



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**COMPARAÇÃO ENTRE VIGA DE ROLAMENTO EM AÇO E
CONCRETO ARMADO PRÉ-FABRICADO**

William Ramon Konrath

Lajeado, novembro de 2020.

William Ramon Konrath

**COMPARAÇÃO ENTRE VIGA DE ROLAMENTO EM AÇO E
CONCRETO ARMADO PRÉ-FABRICADO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Ma. Rebeca Jéssica Schmitz

Lajeado, novembro de 2020.

William Ramon Konrath

**COMPARAÇÃO ENTRE VIGA DE ROLAMENTO EM AÇO E
CONCRETO ARMADO PRÉ-FABRICADO**

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Douglas Velho
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Gerson Ari Endler
Engenheiro Civil

Lajeado, 02 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família e minha noiva Ana Paula Schmitz por me incentivarem a ir em busca dos meus sonhos e também por nunca medirem esforços me proporcionando apoio em todas as fases e escolhas da minha vida.

Agradeço à minha orientadora, Rebeca Jéssica Schmitz que aceitou o desafio em me ajudar na escolha e na realização do estudo, por toda a sua paciência, incentivo e os seus conhecimentos aplicados, por estar sempre disposta em me ajudar e por todas as inúmeras orientações que tivemos durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço à Univates e a todos os professores por terem me instruído a ser uma pessoa melhor, tanto como estudante, quanto profissional, oferecendo excelentes condições e conhecimentos durante todo o meu percurso na instituição.

Enfim, agradeço a Deus.

RESUMO

Com o foco principal das indústrias voltado à alta produção e com intuito de não haver grandes perdas nesse processo, o que vem crescendo no mercado atual é a movimentação de cargas por pontes rolantes e para isso, tem-se as Vigas de Rolamento (VR). Elas têm o propósito de sustentar a via de rolamento de uma ponte rolante, transmitindo os esforços causados por ela para a edificação. Na análise e dimensionamento devem ser consideradas cargas móveis verticais, e as vigas podem ser constituídas de aço ou concreto armado pré-fabricado. O presente trabalho visa comparar vigas de rolamento em aço e concreto armado pré-fabricado, analisando a viabilidade econômica. Para isso foi elaborado o dimensionamento das VR que sustentam dois modelos diferentes de ponte rolante, univiga e biviga, com capacidade total de quinze e quarenta toneladas, respectivamente, é com as informações e características das pontes que serão definidas as cargas para então utilizar seus devidos coeficientes de majoração, fazendo-se as combinações de ELU e ELS. Ambos os modelos de VR foram elaborados no *software* Ftool para obter os esforços cortantes e momentos fletores e após isso utilizou-se uma planilha Excel com o método de cálculo para dimensionamento das mesmas. Para o comparativo de valores buscou-se fazer três orçamentos em empresas especializadas nos dois materiais estudados e assim classificar melhor as VR, que para a viga de concreto que suporta a ponte univiga o menor valor foi de R\$3.423,00 e para biviga foi de R\$6.358,00. Para as VR de aço os valores foram de R\$4.995,00 e R\$9.450,00 para univiga e biviga, respectivamente. Os deslocamentos verticais, flechas, apresentaram uma variação considerável entre elas, sendo que na comparação entre as VR que suportam a ponte univiga obteve-se uma diferença de 65,8% e para a ponte biviga foi de 173,7% entre o aço e o concreto. Os pesos próprios também tiveram uma grande diferença entre si, pois como o esperado, o concreto teve um peso mais elevado do que para a VR de aço, apresentando os valores de 727,7% e 685,7% de diferença do aço para concreto armado pré-fabricado, para as pontes univiga e biviga, respectivamente. Assim, todas as quatro VR apresentaram prós e contras nos termos comparados, visando somente a viga como elemento único, a VR de concreto armado pré-fabricado apresentou um valor de custo bem inferior que a de aço, podendo ser, ou não, um condicionante para a escolha do material. O engenheiro responsável deve ter atenção com a análise global de uma edificação onde a viga de rolamento é empregada, pois essa mesma viga tem um peso próprio elevado, fazendo com que toda a estrutura seja adequada para suportá-la.

