

GUILHERME GIALORENÇO CAZÚ

**INDICADORES TÉCNICO-ECONÔMICOS DE VIGAS DE
MADEIRA, METÁLICAS E DE CONCRETO ARMADO**

SÃO CARLOS

2022

GUILHERME GIALORENÇO CAZÚ

**INDICADORES TÉCNICO-ECONÔMICOS DE VIGAS DE MADEIRA, METÁLICAS E
DE CONCRETO ARMADO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Centro Universitário Central Paulista, como
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.**

Orientador(a): Prof. M. Sc. Renato Silva Nicoletti

SÃO CARLOS

2022

Dedico este trabalho à minha família, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me apoiaram para a conclusão do curso de Engenharia Civil pelo Centro Universitário Paulista.

Agradeço a todos os professores que contribuíram durante todo o meu período acadêmico e me mostraram o caminho para se tornar um profissional capacitado.

Agradeço ao meu Professor orientador Renato por ter dado seu apoio e contribuição imensa para o desenvolvimento do presente trabalho e ter me guiado durante todo Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço a Professora Elaine por colaborar em meu Trabalho de Conclusão de Curso, e ter passado orientações relevantes para meu trabalho.

Agradeço a minha família por ter apoiado durante esses cinco anos, dando o suporte necessário para que eu pudesse realizar uma boa graduação e investir em minha formação.

Agradeço aos meus amigos e colegas que me incentivaram e torceram para que chegasse logo esse momento.

“No mundo haveis de ter aflições. Coragem!
Eu venci o mundo.”

JO 16, 33

São João

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	Justificativa	14
1.2.	Objetivo.....	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1.	Fundamentação teórica	15
2.2.	Estado da arte	17
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1.	Planilha orçamentária dos Serviços.....	24
3.1.1.	Vigas de Concreto Armado.....	24
3.1.2.	Vigas de Aço Laminado	27
3.1.3.	Vigas de Madeira.....	29
4.	RESULTADOS	34
4.1.	Capacidade Resistente do Momento Fletor.....	34
4.2.	Indicadores técnicos-econômicos.....	41
5.	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	45
6.	REFERÊNCIAS	46

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema de uma viga de concreto armado.....	11
Figura 2: Exemplo de viga metálica com perfil tipo “I”.....	12
Figura 3: Exemplo de viga de madeira com seção retangular.....	13
Figura 4: Resultados de momento fletor para vigas de concreto armado para vãos de 3 a 7m.	34
Figura 5: Resultados de momento fletor para vigas de aço laminado para vãos de 3 a 7m.	35
Figura 6: Resultados de momento fletor para vigas de madeira para vãos de 3 a 7m.	36
Figura 7: Resultados de momento fletor de todas as vigas para vãos de 3 a 7m.	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 3 m.	25
Quadro 2: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 4 m.	25
Quadro 3: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 5 m.	26
Quadro 4: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 6 m.	26
Quadro 5: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 7 m.	27
Quadro 6: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 3 m.	28
Quadro 7: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 4 m.	28
Quadro 8: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 5 m.	28
Quadro 9: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 6 m.	29
Quadro 10: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 7 m.	29
Quadro 11: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 3 m.	30
Quadro 12: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 4 m.	30
Quadro 13: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 5 m.	30
Quadro 14: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 6 m.	30
Quadro 15: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 7 m.	31
Quadro 16: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 3 m.	31
Quadro 17: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 4 m.	32
Quadro 18: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 5 m.	32
Quadro 19: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 6 m.	32
Quadro 20: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 7 m.	32
Quadro 21: Comparativo de momento fletor das vigas entre os respectivos vãos.	38

RESUMO

INDICADORES TÉCNICO-ECONÔMICOS DE VIGAS DE MADEIRA, METÁLICAS E DE CONCRETO ARMADO

Na construção civil, a combinação de elementos estruturais básicos forma o sistema estrutural de uma obra, que tem como função principal absorver e resistir esforços garantindo sua segurança e sustentação. É possível afirmar que os modelos especificados em obras são: o sistema de concreto armado, sistema de concreto protendido, sistema de estruturas metálicas, sistema estrutural de madeira e sistema de alvenaria estrutural. Tendo em vista os parâmetros que norteiam um projetista pelo sistema estrutural de uma obra, o presente trabalho objetiva comparar, nos contextos técnico e econômico, vigas de madeira, metálicas e de concreto armado entre vãos estabelecidos de 3 (três) a 4 (quatro) metros de comprimento. Foi levado em consideração a fundamentação teórica normativa para o dimensionamento de vigas de madeira, metálicas e de concreto armado e também pesquisas nacionais sobre o tema. Consistiu-se o pré-dimensionamento da seção transversal das vigas através dos vãos adotados e posteriormente foi calculado a capacidade resistente ao momento fletor de cada viga, em seguida, seus custos. Para os custos foram levados em consideração orçamentos realizados dentro do mês de março de 2022. Através dos resultados foram apresentados gráficos comparativos de cada tipo de viga. Considerando apenas os dados obtidos do presente trabalho, as vigas em concreto armado se mostram até 29,7% mais viáveis em relação ao custo por capacidade resistente ao momento fletor.

Palavras-chave: custo, viga, madeira, aço, concreto, eucalipto, resistência.

1. INTRODUÇÃO

Em uma edificação ou construção civil, a combinação de elementos estruturais básicos - tais como fundações, pilares, vigas e lajes - formam o sistema estrutural de uma obra, que por sua vez tem como função principal absorver e resistir esforços e, conseqüentemente, garantir sua segurança e sustentação. Por essas definições de sistema estrutural, é possível afirmar que os modelos geralmente especificados em obras são: o sistema de concreto armado, sistema de concreto protendido, sistema de estruturas metálicas, sistema estrutural de madeira e sistema de alvenaria estrutural.

No Brasil, há alguns sistemas estruturais predominantes e entre eles, o mais comum e utilizado é o sistema de concreto armado, amplamente difundido pelo país, em virtude da acessibilidade, tanto para realização da execução pela mão de obra encontrada, quanto para a facilidade na compra de materiais. No entanto, devido a outras vantagens que serão abordadas neste trabalho, torna possível encontrar muitas execuções em sistemas estruturais de madeiras e em sistemas estruturais de aço.

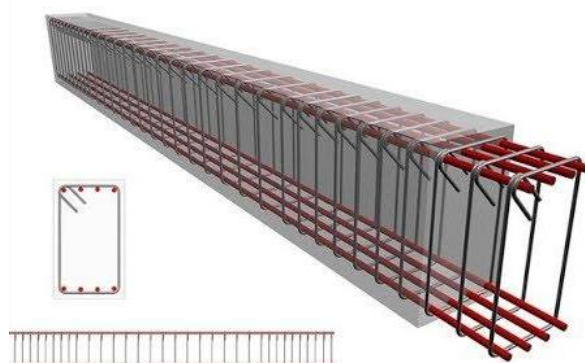
Para os três exemplos citados – concreto armado, madeira e aço -, há uma série de normas técnicas que definem e norteiam as referências técnicas que devem ser adotadas em cada um destes sistemas: os sistemas estruturais de concreto armado e protendido devem ter os parâmetros considerados conforme indicação da NBR 6118 (ABNT, 2014), intitulada “Projeto de estruturas de concreto”, sendo que também possuem requisitos gerais para a execução de estruturas de concreto pautadas e orientadas através da NBR 14931 (ABNT, 2004), cujo título é “Execução de estruturas de concreto”. Por sua vez, as estruturas de madeira têm seus projetos e definições fundamentados na NBR 7190 (ABNT, 1997). Por fim, as estruturas em aço e mistas de aço e concreto são norteadas pelas definições encontradas na NBR 8800 (ABNT, 2008), intitulada “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”.

Não existe definição de um sistema estrutural melhor para determinada obra, mas é possível definir qual sistema estrutural será mais adequado para cada tipo de situação. Para essa definição, alguns fatores são preponderantes para a escolha, tais como: a resistência oferecida pelo material do sistema estrutural escolhido, a

disponibilidade do material necessário dentro da região de aplicação, além do custo orçamentário final do sistema que pode, ou não, inviabilizar sua execução. Nesse contexto, uma forma de realizar uma análise inicial de viabilidade é com base nas vantagens e desvantagens que cada sistema construtivo pode oferecer.

Conforme já mencionado, o sistema estrutural mais usual no Brasil é o sistema de concreto armado. No quesito "vantagens", se situa sua grande capacidade de trabalhos a compressão, que suporta altas cargas, além de combinar razoavelmente bem com a tração devido às taxas de armadura que traz em sua composição - sistema que permite ser moldado em qualquer formato e de diversas formas. Além disso, a mão de obra para execução não exige muito conhecimento técnico se comparado aos demais sistemas construtivos citados. Por fim, mas não limitando-se às suas vantagens, vale mencionar sua fácil e baixa constância na necessidade de manutenção. Já como desvantagens, é importante ressaltar o grande volume de resíduos e descartes pouco reaproveitáveis que o sistema pode produzir, além de seu elevado peso próprio, que impossibilita a movimentação de grandes elementos pré-moldados e encarece as fundações necessárias para suportá-lo, fazendo com que o sistema necessite de um tempo de cura para conclusão que, conseqüentemente, eleva o tempo de execução diante dos demais métodos apresentados. A Figura 1 apresenta um esquema de viga de concreto armado.

Figura 1: Esquema de uma viga de concreto armado.

