela relação total de materiais da superestrutura e quanto essa quantia representa por m² útil.

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	AÇO EM PERFIL TOTAL	AÇO VERGALHÃO TOTAL	CONCRETO TOTAL	TOTAL	AÇO EM PERFIL POR M²	AÇO VERGALHÃO POR M²	CONCRETO POR M²	TOTAL POR M²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	1,87E+02	3,31E+02	2,60E+02	7,79E+02	4,46E+00	7,87E+00	6,20E+00	1,85E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	1,40E+04	7,11E+04	2,32E+04	1,08E+05	3,33E+02	1,69E+03	5,52E+02	2,58E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	9,23E+02	2,72E+03	4,59E+03	8,23E+03	2,20E+01	6,48E+01	1,09E+02	1,96E+02
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	8,72E-05	1,34E-04	1,48E-04	3,69E-04	2,08E-06	3,19E-06	3,53E-06	8,80E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	4,91E+00	1,21E+01	7,47E+00	2,45E+01	1,17E-01	2,89E-01	1,78E-01	5,83E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	7,85E-01	2,83E+00	1,19E+00	4,80E+00	1,87E-02	6,73E-02	2,82E-02	1,14E-01
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	2,99E-01	1,80E+00	2,71E-01	2,37E+00	7,12E-03	4,29E-02	6,45E-03	5,65E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	7,34E+00	2,81E+01	9,93E+00	4,53E+01	1,75E-01	6,68E-01	2,36E-01	1,08E+00
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	1,40E+04	7,11E+04	2,32E+04	1,08E+05	3,33E+02	1,69E+03	5,52E+02	2,58E+03

Tabela 5 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte mista aço/concreto - Vão de 7m
Fonte: Autores (2017).

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS

4.6.1 Quantitativo de material

Na continuação, para melhor comparar o peso das pontes foi elaborado um comparativo acerca da quantidade de material total e por m², em kg, por vão e modelo de ponte, conforme mostra o Gráfico 10.

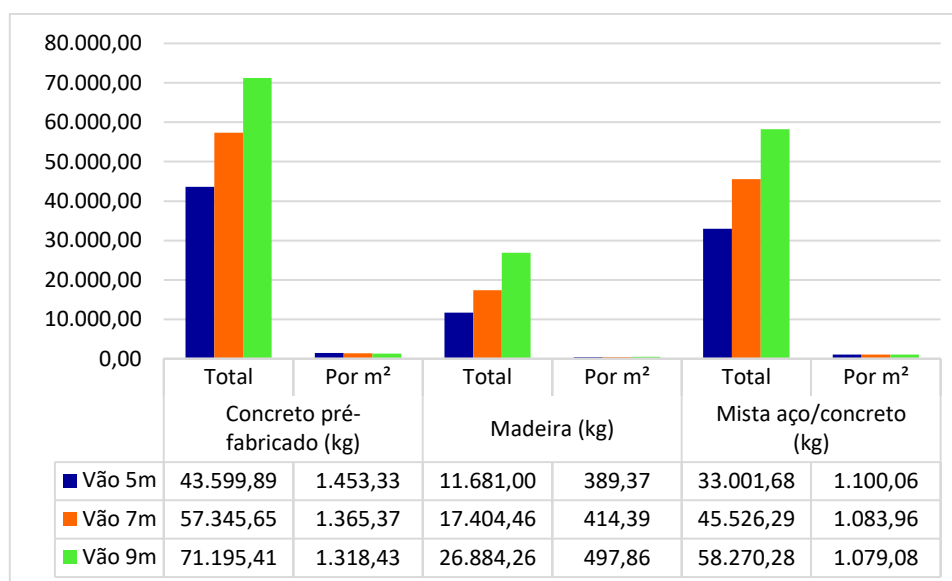


Gráfico 10 - Comparativo da quantidade de material total e por m² por vão e modelo de ponte
Fonte: Autores (2017).

Comparativamente, o peso das pontes é significativamente menor para pontes em madeira, representando menos de 40% do peso da ponte em concreto pré-fabricado em todos os vãos, e correspondendo a menos de 50% ao peso da ponte mista aço/concreto em todos os vãos.

Taylor et al. (1995) também identificaram nas pontes em madeira diferentes vantagens, como o baixo peso, a facilidade de fabricação e de instalação, com a possibilidade de ser pré-fabricada.

4.6.2 Desempenho ambiental

É possível identificar, por meio da Tabela 6, a estrutura com o melhor comportamento em cada parâmetro e a diferença percentual entre eles. No entanto, esta metodologia não permite que sejam estabelecidas relações entre as categorias (que agrupam certos parâmetros), pois a comparação de diferentes unidades de medida diferentes não é viável.

Em um estudo mais aprofundado, seria necessário realizar uma normalização de valores, de forma a converter todos os dados dos parâmetros para uma mesma unidade. Ainda, poderiam ser atribuídos diferentes pesos para cada parâmetro dentro de uma categoria, de acordo com a relevância subjetiva que possam ter dentro de determinada análise (CASTRO, 2012).

Sendo assim, este trabalho trata da comparação direta do impacto ambiental gerado por cada modelo de ponte em cada parâmetro estabelecido, ficando fora dos limites deste estudo a comparação feita em relação ao desempenho de cada ponte nas 3 categorias listadas (consumo de energia, emissões atmosféricas e esgotamento de recursos).

Tabela 6 - Comparativo ambiental dos modelos de ponte em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto

DIMENSÃO AMBIENTAL							
MODELO DE PONTE	CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	VÃO			
				5M	7M	9M	
CONCRETO PRÉ-FABRICADO	CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	5,20E+02	7,14E+02	9,24E+02	
		Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	7,89E+04	1,10E+05	1,45E+05	
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	6,73E+03	9,09E+03	1,16E+04	
		Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	2,53E-04	3,45E-04	4,44E-04	
		Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,70E+01	2,34E+01	3,05E+01	
		Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	3,40E+00	4,74E+00	6,21E+00	
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	1,68E+00	2,38E+00	3,17E+00	
		Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	3,19E+01	4,46E+01	5,86E+01	
	MADEIRA	CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	1,84E+05	2,75E+05	4,24E+05
			Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	2,37E+04	3,52E+04	5,41E+04
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)		Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	-1,40E+04	-2,08E+04	-3,22E+04	
		Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,50E-04	2,24E-04	3,46E-04	
		Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	9,50E+00	1,41E+01	2,18E+01	
		Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	1,53E+00	2,27E+00	3,50E+00	
ESGOTAMENTO DE RECURSOS		Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	8,67E-01	1,29E+00	1,98E+00	
		Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	1,22E+01	1,80E+01	2,78E+01	
MISTA AÇO/CONCRETO		CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	5,22E+02	7,79E+02	1,06E+03
			Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	7,58E+04	1,08E+05	1,43E+05
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	5,80E+03	8,23E+03	1,08E+04	
		Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	2,48E-04	3,69E-04	5,02E-04	
		Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,67E+01	2,45E+01	3,30E+01	
		Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	3,32E+00	4,80E+00	6,39E+00	
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	1,66E+00	2,37E+00	3,12E+00	
		Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	3,13E+01	4,53E+01	6,03E+01	
			Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	7,58E+04	1,08E+05	1,43E+05

Fonte: Autores (2017).

A partir da Tabela 6, pode-se perceber que em todos os parâmetros das três categorias analisadas, com exceção da energia renovável incorporada (ER), a ponte em madeira apresenta o melhor desempenho.

Para a categoria de consumo de energia, em que os parâmetros ER e ENR são expressos em mesma unidade e podem, dessa forma, ser agrupados, a ponte em madeira aparece como maior consumidora, seguida da ponte em concreto pré-fabricado e da ponte mista aço/concreto. A ponte em madeira apresenta o maior consumo de energia renovável incorporada (ER) seguida da ponte mista aço/concreto e da ponte em concreto pré-fabricado em todos os vãos analisados. Já no parâmetro ENR, a ponte em concreto pré-fabricado apresenta o maior consumo, seguida da ponte mista aço/concreto e da ponte em madeira. Embora o maior consumo de energia se mostre uma desvantagem ambiental para o caso da ponte em madeira, o maior consumo de fontes renováveis em detrimento das não renováveis deve ser considerado e analisado.

Na categoria emissões atmosféricas, a ponte em madeira apresenta melhores resultados em todos os parâmetros. Nos parâmetros GWP e POCP, o melhor, mediano e pior desempenho são relativos, respectivamente, à ponte em madeira, mista aço/concreto e ponte em concreto pré-fabricado. Já para os demais parâmetros (ODP, AP e EP), o segundo melhor desempenho em cada parâmetro é apresentado pela ponte em concreto pré-fabricado, ou pela ponte mista aço/concreto; esse comportamento varia de acordo com o vão a ser vencido, sendo a ponte em concreto pré-fabricado a que gera os menores impactos nos vãos 7 e 9m.

A ponte em madeira apresenta valores negativos de impacto ambiental no parâmetro potencial de aquecimento global (GWP) devido a capacidade de aprisionamento de CO₂ da madeira.

Da mesma forma, na categoria esgotamento de recursos a ponte em madeira apresenta melhor desempenho em todos os parâmetros. No parâmetro ENR, o segundo melhor comportamento é atribuído à ponte mista aço/concreto. Já no parâmetro ADP, o desempenho das pontes em concreto pré-fabricado e da ponte mista aço/concreto varia com o vão, sendo a ponte em concreto pré-fabricado a que apresenta menos impactos ambientais nos vãos 7 e 9m.

4.6.3 Desempenho econômico

O comparativo de preços das superestruturas dos 3 modelos de ponte considerados são apresentados no Gráfico 11 e na Tabela 7.