Palavras-chave: Ponte rolante. Viga de rolamento. Aço. Concreto armado pré-fabricado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Problema de pesquisa	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Justificativa da pesquisa	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Pontes rolantes	8
2.1.1 Ponte univiga	10
2.1.2 Ponte biviga	11
2.2 Viga de rolamento	11
2.2.1 Seções em concreto armado pré-fabricado	12
2.2.2 Seções em aço	14
2.2.3 Trilhos	16
2.2.4 Condições necessárias em ELS	17
2.3 Cargas	19
2.3.1 Permanentes	19
2.3.2 Cargas móveis	20
2.3.3 Forças horizontais longitudinais	21
2.3.4 Forças horizontais transversais	22
2.4 Combinações de ações	23
2.4.1 Estado Limite Último - ELU	24
2.4.2 Fadiga	26
2.4.2.1 Fadiga nas estruturas em concreto armado pré-fabricado	28
2.4.2.2 Fadiga nas estruturas em aço	30
2.4.3 Estado Limite de Serviço - ELS	31
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
3.1 Definição dos critérios	35
3.2 Concepção do projeto	36
3.3 Pré-dimensionamento	38
3.3.1 Pré-dimensionamento da seção concreto armado pré-fabricado	38
3.3.2 Pré-dimensionamento do perfil de aço	39
3.4 Cargas atuantes	39
3.5 Modelagem no software	41

3.6 Esforços solicitantes	44
3.7 Combinações	47
3.8 Dimensionamento	48
3.8.1 Seção concreto armado pré-fabricado	49
3.8.2 Seção aço	49
3.9 Verificação dos deslocamentos verticais ELS	49
3.10 Verificação da fadiga	50
3.11 Comparações	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Apresentação dos resultados do dimensionamento	52
4.1.1 Viga de rolamento em concreto armado pré-fabricado	53
4.1.2 Viga de rolamento em aço	54
4.2 Pesos próprios	55
4.3 Deslocamentos verticais	57
4.4 Comparação dos custos envolvidos	59
4.5 Comparativos finais	60
5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	64
ANEXO A - Catálogo GERDAU	68
ANEXO B - Catálogo ABUS	70
ANEXO C - Catálogo KOCH	72
APÊNDICE A – Detalhamento VR1	74
APÊNDICE B – Detalhamento VR2	76
APÊNDICE C – Detalhamento VR3	78
APÊNDICE D – Detalhamento VR4	80

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, com a competitividade de mercado, existe a preocupação de oferta por melhores preços e benefícios, logo, a redução de custos e desperdícios têm se tornado importante para manter a situação financeira de uma empresa sólida. Em um processo produtivo, uma das maiores perdas provém da movimentação de cargas, que pode ser de qualquer material: matéria-prima, peças ou demais equipamentos com um peso demasiadamente elevado.

Essa mobilização de materiais no interior de edificações, tem-se uma vasta diversidade de equipamentos, dependendo do tipo específico de setor da indústria, utilizam-se empilhadeira, talhas, transportadores pneumáticos, guindastes móveis, pontes rolantes, pórticos rolantes entre outros. Dentre essas citadas a que vem se tornando mais eficaz e já é largamente utilizada para os serviços de elevação e movimentação de cargas em geral, são as pontes rolante. Tal aparelhagem consegue dispor de uma alta capacidade de ciclos de trabalho, sendo uma estrutura normalmente instalada em ambientes internos de indústrias, onde movimentações de cargas nas direções verticais, longitudinais e transversais são possíveis (SORDI, 2016).

Para esses edifícios, onde o uso de pontes rolantes é rotineiro, vigas que servem de apoio para o caminho de percurso são necessariamente previstas em projeto, conhecidas como vigas de rolamento. Estas são elementos estruturais e tem a finalidade de suportar este caminho, que na verdade é um trilho de rolamento que a ponte rolante irá percorrer e,

consequentemente, transmitir esforços. Na análise dessas vigas, são consideradas cargas permanentes e as móveis verticais juntamente com seus efeitos dinâmicos gerados pelos elementos que a ponte irá transportar, assim como deslocamentos horizontais causando algum tipo de impacto transversal e longitudinal, provenientes da movimentação da ponte rolante (SALGADO, 2013).

Silva (2018) enfatiza que o caminho de rolamento, são os trilhos, que se localizam nas extremidades da ponte, e fixados em cima da viga de rolamento. Esses trilhos recebem as rodas que promovem o deslocamento da ponte, transmitindo todos os esforços para a viga de rolamento. Assim, envolvendo uma série de verificações para o dimensionamento destas vigas, sendo elas o efeito localizado dos esforços causados pelas rodas, fadiga e outras condições indicadas nas normas brasileiras.