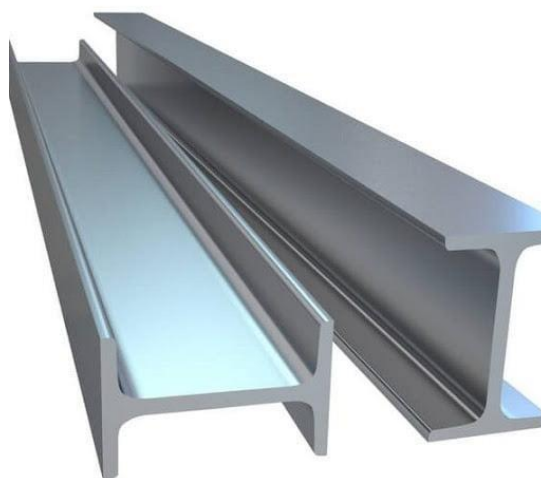


Fonte: Portal "The Constructor"¹.

¹ Disponível em: <<https://theconstructor.org/tips/rectangular-reinforced-concrete-beam-design/7472/>>. Acesso 13 abr. 2022.

Já as tradicionais e conhecidas estruturas metálicas trazem como vantagens sua alta capacidade de resistir aos trabalhos em tração, que auxilia no preenchimento de grandes vãos, além de serem pré-dimensionadas e de fácil movimentação, permitindo uma obra mais limpa e organizada. As estruturas metálicas possuem um menor peso específico se comparado ao sistema apresentado anteriormente, podendo reduzir em até 30% os custos com fundações. Além disso, suas estruturas podem ser reaproveitadas quando desmontadas, e seus resíduos podem ser reciclados quando impossibilitados de utilização. Sua ágil montagem também dispensa a necessidade de cura, fazendo com que o tempo de execução seja menor, e possibilitando a rápida liberação para uso do espaço. Entre suas desvantagens, é possível citar a sua alteração diante de situações de fogo, isso porque por não terem uma camada de revestimento, a ação direta do fogo contra o metal pode causar problemas quanto à sua fundição, dilatação e perda da capacidade de resistência. Nesse sentido, o sistema precisa de um tratamento específico ou uma pintura a fim de evitar corrosões, não sendo uma boa ideia de utilização para ambientes úmidos. Quando em perfis maiores, no entanto, o sistema se torna pesado, o que dificulta o seu transporte e acesso a determinados locais, exigindo a necessidade de equipamento especializado para elevação e movimentação. Por último, a necessidade de uma mão de obra mais especializada para execução de soldas e perfurações nos pontos corretos estão entre suas principais desvantagens. A Figura 2 apresenta um esquema de viga metálica.

Figura 2: Exemplo de viga metálica com perfil tipo “I”.



Fonte: Portal “Structuraco”².

² Disponível em: <<https://www.estructuraco.com/diferenca-entre-viga-i-e-w/>>. Acesso 1 abr. 2022.

As estruturas de madeira, por sua vez, bem como os demais sistemas apresentados, também possuem suas vantagens, como o fato de ser uma fonte natural, renovável e de ciclo relativamente curto, ou seja, de uma matriz é possível aumentar o número de mudas e, com isso, aumentar sua produção para uso constante e contínuo, em um período determinado de acordo com cada espécie. Em suas espécies, é possível encontrar madeiras mais e menos maleáveis, porém de fácil manuseio, o que possibilita uma versatilidade em formatos e seções. É importante lembrar que a madeira é um ótimo isolante, seja ele térmico, acústico ou elétrico, trazendo um ambiente aconchegante (quando tiver essa proposta) e seguro. Além disso, a madeira se mostra mais resistente quando exposta à situação de fogo, não diminuindo sua resistência. O fato de ser uma fonte natural, no entanto, também traz algumas desvantagens, entre elas, é importante considerar a vulnerabilidade quanto aos agentes externos, como as pragas, que podem se alimentar do material, fazendo com que ele perca sua funcionalidade, quando não tratado corretamente. O não tratamento do material faz com que a madeira responda às variantes do ambiente, como umidade, seca, aumento e diminuição de temperatura - mudanças climáticas que podem fazer com que seu formato e dimensões tenham variações, mesmo após sua aplicação. Apesar de versátil em seus formatos, quando considerado apenas em seções transversais, o sistema se limita em formas mais alongadas. A Figura 3 apresenta uma viga de madeira.

Figura 3: Exemplo de viga de madeira com seção retangular.



Fonte: Portal “Custo da Construção”³.

³ Disponível em: <<https://www.custodaconstrucao.com/app/produtos/vigota-6-x-12-cm-viga-de-madeira-nao-aparelhada-mad-regional>>. Acesso 1 abr. 2022.

Tendo em vista os parâmetros que vão nortear a decisão de um projetista pelo sistema estrutural de uma obra, o presente trabalho objetiva comparar, nos contextos técnico e econômico, vigas de madeira, metálicas e de concreto armado.

1.1. Justificativa

Nos dias atuais, o mercado da construção civil está cada vez mais competitivo, além disso o setor vem se deparando com constantes aumentos de preços devidos a instabilidades de relacionamentos globais e efeitos decorrentes da pandemia originada pelo COVID-19. Assim, é importante que as empresas se preocupem em reduzir os custos de seu produto. Uma das formas de fazer isso é aproveitar bem o potencial de cada material.

Além disso, um roteiro para a escolha do sistema construtivo, bem como os indicadores que o presente trabalho se propõe a desenvolver serão de grande valia para auxiliar o projetista em suas decisões.

1.2. Objetivo

Comparar, nos contextos técnico e econômico, vigas de madeira, metálicas e de concreto armado.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Desenvolver indicadores técnico-econômicos de vigas de madeira, metálicas e de concreto armado, relacionados com seu custo e capacidade resistente ao momento fletor;
- Propor requisitos e critérios que orientem o projetista na escolha pela viga mais adequada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura do presente trabalho está dividida em duas partes. A primeira consiste numa fundamentação teórica para o dimensionamento de vigas de madeira, metálicas e de concreto armado. Por sua vez, a segunda trata-se de um estado da arte das pesquisas nacionais sobre o tema.

2.1. Fundamentação teórica

De modo geral, vigas são elementos sujeitos à um carregamento distribuído ao longo de seu comprimento longitudinal, com a tendência de provocarem flexão. As vigas de madeira possuem seu dimensionamento norteado pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Nesse contexto, a principal análise consiste em verificar se as tensões normais solicitantes de cálculo à compressão ($\sigma_{c0,d}$) e à tração ($\sigma_{t0,d}$) são inferiores às resistências de cálculo à compressão ($f_{c0,d}$) e à tração ($f_{t0,d}$) paralela às fibras, respectivamente. As Equações (01) e (02) ilustram essas verificações.

$$\sigma_{c0,d} \leq f_{c0,d} \quad (01)$$

$$\sigma_{t0,d} \leq f_{t0,d} \quad (02)$$

Para encontrar os valores de resistência de cálculo a compressão ($f_{c0,d}$) e à tração ($f_{t0,d}$) paralela às fibras, foram utilizadas as Equações (04) e (05), onde foram considerados os valores iniciais encontrados no Anexo E, da NBR 7190 (ABNT, 1997), multiplicados pelo coeficiente de modificação (k_{mod}), que por sua vez é resultante da combinação entre classe de carregamento da estrutura, da classe de umidade admitida, e do eventual emprego de madeira de segunda qualidade – vide Equação (03).

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (03)$$

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{w0,d}}{1,4} \quad (04)$$

$$f_{t0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{w0,d}}{1,4} \quad (05)$$

Sabendo disso, a capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}) de vigas de madeira pode ser calculada pela Equação (06), multiplicando a força resultante de compressão (F_c) ou de tração (F_t) no regime elástico pelo braço de alavanca existente entre elas (z).

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = F_t \cdot z \quad (06)$$

Para calcular F_c e F_t , primeiramente foi necessário calcular a profundidade da linha neutra na seção transversal (x), medida do bordo superior da seção para baixo. Para tanto, deduziu-se a Equação (07).

$$x = \frac{f_{t0,d}}{(f_{c0,d} + f_{t0,d})} \cdot h \quad (07)$$

Em que h é a altura da seção transversal da viga.

Como a seção está em equilíbrio, resulta que $F_c = F_t$, as quais podem ser calculadas pela Equação (08).

$$F_c = F_t = f_{c0,d} \cdot b_w \cdot \frac{x}{2} \quad (08)$$

Em que b_w é a largura da seção transversal da viga.

Já a Equação (09) apresenta a formulação para o cálculo da distância entre as resultantes de compressão e de tração na seção transversal.

$$z = h - \left(\frac{x}{3}\right) - \left(\frac{(h-x)}{3}\right) \quad (09)$$

Por sua vez, para vigas metálicas, considerando que elas são compactas, travadas longitudinal e, portanto, não sujeitas a instabilidades, o M_{Rd} pode ser calculado, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), utilizando a Equação (10).

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (10)$$

Por sua vez, o momento de plastificação consiste no produto entre o módulo resistente plástico da seção sujeito à flexão (Z) e a tensão de escoamento do aço (f_y) – vide Equação (11).

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad (11)$$

Para vigas de concreto armado, levando em consideração a seção mínima exigida e mantendo as características de peças compactas, travadas longitudinal e, não sujeitas a instabilidades, o M_{Rd} pode ser calculado, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), utilizando a Equação (12).

$$M_{Rd} = (A_s \cdot \sigma_{sd}) \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (12)$$

Onde, a Área de armadura (A_s) foi considerada duas vezes a área mínima necessária, o Valor de cálculo de tensão (σ_s) tabelado para aço CA-50, (d) é a altura útil em momento fletor positivo, sendo a distância da face superior da viga até o eixo da última armadura e (x) é a posição da linha neutra.

2.2. Estado da arte

Na literatura nacional, estudando a viabilidade técnica e econômica de estruturas de madeira, destacam-se os trabalhos de Arantes (2017), Habowski (2018), Rimi (2018), Pereira (2020) e Borges *et al.* (2021).