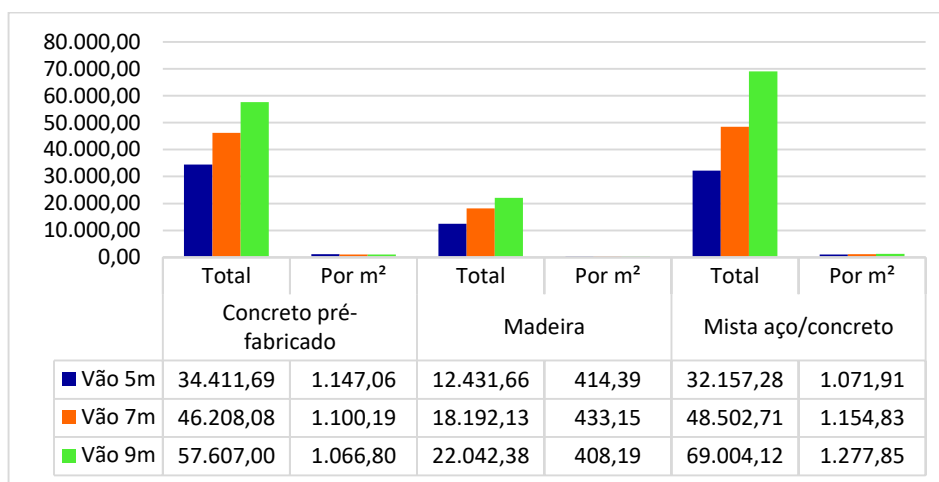


Gráfico 11 - Preços por vão e modelo de ponte
Fonte: Autores (2017).

Tabela 7 - Comparativo econômico dos modelos de ponte em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/concreto

DIMENSÃO ECONÔMICA				
MODELO DE PONTE	PREÇO (R\$)	VÃO		
		5M	7M	9M
Concreto pré-fabricado	Total	34.411,69	46.208,08	57.607,00
	Por m ²	1.147,06	1.100,19	1.066,80
Madeira	Total	12.431,66	18.192,13	22.042,38
	Por m ²	414,39	433,15	408,19
Mista aço/concreto	Total	32.157,28	48.502,72	69.004,12
	Por m ²	1.071,91	1.154,83	1.277,85

Fonte: Autores (2017).

Com relação à análise econômica, o preço da ponte em madeira é o menor comparativamente às demais pontes analisadas em todos os vãos. No entanto, comparando as pontes em concreto pré-fabricado e mista aço/concreto, percebe-se a influência do vão a ser vencido na determinação do modelo de menor preço, sendo, hora a ponte em concreto pré-fabricado a mais cara, hora a ponte mista aço/concreto, dependendo do vão.

4.6.4 Desempenho social

Em termos sociais, afirma-se a importância do respeito pelo ambiente e pela população. A criação de um espaço saudável, seguro e confortável envolve cinco

fatores essenciais: comportamento acústico, resistência ao fogo, proteção contra intempéries, vibração e integridade estrutural (CASTRO, 2012).

No entanto, assume-se a dificuldade de tratar dos componentes sociais de forma quantitativa, uma vez que questões como conforto e saúde da população são mais subjetivas e, dessa forma, de difícil comparação (CASTRO, 2012). Por esta razão, a análise social foi desconsiderada por este trabalho.

Sendo assim, não foi obtido um balanço sustentável dos comportamentos das estruturas, visto que o desempenho da construção engloba considerações ambientais, econômicas e também sociais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que a atividade construtiva gera grande impacto na sociedade, posto que contribui significativamente para a economia e provoca efeitos diretos no ambiente, este trabalho buscou trazer aos gestores subsídios com relação ao desempenho de pontes no contexto da construção sustentável.

Nesse sentido, foram elaborados comparativos com relação ao peso, à geração de impactos ambientais e ao preço de três projetos de pontes para estradas vicinais de materiais distintos, para três vãos estabelecidos.

Acerca do peso de todos os materiais utilizados em cada projeto de superestrutura, a ponte em madeira apresenta-se como a mais leve em todos os vãos, seguida da ponte mista aço/concreto e da ponte em concreto pré-fabricado. Em todos os casos analisados por este estudo, o aumento do vão aumentou a proporção kg/m². Contudo, em análises comparativas para tomada de decisão, aconselha-se que as características específicas para projeto sejam delimitadas e analisadas, uma vez que certos índices, como a quantidade de material, podem nem sempre variar proporcionalmente com o aumento da área útil.

Com relação à análise ambiental, os impactos ambientais podem ser identificados em materiais como o concreto, o aço e a madeira, quando se faz referência à construção de pontes. Pode-se dizer que a ponte em madeira exibe os melhores resultados em todos os parâmetros das categorias emissões atmosféricas e esgotamento de recursos naturais, contudo, implica em grande consumo de energia. Em relação as demais pontes (que em geral ficam atrás da ponte em madeira, exceto no parâmetro ER), hora a ponte em concreto pré-fabricado assume melhor desempenho, hora a mista aço/concreto; fato que varia com o vão estabelecido.

Na dimensão econômica, o preço da ponte em madeira é o menor em todos os vãos. Percebe-se, no entanto, que o preço das pontes em concreto pré-fabricado e mista aço/concreto varia com o comprimento do vão a ser vencido, ressaltando-se a importância de comparar projetos sempre considerando as características geométricas específicas.

Vale ressaltar ainda que neste estudo são considerados os processos que colaboram para a quantificação dos impactos ambientais associados à fase '*cradle to gate*', ou seja, desde a extração da matéria-prima até a fabricação do produto. Além

disso, os custos aqui relacionados referem-se aos custos de materiais, equipamento e mão de obra. Os custos relativos à fase de utilização, manutenção, demolição e deposição em aterro ou reciclagem, estão fora do limite deste trabalho. Dessa forma, a interpretação dos resultados deve ser feita tendo em vista as condições específicas deste estudo. Uma análise mais aprofundada, que leve em consideração a durabilidade das estruturas, ainda pode ser desenvolvida por trabalhos futuros.

Destaca-se ainda que esta metodologia de estudo não determina qual é a melhor estrutura ou o melhor processo em termos de rentabilidade e funcionalidade, mas sim, serve como ferramenta de apoio para a tomada de decisão acerca da construção sustentável, uma vez que a relevância dada a um ou outro indicador é relativa.

Por fim, entende-se que a elaboração de comparativos de projetos distintos constitui uma importante ferramenta para a tomada de decisão com vistas à construção sustentável. Conclui-se ainda que tal análise deve ser realizada dentro de cada contexto e época específica, devendo considerar sempre a harmonia entre os três pilares da sustentabilidade – as dimensões ambiental, econômica e social – ao longo do ciclo de vida do projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR ISO 14025**: Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais de Tipo III – Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro. 2013.

AHLBORN, T. **Sustainability**: for the concrete bridge engineering community. Perspective, p.16-8, 2008.

ALMEIDA, J. C. **Estudo do ciclo de vida de pontes rodoviárias**: sistema de apoio a análise comparativa dos custos ao longo do ciclo de vida de diferentes soluções para pontes rodoviárias de betão armado. 2013. 558f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Portugal: Universidade do Minho, 2013.

ANDERSON, J. **A Guide to Understanding the Embodied Impacts of Construction Products**. Londres: Construction Products Association. 2012.

ANDRADE, A. C.; SOUZA, U. E. L. **Diferentes abordagens quanto ao orçamento de obras habitacionais**: aplicação ao caso do assentamento da alvenaria. Anais... do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Meio Ambiente Construído–Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

ANDRADE, T. F. R. **Integração da análise ciclo de vida nas práticas de projetos de edifícios Andrade**. 2013. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

ARAÚJO JÚNIOR, I. T. **Investimentos em infra-estrutura e crescimento econômico no Brasil**. Economia e Desenvolvimento, Recife (PE), v. 5, n. 2, p. 161-188, 2006.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção**. Edições Ecopsy, 2006.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Avaliação da sustentabilidade da construção: desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas**. 2011.

BUFFENBARGER, J. Sustainable Bridges and Infrastructure (Part I). **Concrete Bridges Views**, n.76, may./jun. 2014.

_____. Sustainable Bridges and Infrastructure (Part II). **Concrete Bridges Views**, n.77, july./august. 2014.

CABRAL, E. C. C. **Proposta de metodologia de orçamento operacional para obras de edificação**. 1988. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro tecnológico.

CALIL JUNIOR, C.; GÓES, J. L. N. **Programa Emergencial das Pontes de Madeira para o Estado de São Paulo**. Minerva. São Paulo, 2014.

CARDOSO, H. R. T. **Avaliação do Ciclo de Vida de um Sistema Construtivo em Alvenaria Estrutural**. 2015. Tese (Mestrado em Sustentabilidade do Ambiente Construído) – Portugal, Universidade do Minho, 2015.

CARPANEZZI, A. A. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado do Paraná**. Embrapa Florestas-Documents (INFOTECA-E), 1986.

CASTRO, R. R. T. L. **O Peso da Estrutura: Influência da Estrutura na Forma Arquitectónica**. Muros Portantes versus Estruturas Porticadas. 2008. Porto: Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto.

CASTRO, R. R. T. L. **Análise da sustentabilidade de estruturas: aço vs betão**. 2012. 15f. Tese (Doutorado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Portugal: Universidade do Minho, 2012.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. **Sustainable Concrete Buildings**. Concrete, The Responsible Choice (publicação). 2010.

DA SILVA, F. J.; PHILIPPSEN, M. **Estudo e concepção de modelo geométrico e estrutural de ponte em vigas de madeira roliça de eucalipto para estradas vicinais da Região Sudoeste do Estado do Paraná**. Trabalho de conclusão de curso – Pato Branco, 2015.