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa realizar uma análise comparativa entre vigas de rolamento em aço e em concreto armado pré-fabricado, considerando o dimensionamento adequado. A garantia da devida segurança será obtida através das normas brasileiras, que fazem recomendações de como proceder para o dimensionamento, somadas a referências bibliográficas aprofundadas no tema em estudo.

1.1 Problema de pesquisa

Qual o material mais indicado para vigas de rolamento que suportam uma ponte rolante, aço ou concreto armado pré-fabricado?

1.2 Objetivos

O objetivo do presente estudo está direcionado em apresentar o dimensionamento de uma viga de rolamento, e está dividido em objetivo geral e objetivos específicos, que encontram-se descritos nos itens a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é comparar aço e concreto armado pré-fabricado para vigas de rolamento.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos incluem:

- a) elaborar o dimensionamento de vigas de rolamento em concreto armado pré-fabricado e em aço de uma ponte rolante univiga com capacidade total de quinze toneladas;
- b) elaborar o dimensionamento de vigas de rolamento em concreto armado pré-fabricado e em aço de uma ponte rolante biviga com capacidade total de quarenta toneladas;
- c) comparar o peso próprio das vigas de rolamento em aço e concreto armado pré-fabricado;
- d) comparar os deslocamentos verticais das vigas de rolamento;
- e) comparar os custos de materiais envolvidos na construção das vigas de rolamento em si, considerando aço e concreto.

1.3 Justificativa da pesquisa

No mercado da construção civil, os engenheiros empregam determinados tipos de estruturas nas edificações, os quais podem afetar a viabilidade de uma construção. Quando se trata de vigas de rolamento para pontes rolantes, os profissionais podem escolher como material principal o aço ou o concreto armado, ambos apresentam vantagens e desvantagens. Tal preferência está ligada ao peso próprio da estrutura e nos deslocamentos verticais, influenciando diretamente no custo de toda a obra, inclusive nos próprios materiais da viga de rolamento.

Diante dessas dificuldades encontradas, o presente estudo se justifica por proporcionar um material de apoio para estudantes e profissionais da área de projetos de estruturas para pontes rolantes e ainda mais para vigas de rolamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são demonstrados os principais conceitos relacionados ao tema em estudo. Inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a ponte rolante e seus principais componentes dando enfoque à viga de rolamento, por fim, avaliam-se os esforços atuantes na estrutura.

2.1 Pontes rolantes

Visando facilitar o processo de transporte de objetos pesados e de grandes dimensões em ambientes industriais, buscam-se tecnologias alternativas para esta tarefa, sendo a ponte rolante, o sistema mais indicado. A ponte rolante é eficaz em realizar a movimentação de elementos extremamente pesados e grandes em pequenas distâncias (COSTA, 2010).

Segundo Gomes (2017), pontes rolantes são estruturas com equipamentos que fazem a elevação de cargas comuns em indústrias, usualmente com altas capacidades de pesos, tamanhos e elevados ciclos de trabalhos, para movimentar diferentes materiais e aparelhos nas direções longitudinal e transversal. Caracterizando-se pela sua multifuncionalidade e por ser um componente que pode operar em ambientes e situações críticas, quando os serviços e trabalhos braçais são limitados. Para compreender melhor essa descrição, a Figura 1 demonstra um exemplo de ponte rolante, mostrando as vigas principais (1.1), as vigas de cabeceiras (1.2), o conjunto do trole (1.3) e vigas de rolamento (1.4).

Figura 1 - Elementos que compõem uma ponte rolante.



Fonte: Adaptado INFMG (2020).

Os deslocamentos da movimentação da ponte rolante se dão ao longo do plano horizontal, sendo que a suspensão da carga (movimento vertical) é realizada por um trole, este que se desloca e movimenta transversalmente sobre a viga principal da ponte. Essa viga tem seu movimento limitado pelas vigas de cabeceira, que estão sobre as vigas de rolamento do edifício (LEITE, 2016).

Em uma ponte rolante, presente na viga principal, existe um guincho que faz a suspensão verticalmente das cargas, trazendo do chão até próximo a viga principal. Esse guincho é instalado sobre um carro que faz o deslocamento transversalmente através do caminho de rolamento. A ponte rolante é motorizada, o movimento longitudinal direito ou esquerdo é feito pelas rodas presentes nas vigas de cabeceira sobre os trilhos, o transversal se dá pelo carro sobre a ponte e o vertical é realizado pelo enrolamento e/ou desenrolamento do cabo de aço (CARDIM, 2019).