Considerando que a indústria da construção civil no Brasil ainda se mostra rudimentar e artesanal, pouco modernizada e com baixa preocupação com as questões ambientais, Arantes (2017) defende as viabilidades técnicas em se construir projeto estrutural de edifício residencial em estrutura de madeira convencional como alternativa que substitui materiais e insumos que causam grande impactos no meio ambiente, e que ainda podem trazer mais agilidade no método construtivo.

Habowski (2018) realizou o estudo da viabilidade da utilização de madeira de reflorestamento como material de construção para casas de pequeno porte. O autor realizou uma comparação financeira quantitativa parcial entre a madeira e materiais como cimento, aço e alvenaria, considerando, ainda, o impacto ambiental de cada material. Habowski (2018) postulou que a madeira apresenta vantagens técnicas, econômicas e ambientais em relação aos outros sistemas para edificações de pequeno porte.

Já na análise sobre o potencial das técnicas construtivas industrializadas em madeira na habitação mínima e sua viabilidade em construções emergenciais proposta por Rimi (2018), além de discutir o uso da madeira industrializada em projetos de habitação mínima e sua aplicabilidade em construções emergenciais no Brasil e em diversos países com diferentes técnicas construtivas, comparou o emprego de painéis de Cross Laminated Timber (CLT) com o sistema de *wood frame* utilizado pela ONG TETO. Para Rimi (2018), estes modelos utilizados pela ONG TETO ainda são alternativas que se enquadram melhor nas circunstâncias emergenciais apresentadas em países latino-americanos.

Com o intuito de desmistificar a precariedade e fragilidade das construções estruturais utilizando madeira como matéria principal estrutural, Pereira (2020) defende a viabilidade técnica-econômica para construção de habitações de interesse social em *wood frame*. Em pesquisa dividida em duas partes, com referências bibliográficas do sistema *wood frame* e dos seus materiais utilizados, além do histórico habitacional no âmbito de interesse social comparado aos sistemas mais utilizados no Brasil, o autor, realize uma importante comparação de custos, orçamento e manutenção em um período de 50 anos de uma residência unifamiliar nos moldes usualmente utilizado nos Estados Unidos, adaptando o sistema *wood frame* com acabamentos que se enquadre na realidade brasileira e em alvenaria estrutural. De acordo com Pereira (2020), o método é compatível com o mercado atual mesmo tendo seu custo ligeiramente maior do que o método em alvenaria estrutural durante sua execução, e demonstra ser passível de redução de seus gastos no período, além de ter um baixo custo de manutenção.

Em busca do atendimento da grande e crescente demanda de necessidade habitacional, mais recentemente, Borges *et al.* (2021) compararam e analisaram a viabilidade técnica e econômica da utilização da madeira e do *Light Steel Frame* em estruturas de cobertura de residências unifamiliares, por meio de programas computacionais que verificaram os custos de cada método construtivo, o impacto do valor da mão de obra, o peso total de cada método construtivo e, por fim, o tempo de execução total para a conclusão das estruturas.

Quanto ao estudo da viabilidade técnica e econômica de estruturas de aço, destacam-se os trabalhos de Nakahara (2017), Luiz e Leal (2018), Cruz (2018), Santos Junior (2019), Amorim (2021).

Devido as diversidades de materiais e métodos construtivos, Nakahara (2017) realiza uma comparação entre as estruturas de concreto armado e metálicas, através de uma análise da viabilidade estrutural e econômica entre elas, ressaltando as características marcantes de cada, assim como vantagens e desvantagens, impactos ambientais e propriedades sustentáveis. Como conclusão da análise, Nakahara (2017) constatou que não existe um melhor tipo de estrutura, mas que as estruturas devem de adequar a necessidade do projeto.

Visando demonstrar as vantagens e desvantagens entre os sistemas construtivos de concreto armado e metálicas, Luiz e Leal (2018) dimensionaram um edifício utilizando ambos os métodos de construção, conforme a norma vigente de cada sistema construtivo e realizaram comparações entre os projetos. O estudo trouxe a perspectiva de que o método de estrutura metálica pode ser mais vantajoso em diversos aspectos comprado ao concreto armado, tendo como critérios as opções arquitetônicas, leveza da estrutura, financeiramente viável tendo no estudo de caso um custo total menor no edifício analisado.

No intuito de demonstrar uma nova necessidade de produzir sem agredir ou minimizar o impacto ao meio ambiente, Cruz (2018) desenvolve a analisada e viabilidade econômica, mercadológica, técnica e ambiental do sistema construtivo em estrutura metálica. Cruz (2018) concluiu que para edifícios de múltiplos andares estruturados em aço oferecem grandes vantagens e que seu uso é totalmente viável para edifícios residenciais.

Santos Junior (2019) estudou a viabilidade técnica e econômica de um edifício garagem em estrutura metálica, comparando com o sistema de concreto armado, dimensionando e elaborando o orçamento estrutural da edificação, onde concluiu a viabilidade técnica e econômica do sistema analisado.

Amorim (2021) verificou viabilidade econômica do uso do aço em estruturas de cobertura em comparação ao uso tradicional de madeira, uma vez que a madeira está se tornando escassa e elevando seus custos, tendo o mercado tentado utilizar madeira de reflorestamento. Concluiu que a longo prazo a estrutura metálica acelera a execução e gera menos resíduos, além de ser um material reciclável e ter um melhor custo-benefício.

Por fim, estudando a viabilidade técnica e econômica de estruturas de concreto armado, destacam-se os trabalhos de Costa (2019), Patrício (2019), Silva (2020), Reis (2021) e Rafael *et al.* (2021).

Com o propósito de comparar a viabilidade econômica entre os métodos de vigamento mais adequados, Costa (2019) levantou três hipóteses distintas de análise, diferenciando no tipo de viga os vãos adotados, a localização da viga e a espessura da laje, efetuando o dimensionamento de vigas em concreto armado e vigas mistas, a fim de obter o quantitativo e custos da obra relacionando material, mão de obra e equipamentos. Costa (2019), conclui que para grandes vãos a alternativa mais viável é a adoção de vigas mistas, e concreto armado para pequenos vãos.

Apresentando as principais diferenças de vigas em concreto armado e vigas protendidas, tanto nos aspectos técnicos como nos econômicos, Patrício (2019) abordada uma pesquisa comparando as duas técnicas mencionadas. De modo geral, Patrício (2019) conclui que para os vãos analisados, as vigas protendidas se mostraram mais vantajosas, porém não tão econômicas quanto as vigas em concreto armado.

Em busca do método construtivo que apresenta melhor viabilidade técnica e econômica, Silva (2020) realiza um estudo propondo a comparação do método construtivo em concreto armado com alvenaria de vedação, e o método construtivo em alvenaria estrutural com blocos de concreto, a fim de abranger as vantagens, desvantagens, e benefícios de cada sistema. Silva (2020) concluiu que a execução do edifício em alvenaria estrutural se mostrou mais viável economicamente.

Reis (2021) traz uma análise comparativa de custos orçamentários em concreto armado convencional e concreto protendido utilizados em lajes maciças, verificando qual sistema estrutural se apresenta mais vantajoso e considerando ainda a harmonia da fachada com o projeto arquitetônico. Reis (2021) indica que o concreto armado é mais econômico em lajes de pequenos vãos, comparado ao concreto protendido. E que o custo de mão de obra com a aplicação do concreto protendido o torna inviável.

Comparando os sistemas estruturais em concreto armado e alvenaria estrutural Rafael *et al.* (2021) já entendendo que ambos apresentam viabilidades técnicas, analisam a viabilidade de execução de uma edificação residencial, comparando os custos de materiais e mão de obra de cada sistema estrutural. Rafael *et al.* (2021)

concluem que o sistema em alvenaria estrutural apresentara uma maior economia para o tipo de edifício modelado comparado ao sistema em concreto armado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Visando alcançar o objetivo do presente trabalho, isto é, determinar indicadores técnico-econômicos de vigas bi apoiadas de madeira, metálicas e de concreto armado, primeiramente é preciso calcular sua capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}) e, em seguida, seu custo.

Assim, o indicador será o quociente entre o custo e o M_{Rd} , gerando um valor cuja unidade é “reais” por “kN·m”, sendo que, quanto maior o indicador, maior será o custo em relação à resistência e vice-versa.

Além disso, para garantir uma comparação justa entre os diversos materiais/sistemas estruturais, foram realizadas análises para cinco comprimentos de vão (L): 3 m, 4 m, 5 m, 6 m e 7 m.

Em todos os casos, o primeiro passo consistiu no pré-dimensionamento da seção transversal das vigas. Nesse caso, as relações empíricas, nos processos de dimensionamento, foram utilizadas, isto é:

- A altura de vigas de madeira foi pré-dimensionada considerando a relação L/15;
- A altura de vigas de aço foi pré-dimensionada considerando a relação L/20;
- A altura de vigas de concreto foi pré-dimensionada considerando a relação L/10.

Para as vigas de madeira e de concreto, admitiu-se a largura da seção transversal igual a 12 e 19 cm, respectivamente, a qual é coerente com a largura de paredes de edificações e com as dimensões comercializadas.

Por sua vez, no caso das vigas de aço, foi escolhido um perfil comercial da série VS com altura coerente à pré-dimensionada. Consequentemente, a largura foi definida pelos valores comerciais praticados.