DER. Departamento de Estradas de Rodagem. **Construção de Pontes Municipais**. Especificações técnicas, projetos tipo e montagem. 1999.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de projeto de obras-de-arte especiais**. Rio de Janeiro, 1996.

DU, G. et al. **Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs**. Int J Life Cycle Assess, n.19, p.1948–1964, 2014.

EICK, G. **Viabilidade econômica e financeira de uma pequena central hidrelétrica no Brasil**. Dissertação de Graduação – Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. **Introdução às Pontes de Concreto Armado**. São Carlos. 2009.

ELLER, P. R.; DE PAULA, G. D.; FERREIRA, W. G. **Pré-Dimensionamento de Vigas Mistas de Aço e Concreto para Pontes de Pequeno Porte**. Engenharia Estudo e Pesquisa. v. 11 - n. 1 - p. 15-26 - jan./jun. 2011.

EUROPEAN CONCRETE PLATFORM. **Sustainable Benefits of Concrete Structures**. Bruxelas: European Concrete Platform ASBL. 2009.

FERNANDES, A. L. G. Sustentabilidade das construções. **Construções para um futuro melhor – Reaproveitamento da água**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Construção Civil) – Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2009.

FREITAS, M. **Pontes: Introdução Geral - Definições**. São Paulo: [s.n.], 1978.

FURTADO, J. S. **Termos e conceitos relacionados ao Desenvolvimento Sustentável**. Outubro, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. Editora Atlas S.A., São Paulo, 2002.

KIBERT, C. J. Final Session of First International Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction. **Sustainable Built Environment**, v. 1, 1994.

KIKER, G. A. et al. **Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making**. Integrated environmental assessment and management, v. 1, n. 2, p. 95-108, 2005.

LIMA, J. L. P. **Custos na Construção Civil**. Niterói, 2000. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal Fluminense.

LOSSO, I, R. **Utilização das características geométricas da edificação na elaboração de estimativas preliminares de custos: estudo de caso em uma empresa de construção**. 1995.

MACHADO, L. R. **Pontilhões de madeira: substituição por pontes em estruturas mistas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016.

MARCHETTI, O. **Pontes de Concreto Armado**. Editora Blucher. São Paulo, 2008.

MARSZAL, A. J. et al. **Zero Energy Building** – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 971-979, 2011.

MATEUS, R. **Novas Tecnologias Construtivas Com Vista à Sustentabilidade da Construção**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.

MILANI, C. J. **Subsídios para o diagnóstico das pontes do sistema viário do município de Pato Branco – Paraná**. 2010. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Passo Fundo - Universidade de Passo Fundo, 2010.

OLIVEIRA, J. A. C.; SPOSTO, Rosa Maria. **Ferramenta para avaliação da sustentabilidade ambiental na fase de execução de edifícios no Distrito Federal**. GEPROS. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas* – Ano 7, nº 2, abr-jun/2012, p. 11-21.

OTERO, J. A. **Análise paramétrica de dados orçamentários para estimativa de custos na construção de edifícios**. Dissertação de Mestrado – Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

PENADÉS-PLÀ, V. et al. A review of multi-criteria decision-making methods applied to the sustainable bridge design. *Sustainability*, v. 8, n.1295, p.1-21, 2016.

PFEIL, W. **Pontes em concreto armado**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

PFEIL, W.; PFEIL M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. 358p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, 2004.

POSSAN, M.; PENNA, P. **Estudo de vigas pré-fabricadas utilizadas em pontes nas estradas vicinais da região sudoeste do Paraná**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

PROTOCOLO DE MONTREAL, 2011. **O que o Brasil está fazendo para a proteção da Camada de Ozônio.** Disponível em: <<http://www.protocolodemontreal.org.br/eficiente/sites/protocolodemontreal.org.br/pt-br/site.php?secao=publicacoes&pub=211>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

RELATÓRIO BRUNDTLAND. **Nosso futuro comum.** Rio de Janeiro: FGV, 1991.

RESENDE, F. **Poluição atmosférica por emissão de material particulado: avaliação e controle nos canteiros de obras de edifícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 2007.

SAMPAIO, F. M. **Orçamento e custo da construção.** Hemus, 1991.

STUCCHI, F. R. **PEF-2404.** Pontes e grandes estruturas. Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. Departamento de Estruturas e Fundações (notas de aula). São Paulo, 2006.

TAC. **Transport Canada's Departmental Sustainable Development Strategy 2013-2014** – Planning Update. Transport Canada. Ed. 20 de março, 2015. Disponível em: <<http://www.tc.gc.ca/eng/policy/acs-sd-menu-3066.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

TAYLOR, S. E. et al. Portable glulam timber bridge design for low-volume forest roads. In: **Proceedings of the 6th International conference on low-volume roads**, p. 25-29, junho, 1995.

TORCELLINI, P. et al. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition.** National Renewable Energy Laboratory. [S.l.], p. 15. 2006.

UNITED NATIONS, FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol.** 2014. Disponível em: <http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php>. Acesso em: 20 mai. 2017.

APÊNDICE A

Análise da estrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-6,50” – Vão 5m.

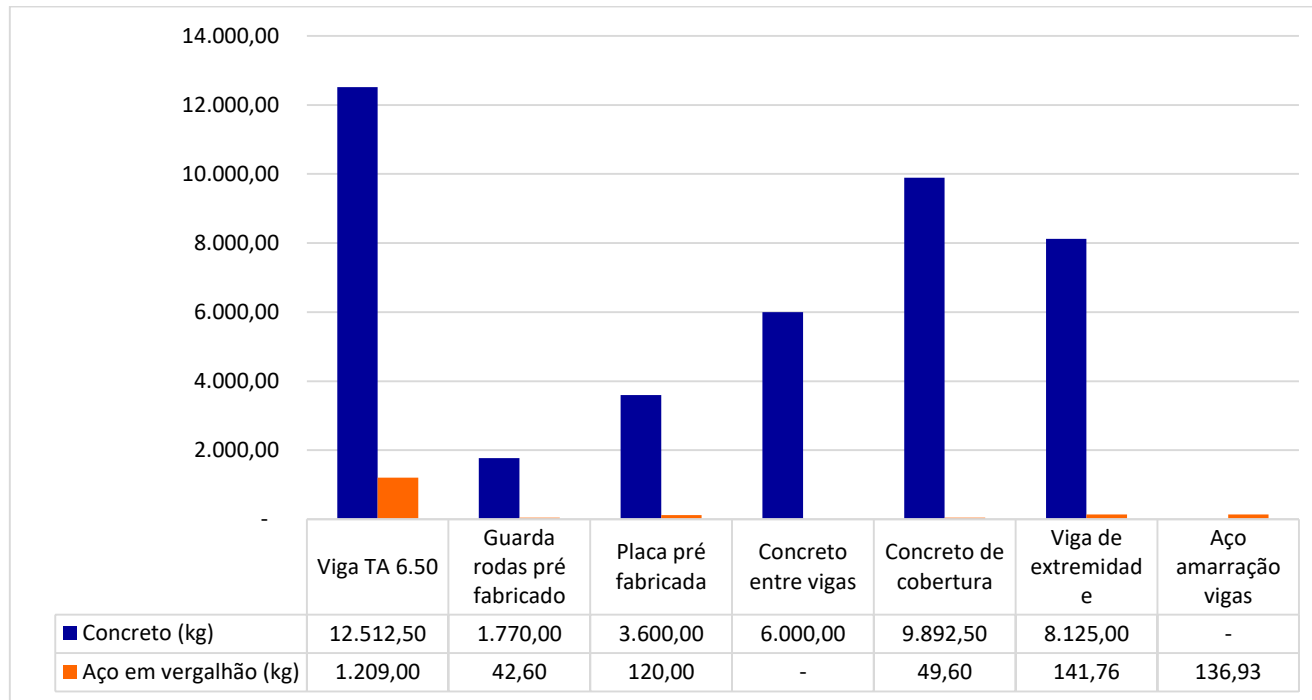


Gráfico 12 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-6,50” – Vão de 5m
Fonte: Autores (2017).

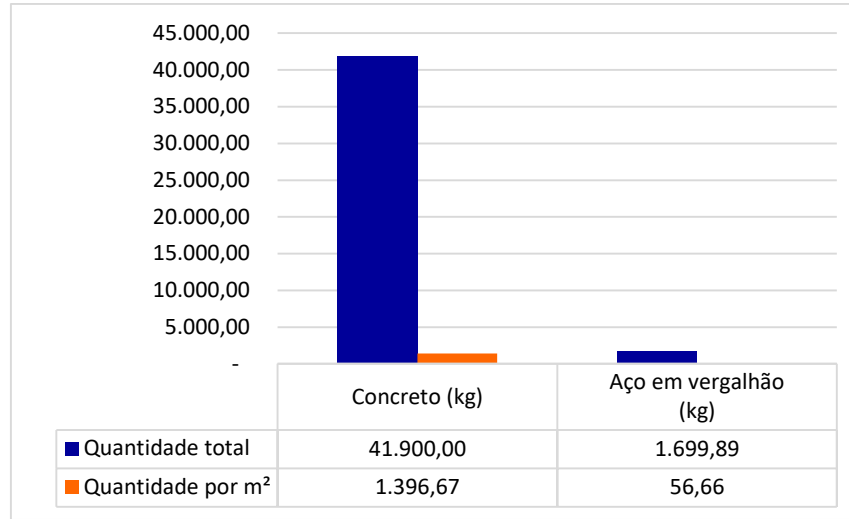


Gráfico 13 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-6,50” – Vão de 5m
Fonte: Autores (2017).