Dentre diversos tipos de pontes rolantes, no presente trabalho serão abordados dois modelos específicos: a ponte univiga com capacidade de içamento de 15 tf, controlada a

partir de controle pendente ou controle remoto e a ponte rolante biviga com capacidade de içamento de 40 tf, também controlada a partir de controle pendente ou controle remoto. As informações seguem conforme indicam os catálogos da Gerdau e Abus, no Anexo A e Anexo B, deste trabalho.

2.1.1 Ponte univiga

Conforme Strey (2019), uma ponte univiga é composta por duas cabeceiras nas suas extremidades que garantem o seu movimento, uma única viga principal, e o trole que sustenta a talha e percorre a aba inferior da viga principal da ponte. Dependendo de sua capacidade de elevação, ela pode ser constituída por perfil I laminado ou seção caixão soldado. Na Figura 2 tem-se uma aplicação de exemplo da ponte rolante univiga.

Figura 2 - Exemplo de aplicação da ponte rolante univiga



Fonte: Bravo Metal Engenharia (2019).

Essa ponte é indicada para edificações com o pé-direito elevado, pois como o trole se desloca na parte inferior da viga, perde-se a altura equivalente ao tamanho do carro. Outro fator a ser observado é o vão máximo da viga e a capacidade de carga, que dependendo do seu fabricante pode chegar até 25 m e 15 tf, respectivamente (BRITO, 2017).

2.1.2 Ponte biviga

A ponte rolante biviga não se distingue dos outros modelos em relação aos seus elementos de composição, também tem duas vigas de cabeceiras nas suas extremidades, tem-se duas vigas principais e um trole que sustenta a talha, diferenciando-se por ter duas vigas principais. Nesta ponte, o trole desliza pelo meio da ponte, nas faces superiores das duas vigas principais (STREY, 2019), sendo apresentado um exemplo na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de aplicação da ponte rolante biviga



Fonte: Bravo Metal Engenharia (2019).

Ainda conforme Strey (2019), esse modelo de ponte se torna eficaz onde geralmente a solicitação de carga é elevada, podendo ter capacidade de até 250 tf no total, abrangendo um vão que pode chegar até 100 m. Pelo fato do carro percorrer entre as vigas tem-se um ganho no pé-direito e ainda, por se ter duas vigas principais, tem-se uma melhor distribuição do peso, permitindo menos desgaste da viga da ponte rolante.

2.2 Viga de rolamento

As vigas de rolamento (VR), tema de estudo do presente trabalho, sustentam a ponte rolante. Segundo Salgado (2013), vigas de rolamento têm seu propósito de assegurar a via de rolamento da ponte, além disso, transmitir os esforços causados por ela para o edifício. Para a análise das mesmas devem ser consideradas cargas móveis verticais, forças horizontais de

impactos longitudinais e transversais que podem gerar efeitos dinâmicos, além disso, deve-se fazer uma série de verificações complementares, como, por exemplo, o efeito localizado causado pela pressão das rodas da viga de cabeceira.

Gomes (2017) reitera que o um projeto de VR pode ter variações, tudo dependendo do seu carregamento e o vão livre, esse vão a ser vencido deve levar em conta além da carga suportada, a estrutura da edificação e também da sua finalidade. Conforme o vão é possível determinar as características da viga, uma delas é sua seção, tipo de perfil a ser empregado, indicando as informações das mesas e da alma, como a altura, largura e espessuras.

Nos próximos itens do trabalho serão abordadas vigas de rolamento em aço e concreto armado pré-fabricado, com a análise de cada material separadamente.

2.2.1 Seções em concreto armado pré-fabricado

Em concreto armado pré-fabricado pode-se ter as seções T, I e retangulares, sendo as mais usuais de seção retangular, devido à facilidade e rapidez na produção e montagem, pois não envolve dificuldades na execução da fôrma e complexidade na armadura. Esta que será um dos objetos de estudo para o presente trabalho, a Figura 4 demonstra um modelo de VR na seção que será estudada.

Figura 4 - Viga de rolamento de seção retangular



Fonte: Abcic (2019).

Segundo Rodrigues (2012), para vigas de rolamento em concreto armado tem-se liberdade na escolha do tamanho da sua seção, adotando a largura e altura necessárias, conforme os limites máximos suportados pela ponte rolante empregada, assim como o vão livre entre pilares. Ao contrário das VR em aço, não necessitam de contenção lateral como reforço de sustentação, podendo ter simplesmente o trilho de rolagem fixado na sua face superior. Na Figura 5 tem-se as vigas de seção retangulares no contexto de um galpão em um caso de aplicação real.