Uma vez definida a seção transversal, calculou-se a capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}) das vigas. Para tanto, foram utilizadas as formulações expostas na seção 2.1 do presente trabalho. Nessa etapa, as considerações para os dados de entrada foram:

- Concreto C25 para as vigas de concreto;
- Cobrimento longitudinal de 3 cm para as vigas de concreto;
- Área de aço igual a quantidade de barras de 10mm necessárias para suprir duas vezes a armadura mínima prescrita pela NBR 6118 (ABNT, 2014);
- Aço ASTM A36 com resistência ao escoamento de 250 MPa para as vigas de aço;
- Madeiras Cambara Rosa e Eucalipto, com resistências à tração e à compressão paralela às fibras exposta no Quadro 24 e Quadro 25.
- Para o K_{mod} foi considerado o valor de 0,65, resultante do produto de:
 - $K_{mod,1} = 0,70$ (Longa duração e madeira serrada);
 - $K_{mod,2} = 1,00$ (Classe de umidade 2 e madeira serrada);
 - $K_{mod,3} = 0,80$ (Madeira Serrada, dicotiledônea, 2ª categoria).

Em seguida, o custo de cada viga foi determinado. Para tanto, foram utilizados valores locais para os insumos e valores de referência da base SINAPI de março de 2022. Precisamente, os seguintes valores foram considerados:

- Custo do metro cúbico de concreto C25: R\$ 455,00;
- Custo do metro cúbico da madeira espécie Eucalipto: R\$3.225,07;
- Custo do metro cúbico da madeira espécie Cambara Rosa: R\$4.696,17;
- Custo do kg do aço ASTM A36 na forma de perfis: R\$9,50;
- Custo de montagem do kg do aço na forma de perfis: R\$2,50;
- Custo da mão de obra, considerando Boletim Econômico - Março de 2022, fonte SindusconSP com encargos sociais, sem desoneração: R\$17,67/h.

Com base nas considerações citadas anteriormente, o custo de cada viga foi calculado.

Como o trabalho propõe a analisar 20 vigas diferentes (cinco de concreto armado, cinco de aço e 10 de madeira, sendo cinco da espécie Cambara Rosa e cinco da espécie Eucalipto), foi elaborada uma planilha, no software Microsoft Office Excel, para auxiliar no cálculo de M_{Rd} e do custo de cada viga.

Por fim, calculou-se o indicador técnico-econômico das vigas por meio do quociente entre seu custo e sua capacidade resistente ao momento fletor. Os resultados da parametrização estão apresentados na seção 4 do presente trabalho.

3.1. Planilha orçamentária dos Serviços

Para calcular os custos total de cada tipo de viga, foram utilizadas as composições de serviços pertinentes a cada tipo de viga. Para as vigas de concreto armado e para as vigas metálica foram utilizados os serviços descritos na tabela SINAPI de Março de 2022. As de madeira sofreram um pequeno ajuste, onde foram considerados os valores do metro linear de cada tipo de madeira.

3.1.1. Vigas de Concreto Armado

Os Quadros 1 ao 5 demonstram os serviços considerados para o custo total da viga de concreto. Os serviços já consideram os custos com insumos, equipamentos, ferramentas e mão de obra.

Para referenciar o quantitativo do serviço de forma, foi considerado o produto da altura pelo comprimento da viga, resultando a metragem quadrada de cálculo.

Quanto a referência quantitativa para a armação, inicialmente se considerou o dobro da área de armação mínima e arredondado o quantitativo de barras para cima, após esse arredondamento, se considerou o peso referente a quantidade de barras finais.

Por fim, para o serviço de concretagem foi levantado a metragem cúbica de cada viga de concreto.

O Quadro 1 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de concreto de 3 metros de comprimento.

Quadro 1: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 3 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGAS DE CONCRETO ARMADO - 0,19 x 0,30 x 3 metros					368,94
92452	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE VIGA, ESCORAMENTO METÁLICO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	0,90	163,70	147,33
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	5,55	14,33	79,53
103682	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=25 MPA, PARA QUALQUER TIPO DE LAJE COM BALDES EM EDIFICAÇÃO TÉRREA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_02/2022	M3	0,17	804,60	142,08

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 2 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de concreto de 4 metros de comprimento.

Quadro 2: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 4 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGAS DE CONCRETO ARMADO - 0,19 x 0,40 x 4 metros					627,05
92452	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE VIGA, ESCORAMENTO METÁLICO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	1,60	163,70	261,92
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	7,40	14,33	106,04
103682	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=25 MPA, PARA QUALQUER TIPO DE LAJE COM BALDES EM EDIFICAÇÃO TÉRREA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_02/2022	M3	0,31	804,60	259,09

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 3 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de concreto de 5 metros de comprimento.

Quadro 3: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 5 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGAS DE CONCRETO ARMADO - 0,19 x 0,50 x 5 metros					987,26
92452	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE VIGA, ESCORAMENTO METÁLICO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	2,50	163,70	409,25
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	12,34	14,33	176,83
103682	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=25 MPA, PARA QUALQUER TIPO DE LAJE COM BALDES EM EDIFICAÇÃO TÉRREA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_02/2022	M3	0,48	804,60	401,18

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 4 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de concreto de 6 metros de comprimento.

Quadro 4: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 6 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGAS DE CONCRETO ARMADO - 0,19 x 0,60 x 6 metros					1.422,91
92452	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE VIGA, ESCORAMENTO METÁLICO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	3,60	163,70	589,32
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	18,51	14,33	265,25
103682	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=25 MPA, PARA QUALQUER TIPO DE LAJE COM BALDES EM EDIFICAÇÃO TÉRREA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_02/2022	M3	0,68	804,60	568,34

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 5 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de concreto de 7 metros de comprimento.

Quadro 5: Composição de serviços da viga de concreto armado com vão de 7 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGAS DE CONCRETO ARMADO - 0,19 x 0,70 x 7 metros					1.950,84
92452	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE VIGA, ESCORAMENTO METÁLICO, PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_09/2020	M2	4,90	163,70	802,13
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	25,92	14,33	371,43
103682	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=25 MPA, PARA QUALQUER TIPO DE LAJE COM BALDES EM EDIFICAÇÃO TÉRREA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_02/2022	M3	0,93	804,60	777,28

Fonte: Sinapi Março/22.

3.1.2. Vigas de Aço Laminado

Os Quadros 6 ao 10 demonstram os serviços considerados para o custo total da viga de aço em perfil laminado.

Para referenciar o quantitativo do serviço, foi considerado o produto do peso por metro, determinado pelo fabricante, pelo comprimento da viga, resultando o peso em quilogramas para cálculo.

O Quadro 6 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de perfil metálico de 3 metros de comprimento.

Quadro 6: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 3 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE AÇO 3 METROS - VS 150 x 18 - 18 Kg/m					751,68
100763	VIGA METÁLICA EM PERFIL LAMINADO OU SOLDADO EM AÇO ESTRUTURAL, COM CONEXÕES PARAFUSADAS, INCLUSOS MÃO DE OBRA, TRANSPORTE E IÇAMENTO UTILIZANDO GUINDASTE - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_01/2020_P	KG	54,00	13,92	751,68

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 7 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de perfil metálico de 4 metros de comprimento.

Quadro 7: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 4 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE AÇO 4 METROS - VS 200 x 22 - 22 Kg/m					1.224,96
100763	VIGA METÁLICA EM PERFIL LAMINADO OU SOLDADO EM AÇO ESTRUTURAL, COM CONEXÕES PARAFUSADAS, INCLUSOS MÃO DE OBRA, TRANSPORTE E IÇAMENTO UTILIZANDO GUINDASTE - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_01/2020_P	KG	88,00	13,92	1.224,96

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 8 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de perfil metálico de 5 metros de comprimento.

Quadro 8: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 5 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE AÇO 5 METROS - VS 250 x 24 - 24 Kg/m					1.670,40
100763	VIGA METÁLICA EM PERFIL LAMINADO OU SOLDADO EM AÇO ESTRUTURAL, COM CONEXÕES PARAFUSADAS, INCLUSOS MÃO DE OBRA, TRANSPORTE E IÇAMENTO UTILIZANDO GUINDASTE - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO.	KG	120,00	13,92	1.670,40

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 9 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de perfil metálico de 6 metros de comprimento.

Quadro 9: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 6 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE AÇO 6 METROS - VS 300 x 28 - 28 Kg/m					2.338,56
100763	VIGA METÁLICA EM PERFIL LAMINADO OU SOLDADO EM AÇO ESTRUTURAL, COM CONEXÕES PARAFUSADAS, INCLUSOS MÃO DE OBRA, TRANSPORTE E IÇAMENTO UTILIZANDO GUINDASTE - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_01/2020_P	KG	168,00	13,92	2.338,56

Fonte: Sinapi Março/22.

O Quadro 10 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de perfil metálico de 7 metros de comprimento.

Quadro 10: Composição de serviços da viga de aço laminado com vão de 7 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE AÇO 7 METROS - VS 350 x 33 - 33 Kg/m					3.215,52
100763	VIGA METÁLICA EM PERFIL LAMINADO OU SOLDADO EM AÇO ESTRUTURAL, COM CONEXÕES PARAFUSADAS, INCLUSOS MÃO DE OBRA, TRANSPORTE E IÇAMENTO UTILIZANDO GUINDASTE - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_01/2020_P	KG	231,00	13,92	3.215,52

Fonte: Sinapi Março/22.

3.1.3. Vigas de Madeira

Os Quadros 11 ao 20 demonstram os serviços considerados para o custo total das vigas de madeira das espécies Cambara Rosa e Eucalipto, para vãos variando entre 3 e 7 metros.

Para referenciar o quantitativo do serviço, foi considerado o produto do preço por metro linear de cada seção, determinado valor do metro quadrado da seção, pelo comprimento da viga, resultando a metragem total de cálculo.

O Quadro 11 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambara Rosa de 3 metros de comprimento.

Quadro 11: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 3 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM CAMBARA ROSA - 3 METROS					746,85
COMP 1	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM CAMBARA ROSA, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,20 M	M	3,00	248,95	746,85

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 12 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambra Rosa de 4 metros de comprimento.