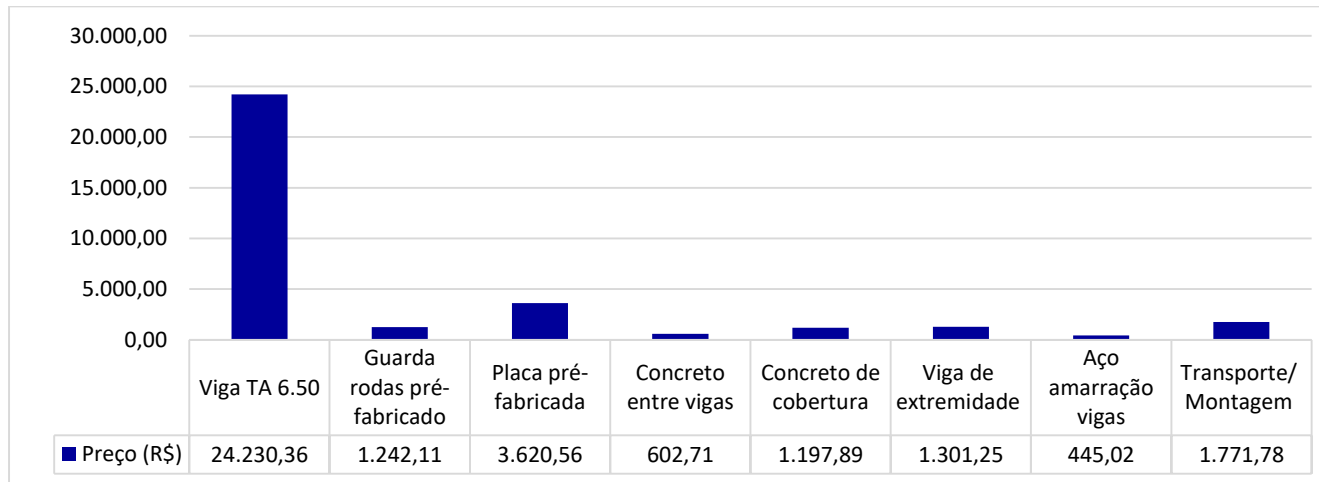


Gráfico 14 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-6,50” – Vão de 5m
Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	CONCRETO TOTAL	AÇO VERGALHÃO TOTAL	TOTAL	CONCRETO POR M ²	AÇO VERGALHÃO POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	2,61E+02	2,58E+02	5,20E+02	8,72E+00	8,62E+00	1,73E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	2,33E+04	5,56E+04	7,89E+04	7,77E+02	1,85E+03	2,63E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	4,61E+03	2,12E+03	6,73E+03	1,54E+02	7,09E+01	2,25E+02
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,49E-04	1,05E-04	2,53E-04	4,96E-06	3,49E-06	8,45E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	7,50E+00	9,47E+00	1,70E+01	2,50E-01	3,16E-01	5,66E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	1,19E+00	2,21E+00	3,40E+00	3,97E-02	7,37E-02	1,13E-01
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	2,72E-01	1,41E+00	1,68E+00	9,06E-03	4,70E-02	5,61E-02
	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	9,97E+00	2,19E+01	3,19E+01	3,32E-01	7,31E-01	1,06E+00
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	2,33E+04	5,56E+04	7,89E+04	7,77E+02	1,85E+03	2,63E+03

Tabela 8 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-6,50" – Vão de 5m
Fonte: Autores (2017).

APÊNDICE B

Análise da estrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-9,50” – Vão 9m.

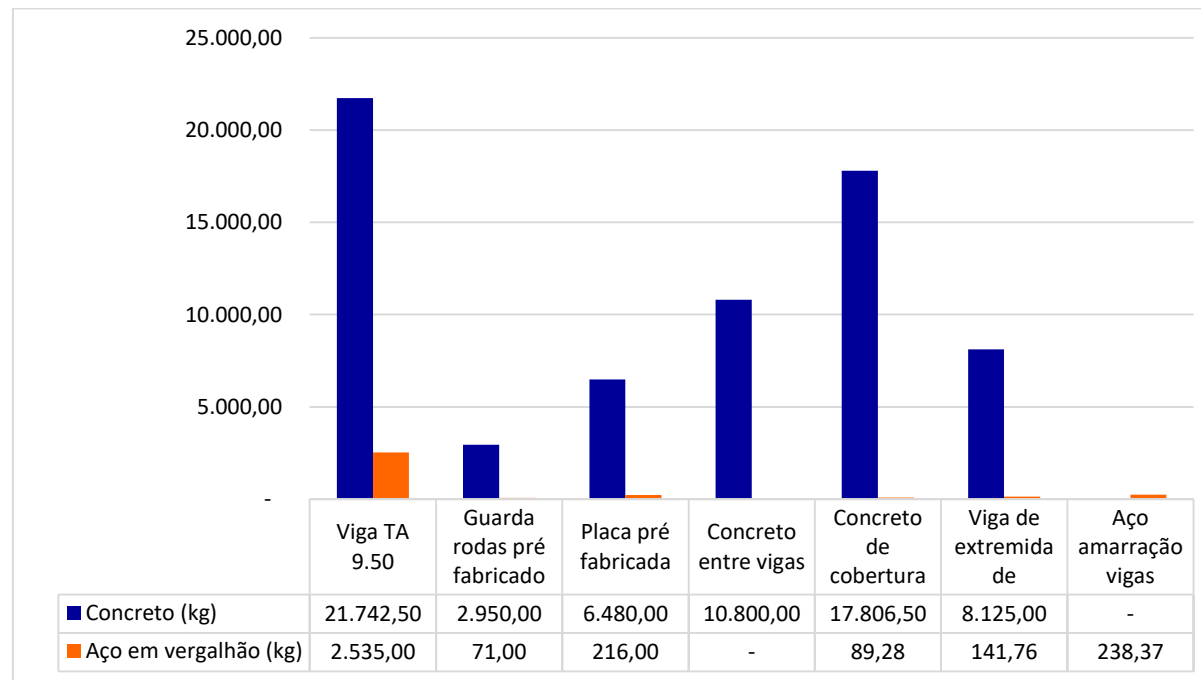


Gráfico 15 - Quantidade de material por elemento da ponte em concreto pré-fabricado com viga “TA-9,50” – Vão de 9m
 Fonte: Autores (2017).

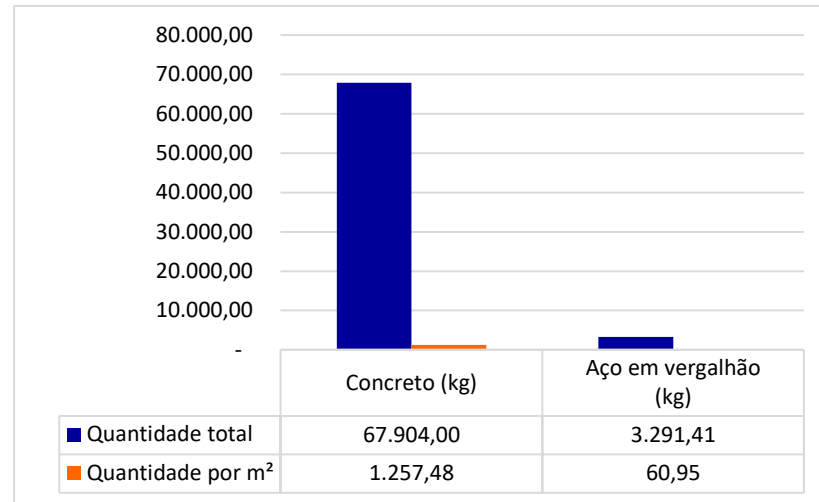


Gráfico 16 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50 – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

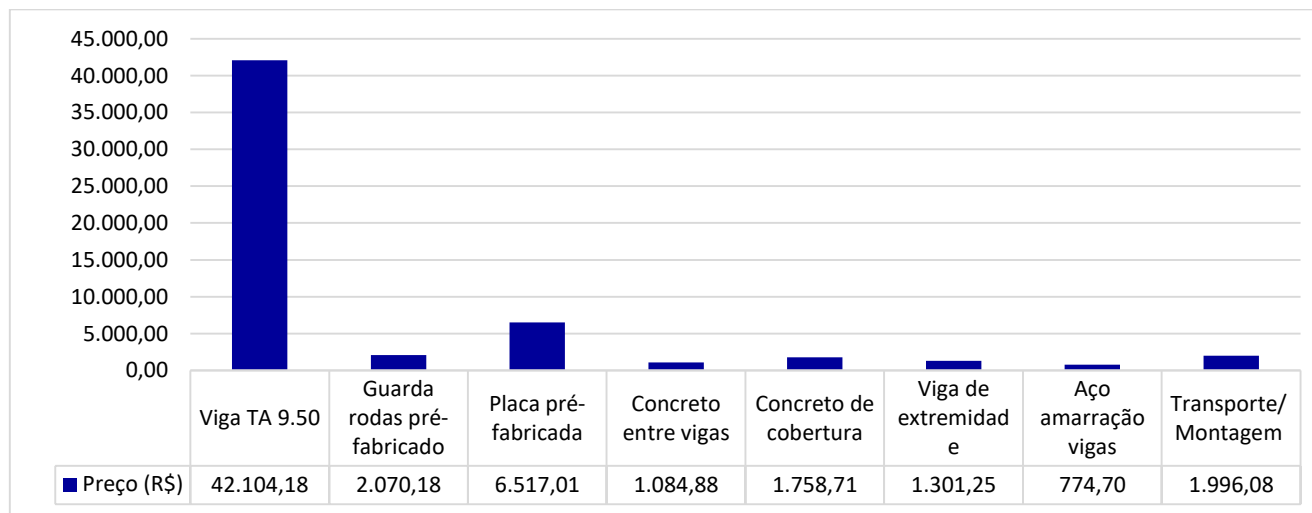


Gráfico 17 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50 – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	CONCRETO TOTAL	AÇO VERGALHÃO TOTAL	TOTAL	CONCRETO POR M ²	AÇO VERGALHÃO POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	4,24E+02	5,00E+02	9,24E+02	7,85E+00	9,27E+00	1,71E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	3,78E+04	1,08E+05	1,45E+05	6,99E+02	1,99E+03	2,69E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	7,47E+03	4,11E+03	1,16E+04	1,38E+02	7,63E+01	2,15E+02
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	2,41E-04	2,03E-04	4,44E-04	4,46E-06	3,76E-06	8,22E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,22E+01	1,83E+01	3,05E+01	2,25E-01	3,40E-01	5,65E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	1,93E+00	4,28E+00	6,21E+00	3,57E-02	7,93E-02	1,15E-01
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	4,41E-01	2,73E+00	3,17E+00	8,16E-03	5,06E-02	5,87E-02
	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	1,62E+01	4,25E+01	5,86E+01	2,99E-01	7,87E-01	1,09E+00
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	3,78E+04	1,08E+05	1,45E+05	6,99E+02	1,99E+03	2,69E+03

Tabela 9 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em concreto pré-fabricado com viga "TA-9,50 – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

APÊNDICE C

Análise da estrutura da ponte em madeira – Vão 5m.