Figura 5 - Aplicação de viga de rolamento de seção retangular



Fonte: Pentax Pré-Fabricados (2012).

Conforme regulamenta a NBR 9062 (ABNT, 2017), para os processos de cálculos aplicados às estruturas pré-moldadas ou pré-fabricadas, adota-se os procedimentos relativos a estruturas moldadas no local sendo indispensável a verificação quanto ao Estado Limite Último de todos os elementos, seguindo o que está disposto na NBR 6118, também levando em consideração o estabelecido nas NBR 6120, NBR 6123, NBR 8681 e NBR 15421.

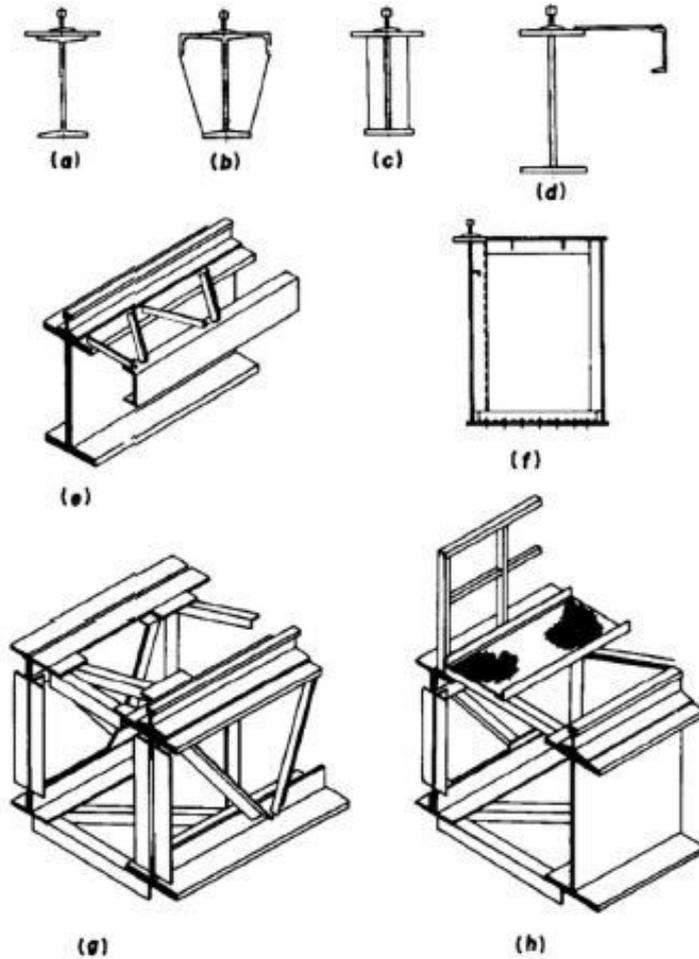
Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), tem-se particularidades que devem ser analisadas com cuidado para VR, para cargas cíclicas significativas deve-se dar atenção especial aos seus efeitos deletérios geradas pela mesma, pois não só tornam os elementos estruturais mais deformáveis, ou seja, relativamente danificados, mas pode também ampliar esse dano, provocando uma ruptura por fadiga.

2.2.2 Seções em aço

As seções em aço mais usuais para VR são de perfis I soldados ou laminados, mas também pode-se ter tipos variados. De acordo com Bellei (2006), quando se trata de pontes rolantes mais leves que suportam até 5 tf, com vãos de até 6 m, utilizam-se os perfis I soldados ou laminados. Já para vigas de pontes rolantes que suportam carregamentos maiores, até 25 tf, e vãos que ultrapassam 7 m, são projetadas seções assimétricas, com mesas superiores mais largas do que as inferiores, conforme a Figura 6. Isso se justifica pela necessidade de suportar maiores esforços oriundos das forças horizontais perpendiculares à

viga de rolamento. Para o presente estudo, serão analisadas as vigas com perfil I laminado (item “a” da Figura 6).

Figura 6 - Seções em aço para vigas de rolamento.



Fonte: Bellei (2006).

Segundo a norma NBR 10084 (ABNT, 2020), para vigas de rolamento metálicas o projeto deve ser elaborado em conformidade com todos os requisitos de componentes estruturais estabelecidos e previstos, inclusive essas verificações devem ser realizadas para que haja uma margem de segurança suficiente em relação às tensões críticas, podendo considerar possíveis falhas como exceder o limite elástico, exceder a tensão crítica de flambagem global localizada e exceder o limite de resistência à fadiga.