Quadro 12: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 4 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM CAMBARA ROSA - 4 METROS					1.223,48
COMP 2	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM CAMBARA ROSA, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,30 M	M	4,00	305,87	1.223,48

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 13 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambra Rosa de 5 metros de comprimento.

Quadro 13: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 5 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM CAMBARA ROSA - 5 METROS					1.671,65
COMP 3	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM CAMBARA ROSA, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,35 M	M	5,00	334,33	1.671,65

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 14 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambra Rosa de 6 metros de comprimento.

O Quadro 14 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambara Rosa de 6 metros de comprimento.

Quadro 14: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 6 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM CAMBARA ROSA - 6 METROS					2.176,74
COMP 4	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM CAMBARA ROSA, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,40 M	M	6,00	362,79	2.176,74

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 15 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Cambara Rosa de 7 metros de comprimento.

Quadro 15: Composição de serviços da viga de madeira Cambra Rosa com vão de 7 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM CAMBARA ROSA - 7 METROS					3.100,02
COMP 5	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM CAMBARA ROSA, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 6,0 M E MENORES QUE 10,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,50 M	M	7,00	442,86	3.100,02

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 16 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 3 metros de comprimento.

Quadro 16: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 3 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM ECUALÍPTO - 3 METROS					639,87
COMP 6	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM ECUALÍPTO, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,20 M	M	3,00	213,29	639,87

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 17 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 4 metros de comprimento.

Quadro 17: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 4 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM EUCALÍPTO - 4 METROS					1.009,52
COMP 7	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM EUCALÍPTO, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,30 M	M	4,00	252,38	1.009,52

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 18 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 5 metros de comprimento.

Quadro 18: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 5 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM EUCALÍPTO - 5 METROS					1.359,60
COMP 8	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM EUCALÍPTO, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,35 M	M	5,00	271,92	1.359,60

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 19 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 6 metros de comprimento.

Quadro 19: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 6 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM EUCALÍPTO - 6 METROS					1.748,82
COMP 9	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM EUCALÍPTO, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 3,0 M E MENORES QUE 6,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,40 M	M	6,00	291,47	1.748,82

Fonte: elaborado pelo autor.

O Quadro 20 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 7 metros de comprimento.

O Quadro 20 descreve os serviços considerados para execução de uma viga de madeira em Eucalipto de 7 metros de comprimento.

Quadro 20: Composição de serviços da viga de madeira Eucalipto com vão de 7 m.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNID	QUANT	P. UNIT. C/BDI	TOTAL (R\$)
VIGA DE MADEIRA EM EUCALÍPTO - 7 METROS					2.475,97
COMP 10	INSTALAÇÃO DE VIGA DE MADEIRA, POR M, BIAPOIADA, EM EUCALÍPTO, PARA VÃOS MAIORES OU IGUAIS A 6,0 M E MENORES QUE 10,0 M, INCLUSO IÇAMENTO, SEÇÃO 0,12 X 0,50 M	M	7,00	353,71	2.475,97

Fonte: elaborado pelo autor.

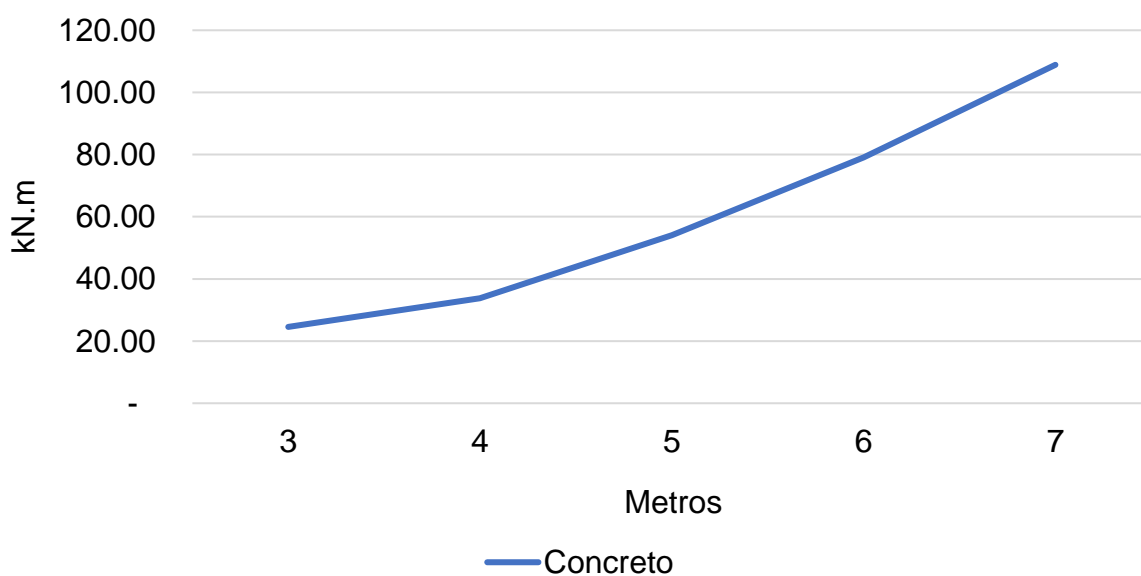
4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos levantamentos detalhados no capítulo anterior, assim como a discussão dos mesmos.

4.1. Capacidade Resistente do Momento Fletor

A Figura 4 apresenta o gráfico com os resultados obtidos através das planilhas de cálculo utilizados para encontrar o momento fletor nas vigas de concreto.

Figura 4: Resultados de momento fletor para vigas de concreto armado para vãos de 3 a 7m.

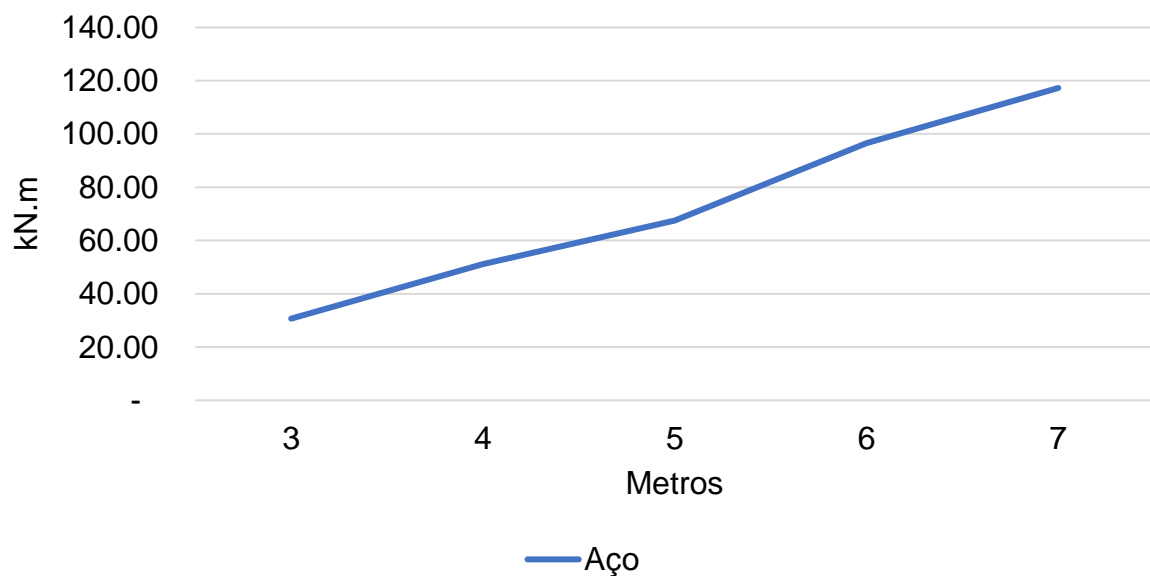


Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 4 é possível observar que a resistência da viga de concreto tem um crescimento de apenas 9,18 kN.m entre os comprimentos de 3 e 4 metros, diferentemente do que acontecer ao passar para os 5 metros de comprimento, onde atinge uma diferença de 20,30 kN.m de uma para outra. A média final entre as medidas foi de 21,08 kN.m.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para Momento resistente de cálculo para o aço.

Figura 5: Resultados de momento fletor para vigas de aço laminado para vãos de 3 a 7m.

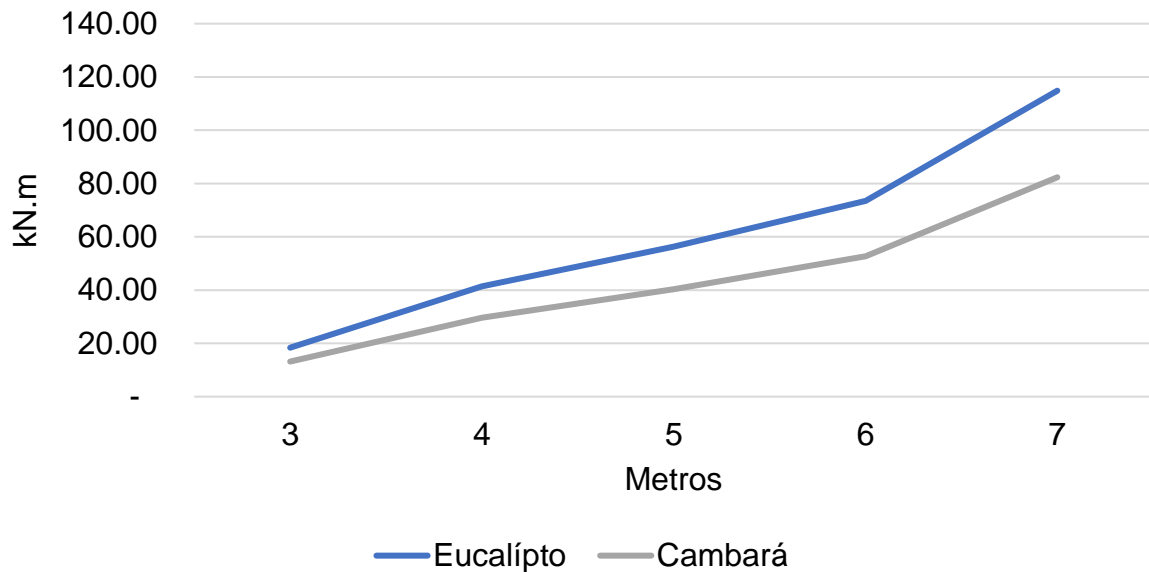


Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 5, Ao contrário do que ocorre com a viga de concreto, a diferença de resistência da viga de 3 metros para a viga de 4 metros chega em 20,45 kN.m. ao passar para os 5 metros, a diferença é de apenas 16,36 kN.m, porém esse valor será ultrapassado ao comparar a diferença da viga de 5 metros com a viga de 6 metros onde chega a 29,09 kN.m. Os valores apresentando resultam em uma média de 21,65 kN.m.