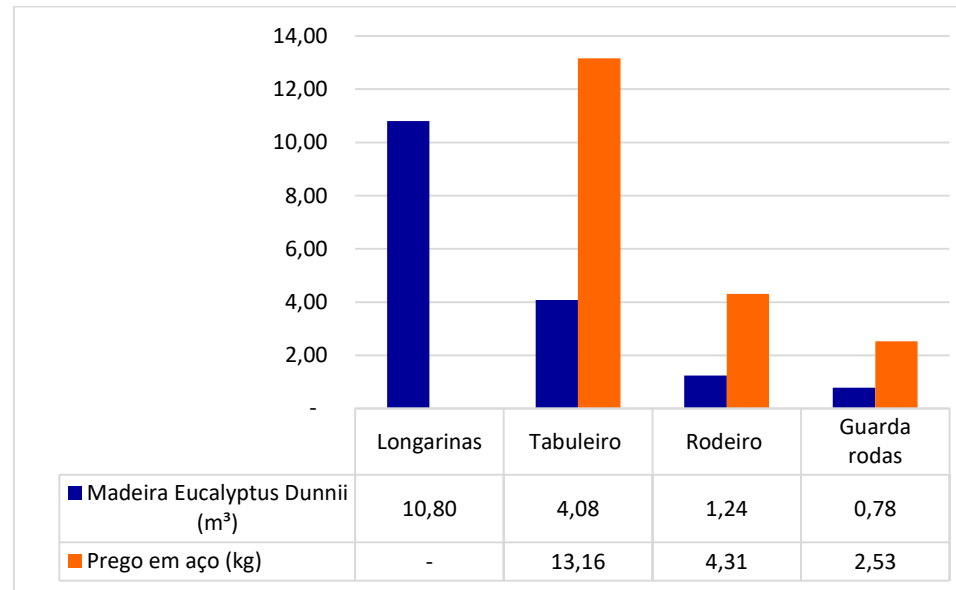


Gráfico 18 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

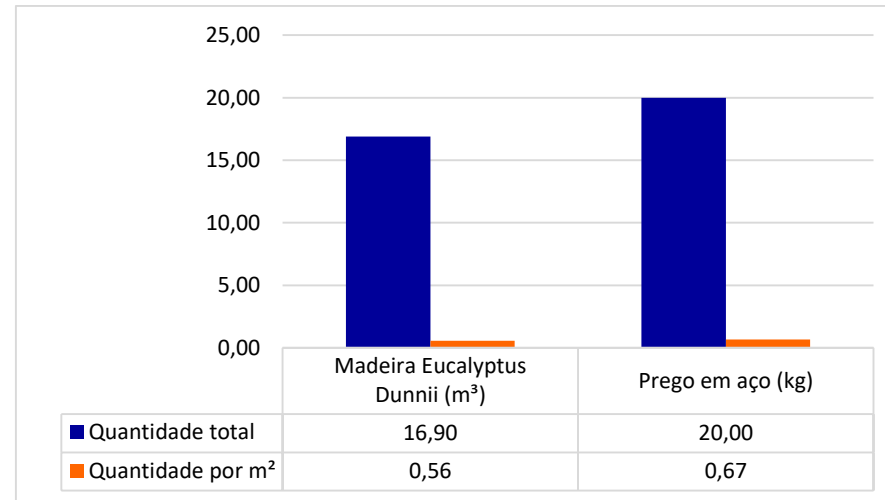


Gráfico 19 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em madeira – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

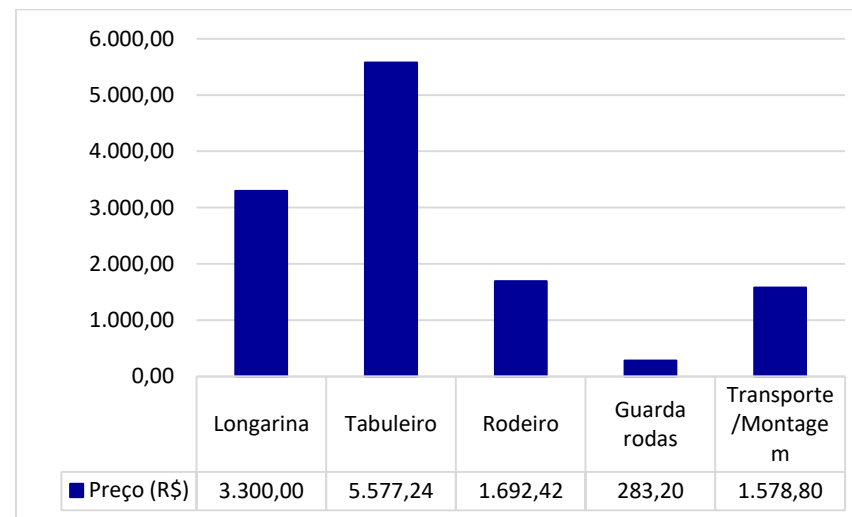


Gráfico 20 - Preço por elemento da superestrutura da ponte em madeira – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	AÇO VERGALHÃO TOTAL	MADEIRA TOTAL	TOTAL	AÇO VERGALHÃO POR M ²	MADEIRA POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	3,04E+00	1,84E+05	1,84E+05	1,02E-01	6,14E+03	6,14E+03
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	6,54E+02	2,31E+04	2,37E+04	2,19E+01	7,70E+02	7,92E+02
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	2,50E+01	-1,40E+04	-	8,38E-01	-4,66E+02	-
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,23E-06	1,49E-04	1,50E-04	4,13E-08	4,98E-06	5,02E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,11E-01	9,39E+00	9,50E+00	3,73E-03	3,13E-01	3,17E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	2,60E-02	1,50E+00	1,53E+00	8,71E-04	5,01E-02	5,10E-02
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	1,66E-02	8,50E-01	8,67E-01	5,55E-04	2,83E-02	2,89E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	2,58E-01	1,19E+01	1,22E+01	8,64E-03	3,96E-01	4,05E-01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	6,54E+02	2,31E+04	2,37E+04	2,19E+01	7,70E+02	7,92E+02

Tabela 10 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em madeira – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

APÊNCIDE D

Análise da estrutura da ponte em madeira – Vão 9m.

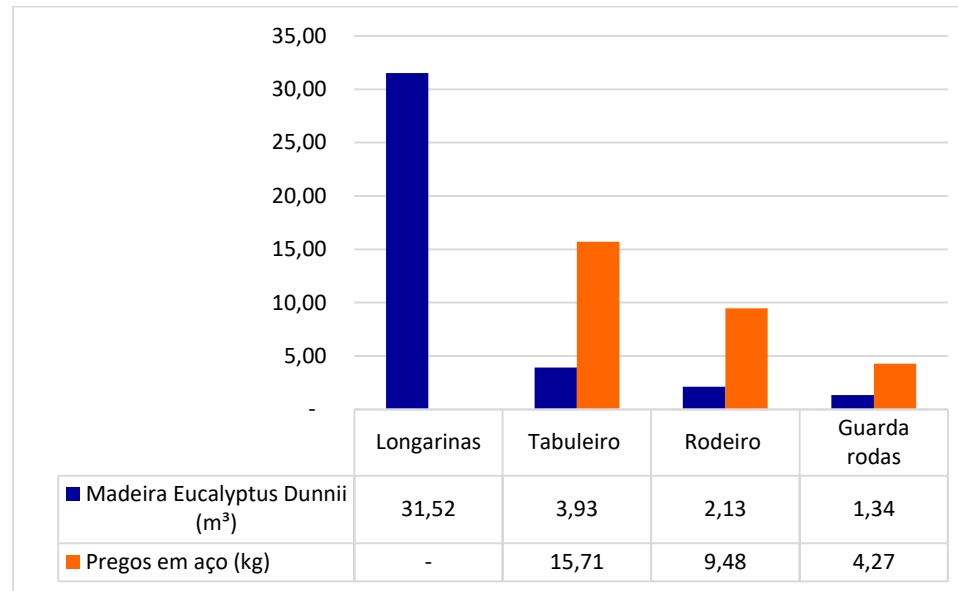


Gráfico 21 - Quantidade de material por elemento da ponte em madeira – Vão 9m
Fonte: Autores (2017).