2.2.3 Trilhos

Os trilhos, ou caminho de rolamento da ponte rolante, são onde as vigas de cabeceiras com as rodas motorizadas percorrem e movimentam longitudinalmente a ponte rolante. É muito comum utilizar trilhos ferroviários, devido à possibilidade do reaproveitamento das peças usadas e descartadas pelas empresas que administram as ferrovias, que ainda estão com boas condições para o uso. Além disso, existem trilhos especiais para pontes rolantes que seguem normas internacionais europeias e americanas (GOMES, 2017).

A Figura 7 mostra como é feita a ancoragem do trilho em uma VR de aço, onde há uma chapa de metal chumbada no trilho e após parafusada na viga, fazendo-se assim um ponto de fixação com um espaçamento específico entre cada um deles.

Figura 7 - Exemplo de trilho em viga de rolamento de aço.



Fonte: Moviservi (2020).

A Figura 8 representa como é feita a ancoragem do trilho em uma VR de concreto armado pré-fabricado, onde há uma chapa de metal chumbada ao longo de todo o trilho, e

antes mesmo da concretagem da viga de rolamento são adicionados chumbadores de barras roscadas, para receber a chapa metálica com o trilho já soldado, fazendo-se assim um ponto de fixação com um espaçamento específico entre cada um deles.

Figura 8 - Exemplo de trilho em viga de rolamento de concreto armado.



Fonte: Moviservi (2020).

2.2.4 Condições necessárias em ELS

Este tópico refere-se a análise das condições a serem verificadas ao Estado Limite de Serviço (ELS) nas vigas de rolamento, sendo as deformações ou deslocamentos provocados. A NBR 8681 (ABNT, 2004) define o ELS como condições que ocorrem na vida útil da estrutura com certa frequência e, podem causar efeitos na estrutura que comprometem certas condições específicas para o uso e durabilidade normal da edificação.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), para a verificação dos ELS deve-se considerar as cargas cíclicas que, devido à demasiada movimentação, geram esforços no decorrer de sua vida útil. Isto porque, as cargas móveis provocam microfissuração significativa do concreto,

tornando a estrutura mais deformável, e por se tratar de ciclos de atuação dessas cargas, essa deformação irá se agravar cada vez mais.

Ainda conforme norma NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando o ELS de deslocamentos limites, efeitos em elementos não estruturais podem acarretar um mau funcionamento dos equipamentos que, apesar de não fazer parte, estão de alguma forma ligados aos elementos estruturais de um edifício. Para pontes rolantes, exemplo disso é um desalinhamento nos trilhos de rolamento, tendo em vista a flecha provocado pelas ações consequente da aceleração e frenação ou um deslocamento horizontal nos pilares do edifício.

Conforme NBR 8800 (ABNT, 2008), o ELS aplicado ao dimensionamento das vigas de rolamento em aço, são deslocamentos verticais e horizontais. Estes devem ser analisados através da combinação quase permanente de serviço, que são aquelas que podem atuar na vida útil da estrutura. Para isso a viga de cabeceira associada à ponte rolante é analisada na posição mais desfavorável na VR e deve estar dentro dos limites estabelecidos descritos no Quadro 1. A saber, o parâmetro L indicado no quadro se refere ao vão da viga de rolamento.

Quadro 1 - Deslocamentos máximos permitidos para vigas de rolamento

Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	L/600
Deslocamento vertical para pontes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas	L/800
Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidades igual ou superior a 200 kN	L/1000
Deslocamento horizontal, exceto para pontes siderúrgicas	L/400
Deslocamento horizontal para pontes siderúrgicas	L/600

Fonte: adaptado de ABNT (2008).

Como não há indicações claras em normas sobre os limites de deslocamentos verticais para vigas de rolamento em concreto armado pré-fabricado, serão utilizados os limites indicados para o aço, visto que a viga terá a mesma finalidade.

2.3 Cargas

As cargas sobre vigas de rolamento são variadas, atuando tanto de forma independente, como, também combinadas entre si. Essas cargas se dividem em permanentes, variáveis e excepcionais, sendo aqui tratado especificamente das cargas permanentes e variáveis, dentre as quais estão listadas: móveis verticais, horizontais longitudinais e transversais. Para o caso das ações ocasionadas por pontes rolante a NBR 9062 (ABNT, 2017), dita que se faz necessária a consideração dos esforços horizontais e longitudinais de frenagem, de acordo com o carregamento do trem-tipo associado, fornecidos pelo fabricante, fazendo ainda as considerações das NBR 8400, NBR 8800 e NBR 10084.