Para as vigas de madeira, foram realizadas comparações entre a espécie Cambara Rosa e Eucalipto.

A Figura 6 mostra a resistência da espécie Cambara Rosa e Eucalipto respectivamente.

Figura 6: Resultados de momento fletor para vigas de madeira para vãos de 3 a 7m.

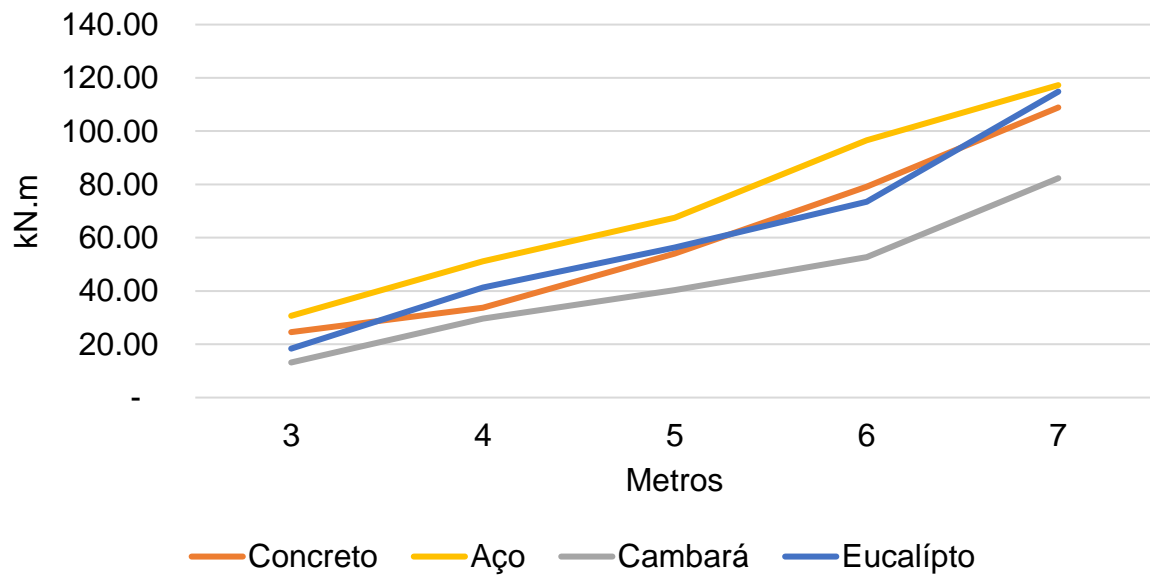
Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 6, assim como no gráfico da resistência da viga de aço, o gráfico para as vigas de madeira em cambará rosa e eucalipto dão um salto inicial ao comprar as vigas de 3 metros com as vigas de 4 metros apresentando valores de 16,47 kN.m e 22,97 kN.m respectivamente. Esse alto valor de diferença só volta a aparecer entre os 6 e 7 metros onde chegam em 29,64 kN.m e 41,34 kN.m. A média final para as vigas de madeira em Cambará Rosa é de 17,29 kN.m quando para vigas de Eucalipto é de 24,12 kN.m.

Interessante observar, que mesmo os cálculos de resistência a momento sejam os mesmos para as duas espécies, e nítida a diferença de resistência entre as espécies, inclusive no padrão de salto de resistência entre uma metragem e outra.

Por fim, abaixo, segue o gráfico apresentando as resistências dos quatro comparativos de vigas.

Figura 7: Resultados de momento fletor de todas as vigas para vãos de 3 a 7m.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 7, notamos que as vigas de aço laminado se mostram mais resistente que as demais, assim como a viga de madeira em Cambara Rosa se mostra com a menor resistência entre todas.

É interessante observar como as vigas de concreto armado se mistura as resistências apresentadas para as vigas de madeira em Eucalipto, sendo a viga de Eucalipto mais resistentes para vão de 4, 5 e 7 metros.

Quando comparamos as médias apresentadas pelos materiais, a Viga de Eucalipto apresenta valor superior as demais vigas.

O Quadro 21 apresentam os resultados referente ao MR_d para cada tipo de viga, em seus determinados vãos, indicando a variação de resultado entre os vãos.

Quadro 21: Comparativo de momento fletor das vigas entre os respectivos vãos.

RESUMO MRd [kN·m] (Concreto)			
L [m]	Concreto	Diferença	%
3	24,57	-	-
4	33,75	9,18	37,37
5	54,05	20,30	60,16
6	79,09	25,05	46,34
7	108,89	29,79	37,67

RESUMO MRd [kN·m] (Aço)			
L [m]	Aço	Diferença	%
3	30,68	-	-
4	51,14	20,45	66,67
5	67,50	16,36	32,00
6	96,59	29,09	43,10
7	117,27	20,68	21,41

RESUMO MRd [kN·m] (Eucalipto)			
L [m]	Eucalipto	Diferença	%
3	18,37	-	-
4	41,34	22,97	125,00
5	56,27	14,93	36,11
6	73,50	17,23	30,61
7	114,84	41,34	56,25

RESUMO MRd [kN·m] (Cambará)			
L [m]	Cambará	Diferença	%
3	13,17	-	-
4	29,64	16,47	125,00
5	40,34	10,70	36,11
6	52,69	12,35	30,61
7	82,33	29,64	56,25

Fonte: elaborado pelo autor.

Os Quadros 22 ao 25 demonstram os valores adotados para cada tipo de viga em seus respectivos vãos para que fossem encontrados os valores de M_{Rd} . No Quadro 22 foram apresentados os valores adotados para cálculos das vigas de concreto armado, considerando os valores de resistência do concreto, linha neutro, área de armadura, custo e por fim os valores por momento fletor metro.

Quadro 22: valores e resultados para cálculo de custos por momento fletor das vigas de concreto armado.

Concreto							
L [m]	b_w [m]	h [m]	f_{ck} [kN/m ²]	f_{cd} [kN/m ²]	$A_{s,min}$ [cm ²]	2 x $A_{s,min}$ [cm ²]	Aø10mm [cm ²]
3	0,19	0,30	25000,00	17857,14	0,86	1,71	0,785
4	0,19	0,40	25000,00	17857,14	1,14	2,28	0,785
5	0,19	0,50	25000,00	17857,14	1,43	2,85	0,785
6	0,19	0,60	25000,00	17857,14	1,71	3,42	0,785
7	0,19	0,70	25000,00	17857,14	2,00	3,99	0,785
L [m]	Qty Aço	A_s [cm ²]	x [m]	d [m]	M_{Rd} [kN.m]	Custo da viga	R\$/kN·m
3	3	2,36	0,04	0,26	24,57	368,94	15,02
4	3	2,28	0,04	0,36	33,75	627,05	18,58
5	4	2,85	0,05	0,46	54,05	987,26	18,27
6	5	3,42	0,06	0,56	79,09	1422,91	17,99
7	6	3,99	0,08	0,66	108,89	1950,8	17,92

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 23 são apresentados os valores e especificação de perfis de aço laminado para cálculo levando em consideração a resistência ao escoamento e o módulo de resistência plástico, além do custo unitário da peça e custo do momento fletor por metro.

Quadro 23: valores e resultados para cálculo de custos por momento fletor das vigas de aço laminado.

Aço				
L [m]	$h_{\text{pré-dimensionada}}$ [m]	Perfil escolhido	f_y [kN/cm ²]	Z_x [cm ³]
3	0,15	VS 150 x 18	25,00	135,00
4	0,20	VS 200 x 22	25,00	225,00
5	0,25	VS 250 x 24	25,00	297,00
6	0,30	VS 300 x 28	25,00	425,00
7	0,35	VS 350 x 33	25,00	516,00
L [m]	M_{pl} [kN.m]	M_{Rd} [kN.m]	Custo da viga	R\$/kN.m
3	33,75	30,68	751,68	24,50
4	56,25	51,14	1224,96	23,95
5	74,25	67,50	1670,4	24,75
6	106,25	96,59	2338,56	24,21
7	129,00	117,27	3215,52	27,42

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 24 encontram-se os valores adotados e obtidos para que fossem observados os resultados referentes as vigas de Cambara Rosa. Nele constam os valores adotados para resistência a compressão e tração paralelas as fibras, coeficiente de modificação adotado, além do custo unitário da peça e custo do momento fletor por metro.