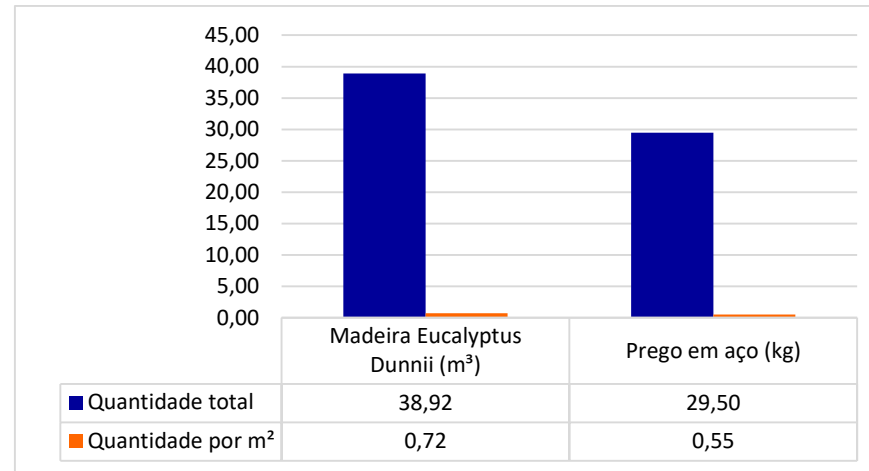


Gráfico 22 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte em madeira – Vão 9m
 Fonte: Autores (2017).

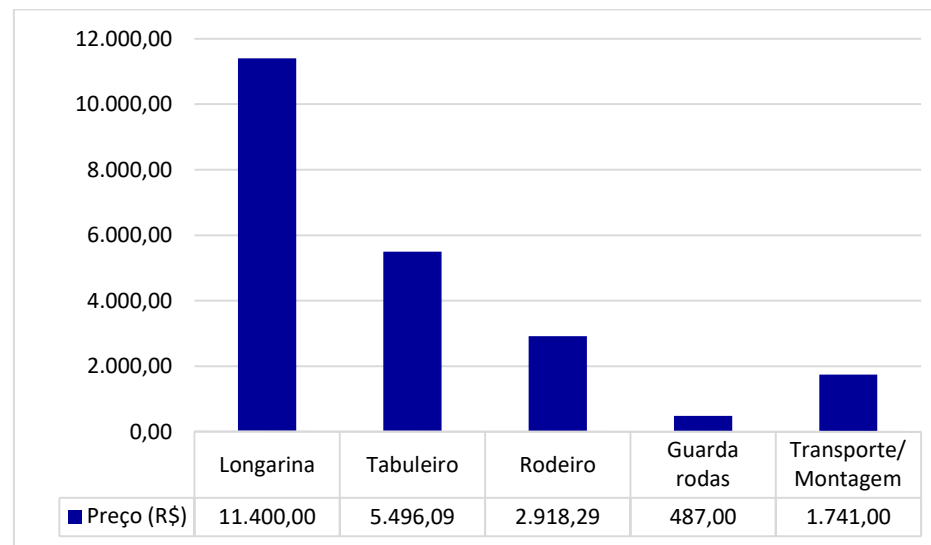


Gráfico 23 - Preço por elemento da superestrutura em madeira – Vão 9m
 Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	AÇO VERGALHÃO TOTAL	MADEIRA TOTAL	TOTAL	AÇO VERGALHÃO POR M ²	MADEIRA POR M ²	TOTAL POR M ²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	4,48E+00	4,24E+05	4,24E+05	8,36E-02	7,86E+03	7,86E+03
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	9,65E+02	5,32E+04	5,41E+04	1,80E+01	9,85E+02	1,00E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	3,69E+01	-3,22E+04	-	6,88E-01	-	-
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,82E-06	3,44E-04	3,46E-04	3,39E-08	6,37E-06	6,40E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	1,64E-01	2,16E+01	2,18E+01	3,06E-03	4,00E-01	4,03E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	3,84E-02	3,46E+00	3,50E+00	7,15E-04	6,42E-02	6,49E-02
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	2,45E-02	1,96E+00	1,98E+00	4,56E-04	3,63E-02	3,67E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	3,81E-01	2,74E+01	2,78E+01	7,10E-03	5,07E-01	5,14E-01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	9,65E+02	5,32E+04	5,41E+04	1,80E+01	9,85E+02	1,00E+03

Tabela 11 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte em madeira – Vão 9m
Fonte: Autores (2017).

APÊNDICE E

Análise da estrutura da ponte mista aço/concreto – Vão 5m.

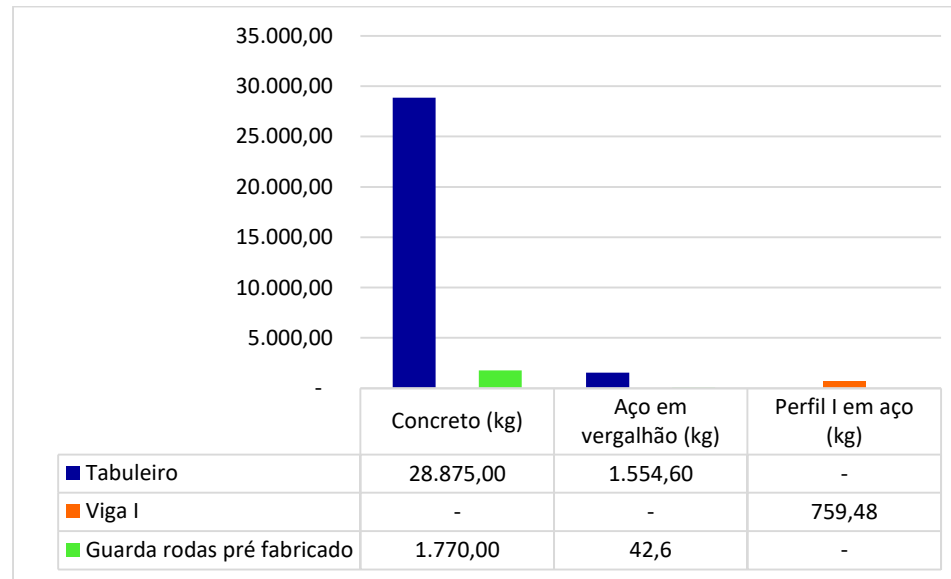


Gráfico 24 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

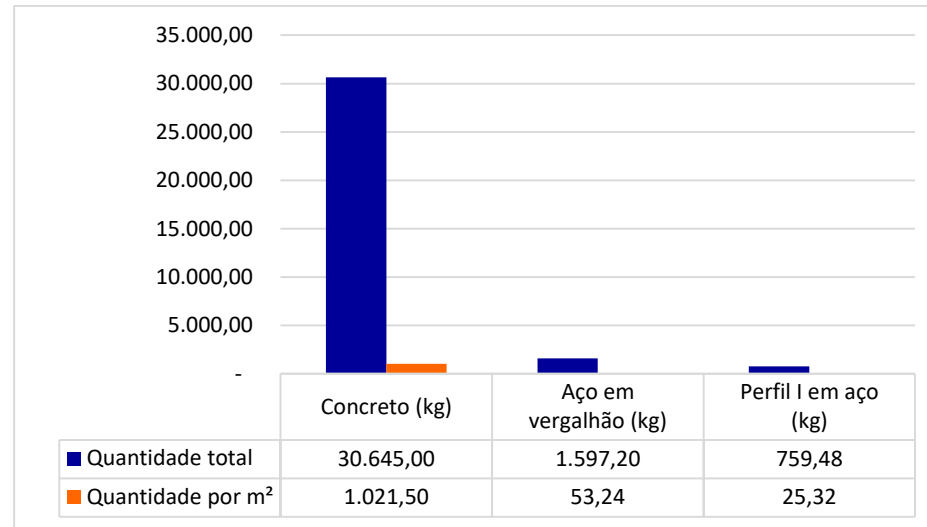


Gráfico 25 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte mista aço/concreto – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

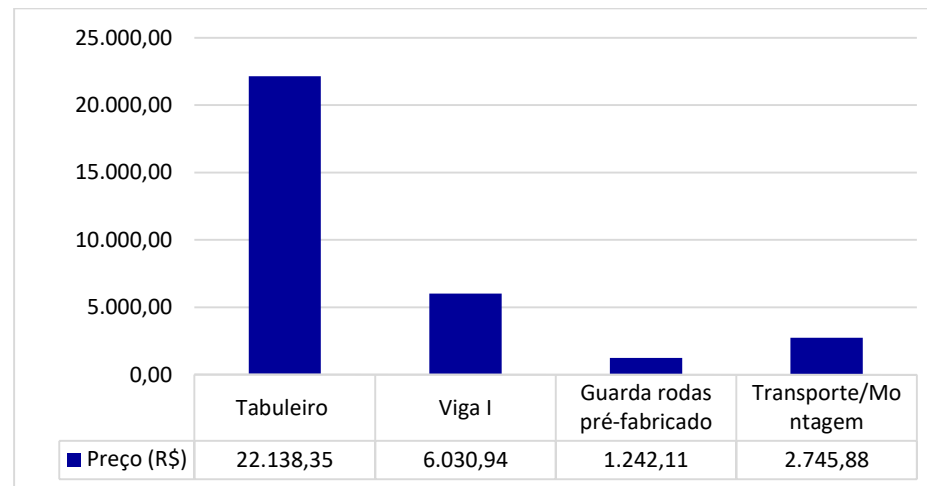


Gráfico 26 - Preço por elemento da superestrutura mista aço/concreto – Vão 5m
Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	ÇO EM PERFIL TOTAL	ÇO VERGALHÃO TOTAL	CONCRETO TOTAL	TOTAL	ÇO EM PERFIL POR M²	ÇO VERGALHÃO POR M²	CONCRETO POR M²	TOTAL POR M²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	8,81E+01	2,43E+02	1,91E+02	5,22E+02	2,94E+00	8,09E+00	6,37E+00	1,74E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	6,58E+03	5,22E+04	1,70E+04	7,58E+04	2,19E+02	1,74E+03	5,68E+02	2,53E+03
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	4,34E+02	2,00E+03	3,37E+03	5,80E+03	1,45E+01	6,66E+01	1,12E+02	1,93E+02
	Potencial de Destrução do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	4,10E-05	9,84E-05	1,09E-04	2,48E-04	1,37E-06	3,28E-06	3,63E-06	8,27E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	2,31E+00	8,90E+00	5,49E+00	1,67E+01	7,70E-02	2,97E-01	1,83E-01	5,56E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	3,69E-01	2,08E+00	8,70E-01	3,32E+00	1,23E-02	6,92E-02	2,90E-02	1,11E-01
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Etano equiv	1,41E-01	1,32E+00	1,99E-01	1,66E+00	4,68E-03	4,41E-02	6,63E-03	5,54E-02
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	6,58E+03	5,22E+04	1,70E+04	7,58E+04	2,19E+02	1,74E+03	5,68E+02	2,53E+03

Tabela 12 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte mista aço/concreto – Vão 5m

Fonte: Autores (2017).