A saber, a carga de vento não será considerada sobre a viga de rolamento pois será considerado que o galpão é fechado e que essa carga será absorvida por outros elementos estruturais do galpão. Nos itens a seguir são abordadas as ações relevantes para este trabalho.

2.3.1 Permanentes

A NBR 8681 (ABNT, 2004) define as ações permanentes como as que normalmente ocorrem com valores constantes e com pouca variação na sua média, durante a vida útil da construção.

De acordo com Sena (2017), são considerados carregamentos permanentes aqueles que não variam na vida útil da edificação, esses são responsáveis por gerar esforços internos e deformações na estrutura. Para a ponte rolante a NBR 6120 (ABNT, 2019) define que as cargas permanentes são aquelas causadas pelas forças verticais oriundas do peso próprio da estrutura da ponte e de todos os seus componentes, assim como o peso próprio da VR e o trilho de rolamento.

A norma NBR 6120 (ABNT, 2019) ainda preconiza que o peso próprio e demais informações da ponte rolante normalmente são fornecidos pelo fornecedor do equipamento, mas pode-se determinar o peso próprio, incluindo o trole e os dispositivos de içamento fazendo-se uma estimativa, pela Equação 1:

$$pp = \left(0,25 + \frac{1,5 \cdot L}{100} \right) \cdot T \quad (1)$$

Sendo:

pp = estimativa do peso próprio (ton);

L = medida do vão da ponte (m);

T = carga máxima de içamento (ton).

2.3.2 Cargas móveis

As ações variáveis ocorrem com valores que apresentam alterações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção. Essas ações aplicadas à ponte rolante são consideradas como a força de frenação, de impacto e a carga içada e podem ser classificadas em função da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser normais ou especiais, no caso das citadas, classificam-se como normais (ABNT, 2004).

Segundo Gomes (2017), uma grande variedade de elementos estruturais sofrem ações de cargas móveis, sendo assim imprescindível o conhecimento de como a seção irá se comportar com a variação da posição das cargas na estrutura. É interessante conhecer os máximos efeitos que atingem cada seção, para avaliar o problema faz-se o uso do conceito da linha de influência, que é definido como uma representação gráfica ou analítica de um efeito elástico em uma determinada seção, produzida por uma carga unitária concentrada de cima para baixo que atravessa a estrutura.

Para obter-se a posição de aplicação dessas cargas que levam maiores solicitações sobre a VR, deve ser aplicado a ponte em diversas posições ao longo do comprimento total da viga, encontrando-se assim a posição que leva o maior momento fletor e força cortante (LEITE, 2017).

Somado a essa análise, em função das cargas serem dinâmicas, são considerados os coeficientes de impacto para cada tipo de operação (ABNT, 2008). Segundo a NBR 6120

(ABNT, 2019), aplica-se a majoração de 10%, devido ao coeficiente dado para pontes rolantes comandadas por controle pendente ou remoto.

Bellei (2006) enfatiza que devido às cargas dinâmicas atuando sobre a VR, existem coeficientes de impacto que devem ser considerados para cada tipo de operação, e também deve ser considerado o efeito localizado de pressão causada pelas rodas das vigas de cabeceiras associadas na ponte para as vigas de rolamento. Isso pelo fato de que, na prática, os trilhos dificilmente ficam alinhados exatamente sobre a alma do perfil. Deve ser considerado uma excentricidade de pelo menos 0,75 tw entre o eixo vertical que passa no centro do trilho e o que fica no centro da alma.

2.3.3 Forças horizontais longitudinais

As forças horizontais longitudinais (HL ou FL) se dão ao longo do caminho de rolamento, estão paralelas à direção da VR e devem ser aplicadas no topo de cada trilho, em cada lado da ponte e nos dois sentidos possíveis. Seu valor é 10 % da soma de todas as cargas máximas aplicadas pelas rodas, não majoradas pelo coeficiente de impacto vertical (ABNT, 2019).

Essas forças são causadas pela movimentação da ponte ao longo da VR, por sua aceleração, frenagem e o choque da ponte com um batente na extremidade ou para-choque, a Figura 9 ilustra as forças conforme o sentido de movimento da ponte. Essas pouco influenciam no dimensionamento da viga, normalmente são usadas para dimensionar o pára-choque, a ligação da viga com a coluna e os contraventamentos verticais (BELLEI, 2006).