Quadro 24: valores e resultados para cálculo de custos por momento fletor das vigas de madeiram em Cambara Rosa

Madeira - Cambará Rosa (Quarubarana)								
L [m]	b _w [m]	h [m]	h _{adotado} [m]	fc0 [MPa]	ft0 [MPa]	kmod	fc0,d [MPa]	ft0,d [MPa]
3	0,12	0,2000	0,20	37,8	58,1	0,56	15,12	18,0756
4	0,12	0,2667	0,30	37,8	58,1	0,56	15,12	18,0756
5	0,12	0,3333	0,35	37,8	58,1	0,56	15,12	18,0756
6	0,12	0,4000	0,40	37,8	58,1	0,56	15,12	18,0756
7	0,12	0,4667	0,50	37,8	58,1	0,56	15,12	18,0756
L [m]	fc0,d [kN/m ²]	ft0,d [kN/m ²]	x [m]	Fc = Ft [kN]	z [m]	M _{Rd} [kN.m]	Custo da viga	R\$/kN.m
3	15120,00	18075,56	0,1089	98,7972	0,1333	13,17	746,85	56,70
4	15120,00	18075,56	0,1634	148,1958	0,2000	29,64	1223,48	41,28
5	15120,00	18075,56	0,1906	172,8951	0,2333	40,34	1671,65	41,44
6	15120,00	18075,56	0,2178	197,5945	0,2667	52,69	2176,74	41,31
7	15120,00	18075,56	0,2723	246,9931	0,3333	82,33	3100,02	37,65

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 25 foram adotados os mesmos padrões do Quadro 24, para o cálculo das vigas de Eucalipto, onde se apresentam os valores considerados para resistência a compressão e tração paralelas as fibras, coeficiente de modificação adotado, além do custo unitário da peça e custo do momento fletor por metro.

Quadro 25: valores e resultados para cálculo de custos por momento fletor das vigas de madeira em Eucalipto

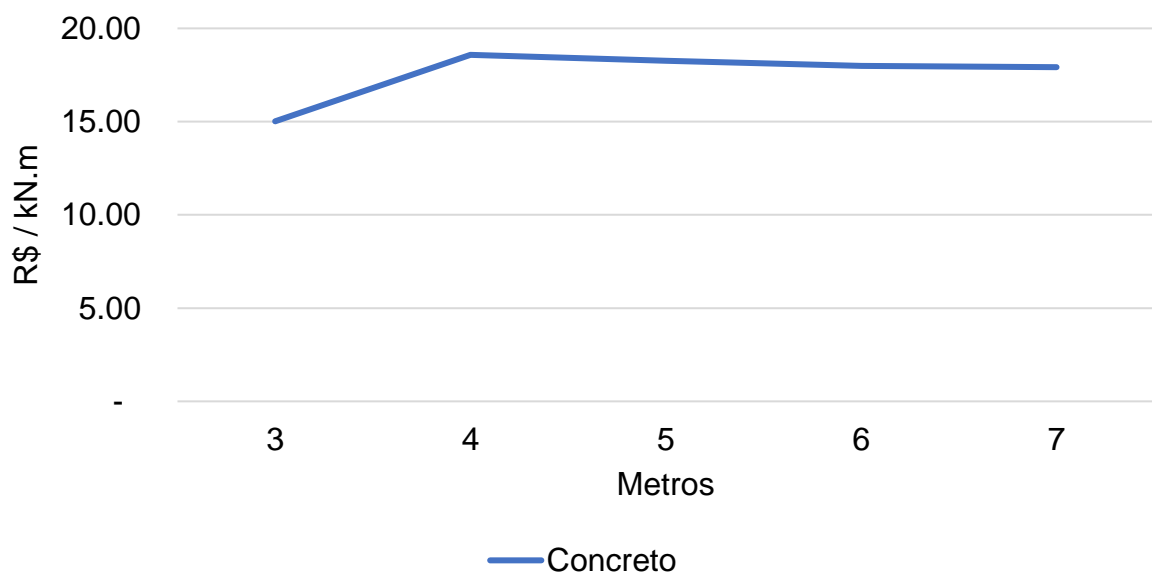
Madeira - Eucalipto (Eucalyptus saligna)								
L [m]	b _w [m]	h [m]	h _{adotado} [m]	fc0 [MPa]	ft0 [MPa]	kmod	fc0,d [MPa]	ft0,d [MPa]
3	0,12	0,2000	0,20	46,8	95,5	0,56	18,72	29,7111
4	0,12	0,2667	0,30	46,8	95,5	0,56	18,72	29,7111
5	0,12	0,3333	0,35	46,8	95,5	0,56	18,72	29,7111
6	0,12	0,4000	0,40	46,8	95,5	0,56	18,72	29,7111
7	0,12	0,4667	0,50	46,8	95,5	0,56	18,72	29,7111
L [m]	fc0,d [kN/m ²]	ft0,d [kN/m ²]	x [m]	Fc = Ft [kN]	z [m]	M _{Rd} [kN.m]	Custo da viga	R\$/kN.m
3	18720,00	29711,11	0,1227	137,8103	0,1333	18,37	639,87	34,82
4	18720,00	29711,11	0,1840	206,7154	0,2000	41,34	1.009,52	24,42
5	18720,00	29711,11	0,2147	241,1680	0,2333	56,27	1.359,60	24,16
6	18720,00	29711,11	0,2454	275,6205	0,2667	73,50	1.748,82	23,79
7	18720,00	29711,11	0,3067	344,5256	0,3333	114,84	2.475,97	21,56

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2. Indicadores técnicos-econômicos

Com Quadros 22 ao 25 apresentando a resistência do momento fletor e os custos das vigas demonstrados no capítulo 3.1 (Planilha orçamentária dos serviços), foi possível encontrar o custo por capacidade resistente ao momento fletor do metro de cada viga em comparação a resistência de cada uma, demonstrado nas Figuras 8 a 11.

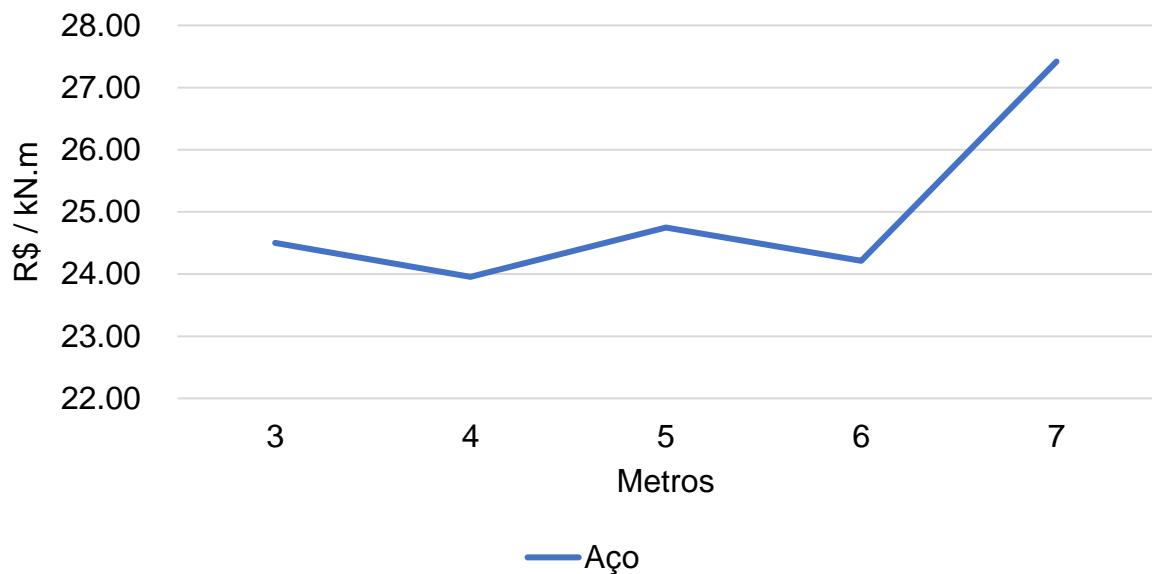
Figura 8: Gráfico de custo pela capacidade resistente ao momento fletor por metro para vigas de concreto armado.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 8 é possível observar uma pequena crescente em relação a viga de 3 metros para a de 4 metros, porém para as vigas seguintes é possível uma pequena diminuição de custos por resistência tendendo a zero.

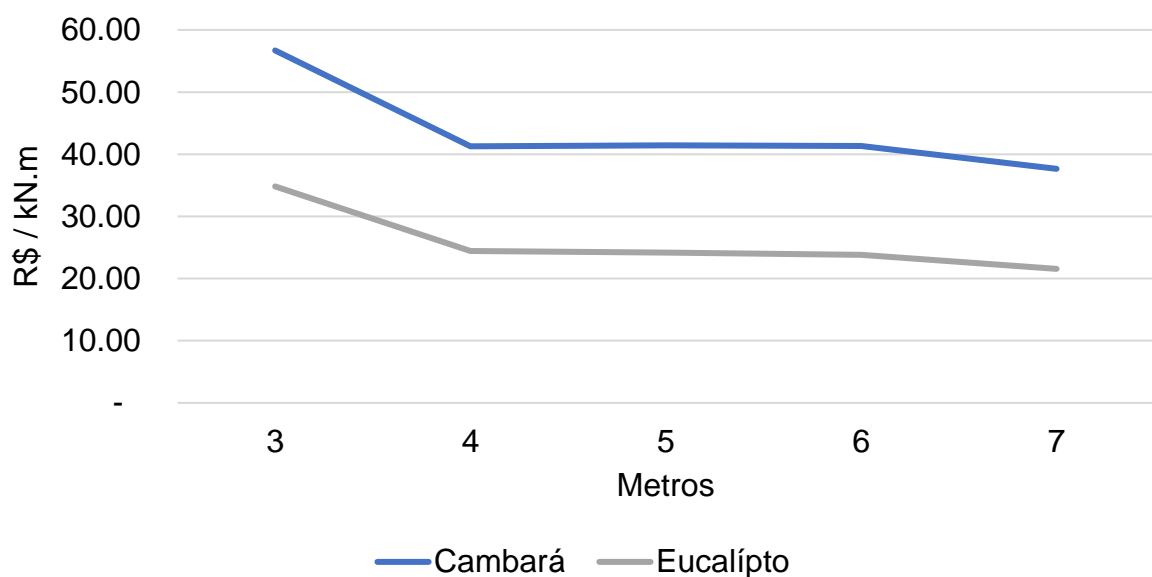
Figura 9: Gráfico de custo pela capacidade resistente ao momento fletor por metro para vigas de aço laminado.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já na Figura 9 se observa o mesmo padrão oscilante de diferença de valores entre vigas que foi observado nos gráficos de resistência do momento fletor, fazendo com que o custo do metro por resistência tenha um padrão quase linear até as vigas de 6 metros de comprimento.