APÊNDICE F

Análise da estrutura da ponte mista aço/concreto – Vão 9m.

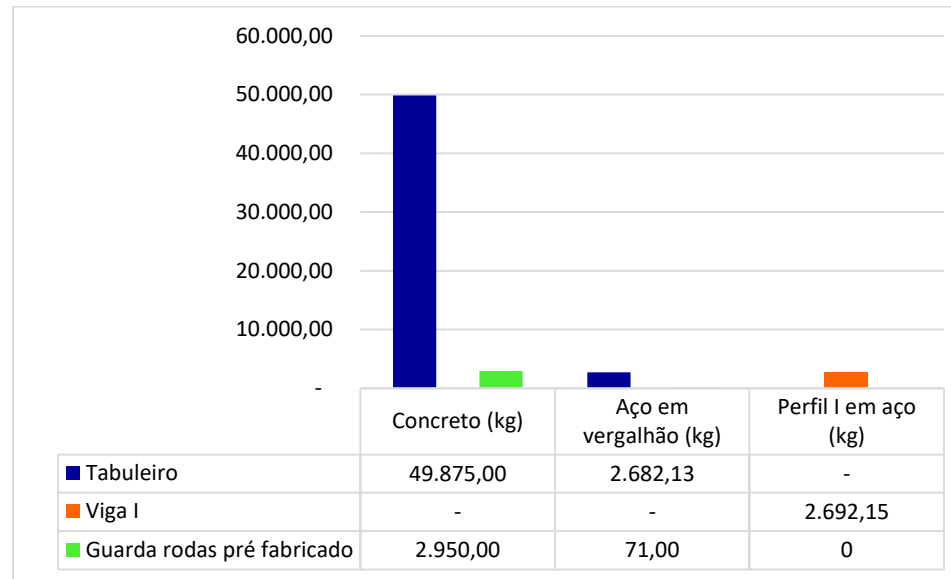


Gráfico 27 - Quantidade de material por elemento da ponte mista aço/concreto– Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

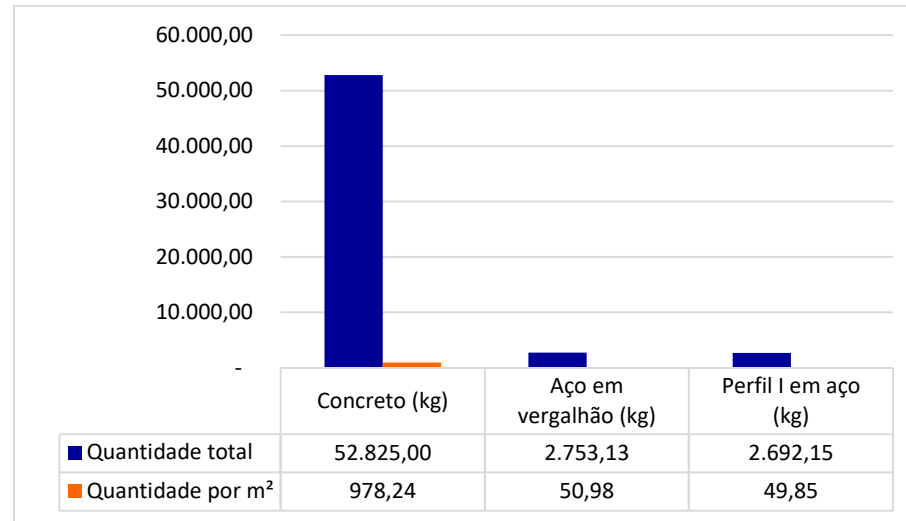


Gráfico 28 - Quantidade total e por m² de cada material da ponte mista aço/concreto – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

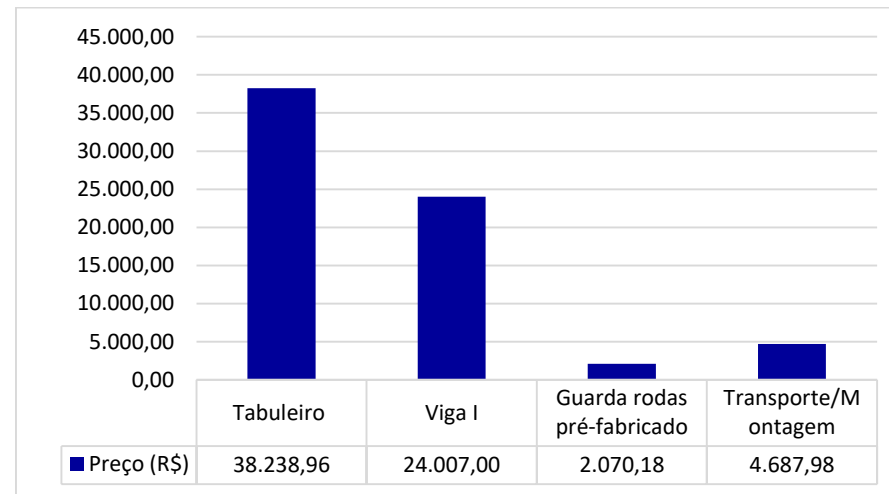


Gráfico 29 - Preço por elemento da superestrutura mista aço/concreto – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	AÇO EM PERFIL TOTAL	AÇO VEGVALHÃO TOTAL	CONCRETO TOTAL	TOTAL	AÇO EM PERFIL POR M²	AÇO VEGVALHÃO POR M²	CONCRETO POR M²	TOTAL POR M²
CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	3,12E+02	4,18E+02	3,30E+02	1,06E+03	5,78E+00	7,75E+00	6,10E+00	1,96E+01
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	2,33E+04	9,00E+04	2,94E+04	1,43E+05	4,32E+02	1,67E+03	5,44E+02	2,64E+03
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Kg CO ₂ equiv	1,54E+03	3,44E+03	5,81E+03	1,08E+04	2,85E+01	6,37E+01	1,08E+02	2,00E+02
	Potencial de Destruição do Ozônio (ODP)	Kg CFC 11 equiv	1,45E-04	1,70E-04	1,88E-04	5,02E-04	2,69E-06	3,14E-06	3,47E-06	9,31E-06
	Potencial de Acidificação (AP)	Kg SO ₂ equiv	8,18E+00	1,53E+01	9,46E+00	3,30E+01	1,52E-01	2,84E-01	1,75E-01	6,11E-01
	Potencial de Eutrofização (EP)	Kg (PO ₃) ₄ equiv	1,31E+00	3,58E+00	1,50E+00	6,39E+00	2,42E-02	6,63E-02	2,78E-02	1,18E-01
	Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP)	Kg Etano equiv	4,98E-01	2,28E+00	3,43E-01	3,12E+00	9,22E-03	4,23E-02	6,35E-03	5,78E-02
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos (ADP)	Kg Sb equiv	1,22E+01	3,55E+01	1,26E+01	6,03E+01	2,26E-01	6,58E-01	2,33E-01	1,12E+00
	Energia Não Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	2,33E+04	9,00E+04	2,94E+04	1,43E+05	4,32E+02	1,67E+03	5,44E+02	2,64E+03

Tabela 13 - Valores de impactos ambientais totais e por m² da ponte mista aço/concreto – Vão de 9m
Fonte: Autores (2017).

APÊNDICE G

Composição de custos das pontes em concreto pré-fabricado, madeira e mista aço/ concreto para os vãos de 5, 7 e 9m.

ITEM	FONTE	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UNID	QUANTID	R\$ UNIT	TOTAL
1 PONTE CONCRETO PRÉ-FABRICADO VÃO 5m							
1.1	Mercado		VIGA PRÉ FABRICADA TIPO "TA-6,50"; alma=11,5cm; h=35cm; aço=93kg	m3	5,01	4.841,23	24.230,36
1.2	Mercado		GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO	m3	0,71	1.754,39	1.242,11
1.3	Mercado		PLACA PRÉ-FABRICADA	m3	1,44	2.514,28	3.620,56
1.4	SINAPI	34439	AÇO AMARRAÇÃO VIGAS Aço CA-50 10mm dobrado e cortado	kg	136,93	3,25	445,02
1.5	SINAPI	1524	CONCRETO ENTRE VIGAS Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	2,4	251,13	602,71
1.6	SINAPI	1524	CONCRETO DE COBERTURA Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	3,96	251,13	993,72
	SINAPI	1342	Chapa de madeira para forma de concreto	m2	4,3	47,48	204,16
1.7	SINAPI	38464	VIGA DE EXTREMIDADE Concreto usinado bombeado Fck=25MPa	m3	3,25	261,60	850,20
	SINAPI	34449	Aço CA-50 6,3mm dobrado e cortado	kg	46,56	3,39	157,84
	SINAPI	34441	Aço CA-50 12,5mm dobrado e cortado	kg	95,20	3,08	293,22
1.8	Mercado		TRANSPORTE/ MONTAGEM Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
1.9	SINAPI/ TCPO	88245	MONTAGEM (MÃO DE OBRA) Armador	h	19,70	15,13	298,02
	SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador	h	19,70	11,36	223,76
						TOTAL	34.411,69
2 PONTE CONCRETO PRÉ-FABRICADO VÃO 7m							
2.1	Mercado		VIGA PRÉ FABRICADA TIPO "TA-7,50"; alma=11,5cm; h=35cm; aço=140kg	m3	6,85	4.841,23	33.167,27
2.2	Mercado		GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO	m3	0,94	1.754,39	1.656,14
2.3	Mercado		PLACA PRÉ-FABRICADA	m3	2,02	2.514,28	5.068,79
2.4	SINAPI	34439	AÇO AMARRAÇÃO VIGAS Aço CA-50 10mm dobrado e cortado	kg	187,65	3,25	609,86
2.5	SINAPI	1524	CONCRETO ENTRE VIGAS Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	3,36	251,13	843,80
2.6	SINAPI	1524	CONCRETO DE COBERTURA Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	5,54	251,13	1.391,21
	SINAPI	1342	Chapa de madeira para forma de concreto	m2	6,02	47,48	285,83
2.7	SINAPI	38464	VIGA DE EXTREMIDADE Concreto usinado bombeado Fck=25MPa	m3	3,25	261,60	850,2000
	SINAPI	34449	Aço CA-50 6,3mm dobrado e cortado	kg	46,56	3,39	157,84
	SINAPI	34441	Aço CA-50 12,5mm dobrado e cortado	kg	95,20	3,08	293,22
2.8	Mercado		TRANSPORTE/ MONTAGEM Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
2.9			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				

SINAPI/ TCPO	88245	Armador		h	23,93	15,13	362,08
SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador		h	23,93	11,36	271,86
						TOTAL	46.208,08
3	PONTE CONCRETO PRÉ-FABRICADO VÃO 9m						
3.1		VIGA PRÉ FABRICADA TIPO "TA-9,50"; alma=11,5cm; h=35cm; aço=195kg		m3	8,70	4.841,23	42.104,18
	Mercado						
3.2		GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO		m3	1,18	1.754,39	2.070,18
	Mercado						
3.3		PLACA PRÉ-FABRICADA		m3	2,59	2.514,28	6.517,01
	Mercado						
3.4		AÇO AMARRAÇÃO VIGAS					
	SINAPI	34439	Aço CA-50 10mm dobrado e cortado	kg	238,37	3,25	774,70
3.5		CONCRETO ENTRE VIGAS					
	SINAPI	1524	Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	4,32	251,13	1.084,88
3.6		CONCRETO DE COBERTURA					
	SINAPI	1524	Concreto usinado bombeado Fck=20MPa	m3	5,54	251,13	1.391,21
	SINAPI	1342	Chapa de madeira para forma de concreto	m2	7,74	47,48	367,50
3.7		VIGA DE EXTREMIDADE					
	SINAPI	38464	Concreto usinado bombeado Fck=25MPa	m3	3,25	261,60	850,2000
	SINAPI	34449	Aço CA-50 6,3mm dobrado e cortado	kg	46,56	3,39	157,84
	SINAPI	34441	Aço CA-50 12,5mm dobrado e cortado	kg	95,20	3,08	293,22
2.8		TRANSPORTE/ MONTAGEM					
	Mercado		Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
2.9		MONTAGEM (MÃO DE OBRA)					
	SINAPI/ TCPO	88245	Armador	h	28,16	15,13	426,13
	SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador	h	28,16	11,36	319,95
						TOTAL	57.607,00

*O preço das peças pré-fabricadas incluem o transporte até o local.

ITEM	FONTE	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UNID	QUANTID	R\$ UNIT	TOTAL
1	PONTE MADEIRA VÃO 5m						
1.1			LONGARINA				
	Mercado		Tora deq = 45cm	m	55	60,00	3.300,00
1.2			TABULEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	4,08	1.333,00	5.438,64
	Mercado		Prego 25x72	saco	14	9,90	138,60
1.3			RODEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	1,24	1.333,00	1.652,92
	Mercado		Prego 22x42	saco	5	7,90	39,50
1.4			GUARDA-RODAS				
	Mercado		Quadrado 15x15	m	5,5	45,00	247,50
	Mercado		Prego 24x86	saco	3	11,90	35,70
1.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				
	Mercado		Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
1.6			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/TCPO	88262	Carpinteiro	h	16,00	20,55	328,80
						TOTAL	12.431,66
2	PONTE MADEIRA VÃO 7m						
2.1			LONGARINA				
	Mercado		Tora deq = 55cm	m	75	100,00	7.500,00
2.2			TABULEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	4,62	1.333,00	6.158,46
	Mercado		Prego 24x66	saco	15	9,90	148,50
2.3			RODEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	1,69	1.333,00	2.252,77

	Mercado		Prego 22x42	saco	6	7,90	47,40
2.4			GUARDA-RODAS				
	Mercado		Quadrado 15x15	m	7,5	45,00	337,50
	Mercado		Prego 24x86	saco	4	11,90	47,60
2.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				
	Mercado		Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
	Mercado		Carreta	km	20	4,00	80,00
2.6			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/TCPO	88262	Carpinteiro	h	18,00	20,55	369,90
						TOTAL	18.192,13
3			PONTE MADEIRA VÃO 9m				
3.1			LONGARINA				
	Mercado		Tora deq = 65cm	m	95	120,00	11.400,00
3.2			TABULEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	3,93	1.333,00	5.238,69
	Mercado		Prego 23x54	saco	26	9,90	257,40
3.3			RODEIRO				
	Mercado		Madeira serrada	m3	2,13	1.333,00	2.839,29
	Mercado		Prego 22x42	saco	10	7,90	79,00
3.4			GUARDA-RODAS				
	Mercado		Quadrado 15x15	m	9,5	45,00	427,50
	Mercado		Prego 24x86	saco	5	11,90	59,50
3.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				
	Mercado		Caminhão munck	km	20	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	8	150,00	1.200,00
	Mercado		Carreta	km	20	4,00	80,00
3.6			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/TCPO	88262	Carpinteiro	h	20,00	20,55	411,00
						TOTAL	22.042,38

ITEM	FORTE	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	UNID	QUANTID	R\$ UNIT	TOTAL
1			PONTE MISTA AÇO/CONCRETO VÃO 5m				
1.1			TABULEIRO DE CONCRETO				
	Mercado		Placa pré-fabricada 1x6x0,30m	m3	11,55	1.916,74	22.138,35
1.2			VIGA EM AÇO				
	Mercado/SINAPI		Perfil W 460x68	kg	748,00	7,53	5.632,44
	Mercado		Conector tipo Stud Bolt	un	25,00	15,94	398,50
1.3			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/ TCPO	88245	Armador	h	93,28	15,13	1.411,27
	SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador	h	93,28	11,36	1.059,62
1.4			GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO				
	Mercado			m3	0,71	1.754,39	1.242,11
1.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				
	Mercado		Caminhão munck	km	20,00	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	1,50	150,00	225,00
						TOTAL	32.157,28
1			PONTE MISTA AÇO/CONCRETO VÃO 7m				
1.1			TABULEIRO DE CONCRETO				
	Mercado		Placa pré-fabricada 1x6x0,30m	m3	15,75	1.916,74	30.188,66
1.2			VIGA EM AÇO				
	Mercado/SINAPI		Perfil W 460x106	kg	1.590,00	7,53	11.972,70
	Mercado		Conector tipo Stud Bolt	un	56,00	15,94	892,64
1.3			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/ TCPO	88245	Armador	h	127,13	15,13	1.923,42
	SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador	h	127,13	11,36	1.444,15
1.4			GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO				
	Mercado			m3	0,94	1.754,39	1.656,14
1.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				

	Mercado		Caminhão munck	km	20,00	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	2,50	150,00	375,00
						TOTAL	48.502,71
1			PONTE MISTA AÇO/CONCRETO VÃO 9m				
1.1			TABULEIRO DE CONCRETO				
	Mercado		Placa pré-fabricada 1x6x0,30m	m3	19,95	1.916,74	38.238,96
1.2			VIGA EM AÇO				
	Mercado/SINAPI		Perfil W 610x140	kg	3040,00	7,53	22.891,20
	Mercado		Conector tipo Stud Bolt	un	70,00	15,94	1.115,80
1.3			MONTAGEM (MÃO DE OBRA)				
	SINAPI/ TCPO	88245	Armador	h	160,93	15,13	2.434,84
	SINAPI/ TCPO	88238	Ajudante de armador	h	160,93	11,36	1.828,14
1.4			GUARDA-RODAS PRÉ-FABRICADO	m3	1,18	1.754,39	2.070,18
	Mercado						
1.5			TRANSPORTE/ MONTAGEM				
	Mercado		Caminhão munck	km	20,00	2,50	50,00
	Mercado		Caminhão munck	h	2,50	150,00	375,00
						TOTAL	69.004,12

*Para os perfis W, cotou-se preço em mercado para o valor do produto e os demais encargos (corte, dobra, serviços complementares, transporte e mão de obra) foram estimados através da planilha "COMPOSIÇÕES DE SERVIÇOS DE EDIFICAÇÕES - COM DESONERAÇÃO Resolução Conjunta SEIL/PRED 002/2017 ref.: DEZEMBRO 2016 - vigência: FEVEREIRO 2017", considerando o serviço de estruturas metálicas.