Figura 10: Gráfico de custo pela capacidade resistente ao momento fletor por metro para vigas de madeira.

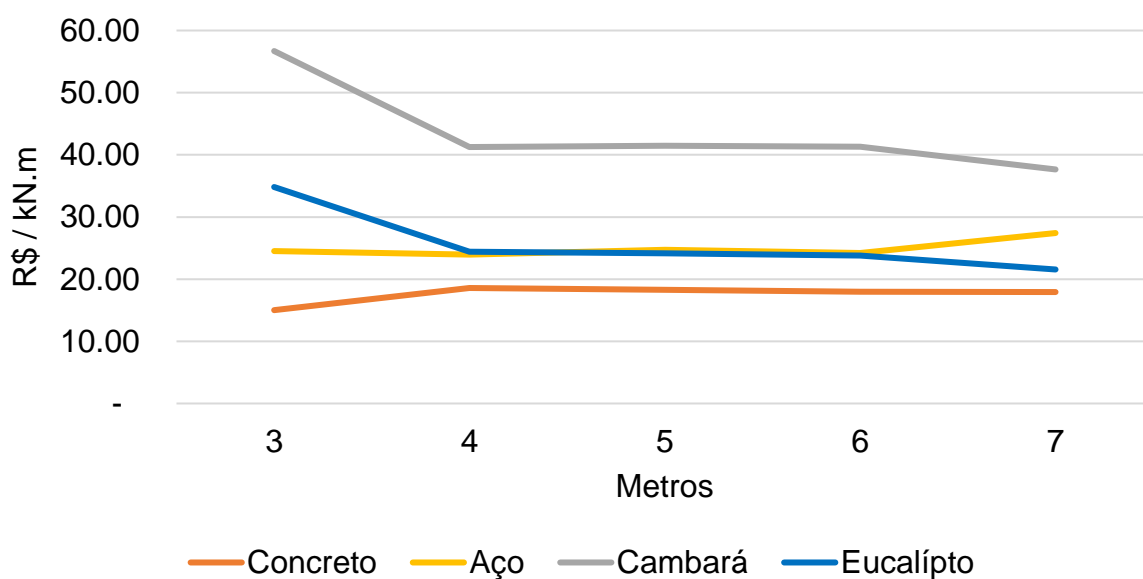


Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto a Figura 10, se observa o mesmo padrão de queda inicial do que o gráfico de resistência ao momento fletor em relação aos vãos de 3 para 4 metros.

Nota-se uma ligeira constância de queda de preço por metro para os vãos maiores.

Figura 11: Gráfico de custo pela capacidade resistente ao momento fletor por metro entre tipos de vigas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 11 comparamos os custos por metro em relação ao momento fletor para os tipos de vigas apresentados (concreto armado, aço laminado e madeira), podendo observar custos praticamente iguais para as vigas de aço laminado e vigas de madeira em Eucalipto nos vãos de 4 a 6 metros de comprimento, assim como é possível identificar uma aproximação de custos entre a viga de madeira em eucalipto com a viga de concreto armado para vãos de 7 metros.

No Quadro 26 é apresentado os valores utilizados para o estudo realizado nas Figuras 8 a 11.

Quadro 26: Comparativo de custo por momento fletor das vigas entre os respectivos vãos.

RESUMO R\$/kN·m (Concreto)			
L [m]	Concreto	Diferença	%
3	15,02	-	-
4	18,58	3,56	23,72
5	18,27	- 0,31	- 1,69
6	17,99	- 0,28	- 1,51
7	17,92	- 0,07	- 0,41

RESUMO R\$/kN·m (Aço)			
L [m]	Aço	Diferença	%
3	24,50	-	-
4	23,95	- 0,54	- 2,22
5	24,75	0,79	3,31
6	24,21	- 0,54	- 2,16
7	27,42	3,21	13,25

RESUMO R\$/kN·m (Eucalipto)			
L [m]	Eucalipto	Diferença	%
3	34,82	-	-
4	24,42	- 10,41	- 29,88
5	24,16	- 0,26	- 1,05
6	23,79	- 0,37	- 1,52
7	21,56	- 2,23	- 9,39

RESUMO R\$/kN·m (Cambará)			
L [m]	Cambará	Diferença	%
3	56,70	-	-
4	41,28	- 15,42	- 27,19
5	41,44	0,16	0,38
6	41,31	- 0,13	- 0,30
7	37,65	- 3,66	- 8,85

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 26 se apresentam os resumos de custo por capacidade resistente para cada tipo de viga em seus respectivos comprimentos. É apresentado a diferença de valores entre uma metragem em comparação a metragem anterior, e percentual dessa diferença.

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de comparar, nos contextos técnico e econômico, vigas de madeira, vigas metálicas, vigas de concreto armado por meio de indicadores.

Devido as propriedades de materiais a vigas em aço laminado se mostram superiores em resistência em relação aos demais materiais apresentados para os tipos de vigas. Porém as vigas de madeira em Eucalipto mantiveram seus valores de resistência bem próximos aos valores de resistência obtidos para as vigas de concreto armado.

Quanto aos custos das vigas, comparados a resistência de cálculo por metro, as vigas de concreto armado se mostram com valores mais atraentes em relação as demais vigas quando considerado todos os vãos (3, 4, 5, 6 e 7 metros). Foi possível observar uma relativa igualdade de custos entre as vigas de madeira em Eucalipto e as vigas de aço laminado para os vão de 4 a 6 metros.

O trabalho não considerou para comparativo o tempo de execução total de cada tipo de viga, sendo início e término após tempo de cura total do concreto por exemplo, nem mesmo a quantidade de resíduos para descarte obtidos por cada método apresentado, muito menos as manutenções necessárias durante toda vida útil da estrutura, nem mesmo impactos arquitetônicos. Despreza-se, também, a fator de disponibilidade do tipo de material no local de aplicação.

Conclui-se que levando-se em consideração apenas os dados obtidos do presente trabalho, as vigas em concreto armado se mostram mais viáveis em relação ao custo por resistência por metro.

6. REFERÊNCIAS

AMORIM, D. P. R. *et al.* **Análise De Viabilidade Técnica E Econômica Da Cobertura De Um Galpão Ao Utilizar Estruturas Metálica Ou Madeira: Um Estudo De Caso** Analysis Of Technical And Economic Feasibility Of A Shed Coverage When Using Metallic Or Wooden Structures: A Case. 2021.

ARANTES, R. B. **Projeto estrutural de um edifício residencial em estrutura de madeira**. Macaé: UFRJ/Campus Macaé, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BORGES, B. V.; DA SILVA, M. V. L.; DIAS, J. N. **Análise Comparativa da Estrutura de Madeira e Steel Frame para Cobertura de Residência Unifamiliar**. Anais do SIMPÓSIO NACIONAL DE CIÊNCIAS E ENGENHARIAS (SINACEN), v. 6, n. 1, p. 234-234, 2021.

COSTA, D. C. *et al.* Comparativo econômico entre vigas mistas e vigas em concreto armado. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 5, n. 4, 2019.

CRUZ, M. S. A. D.; **Análise das viabilidades da construção de edifícios residenciais de múltiplos andares em estrutura metálica**. 2018.

HABOWSKI, D. **Estudo da viabilidade da utilização de madeira de reflorestamento como material de construção para casas de pequeno porte**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LUIZ, L. V. A.; LEAL, M. V. R. **Análise comparativa entre projetos de estruturas em aço carbono e estruturas em concreto armado**. 2018.

NAKAHARA, F. S. **Análise da viabilidade estrutural e econômica entre estruturas de concreto armado e estruturas metálicas**. 2017. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

PATRÍCIO, J. P. **Análise comparativa da viabilidade técnica e econômica de vigas armadas e protendidas**. Engenharia Civil, Tubarão, 2019.

PEREIRA FILHO, L. G. N. **Viabilidade técnica-econômica para construção de habitações de interesse social em wood frame**. 2020. (<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/218060>)

RAFAEL, D. M.; JÚNIOR, R. S. V.; DA SILVA, M. M. C. **Alvenaria estrutural em comparação com concreto armado: viabilidade econômica e aspectos construtivos**. 2021

REIS, E. D.; FIGUEIREDO, Bárbara DOSP; RETTORE, P. M. B. **Sistemas estruturais em concreto armado e em concreto protendido: estudo comparativo de custos**. 2021

RIMI, P. M. T.; MEIRELLES, C. R. M. **O potencial das técnicas construtivas industrializadas em madeira na habitação mínima e sua viabilidade em construções emergenciais**. In: XIII Jornada de Iniciação Científica e VII Mostra de Iniciação Tecnológica-2017. 2018.

SANTOS JUNIOR, A. G. *et al.* Estudo comparativo entre o dimensionamento de uma estrutura em aço e concreto armado de um edifício garagem para a faculdade redentor, Itaperuna/RJ. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, V. 5, N. 1, 2019.

SILVA, L. C. D. **Estudo comparativo orçamentário de um edifício residencial analisando sistemas estruturais distintos: concreto armado e alvenaria estrutural**. 2020.