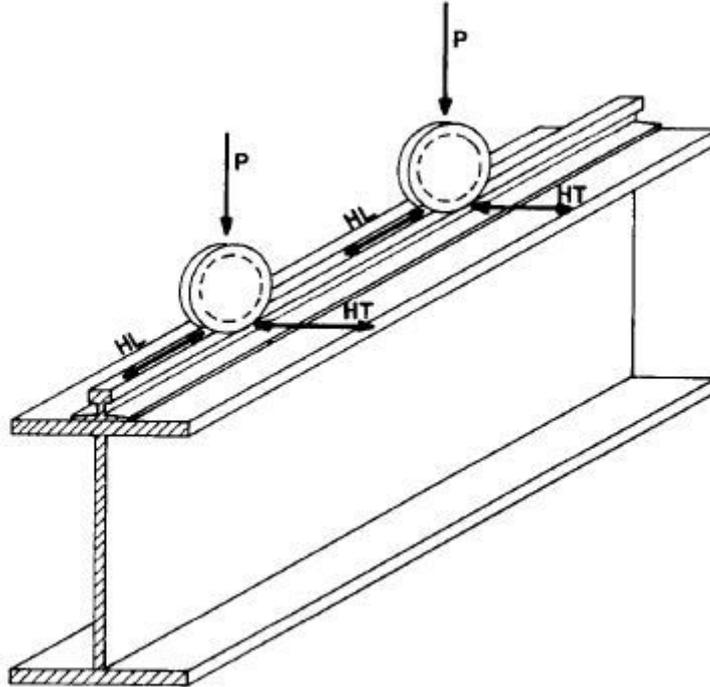
Portanto, para se obter a força HL aplicada pelas rodas da ponte rolante, apresenta-se a Equação 2.

$$H_L = 0,10 \cdot \Sigma F_{1,max} \quad (2)$$

Sendo:

$\Sigma F_{1\max}$ = esforço cortante causado por uma roda da viga de cabeceira (kN);

Figura 9 - Esforços de HL e HT causados pela ponte rolante



Fonte: Bellei. (2006).

2.3.4 Forças horizontais transversais

Conforme Bellei (2006), as forças horizontais transversais (HT ou FT) são causadas pela aceleração e frenagem do trole e pelo içamento das cargas, que nem sempre ocorrem em linha vertical. Leite (2016) complementa que somada a essas causas estão as irregularidades do caminho de rolamento e até mesmo o desalinhamento da ponte. Nessas ações deve-se considerar o impacto lateral, que pode ter sua intensidade expressa como uma parcela da força vertical aplicada pelas rodas da ponte rolante.

A NBR 6120 (ABNT, 2019) expõe que a força horizontal transversal deve ser aplicada no topo de cada trilho integralmente de ambos os lados da ponte na direção perpendicular ao trilho. Em situações que a rigidez de um dos lados do caminho de rolamento seja diferente do outro lado, a distribuição de forças deverá ser proporcional, então essa soma deve resultar o dobro da força transversal definida na Tabela C.1 da respectiva norma. Portanto, apresenta-se a Equação 3, para definição da força HT:

$$H_T = 0,10 (T + T_i) \quad (3)$$

Sendo:

T = peso da carga içada;

T_i = peso próprio do trole e dispositivos de içamento.

2.4 Combinações de ações

Conforme a norma NBR 8681 (ABNT, 2004), em relação à segurança, deve-se analisar os prováveis estados limites e para cada um dos tipos de carregamentos são consideradas as combinações de ações que podem causar efeitos desfavoráveis nas seções críticas.

Um carregamento é estabelecido pelas combinações de ações que tem possíveis chances, não desprezíveis, de atuarem ao mesmo tempo sobre a estrutura. Essa combinação das ações é feita de um modo que as situações mais desfavoráveis devem ser consideradas para o edifício. Para definir o cálculo de carregamentos as ações necessitam ser multiplicadas pelos coeficientes de ponderação, apresentados em função da atuação simultânea dessas ações, tais coeficientes de ponderação são responsáveis por majorar ou minorar as ações atuantes na estrutura (SENA, 2017).

Os coeficientes de ponderação e fatores de majoração e minoração adotados para o estudo, estão apresentados no Quadro 2, com suas respectivas descrições, simbologias e valores. Nos itens a seguir serão tratadas das combinações em que eles são utilizados.

Quadro 2 - Coeficientes adotados para o dimensionamento

Descrição	Simbologia	Valores
CIV - Coeficiente de impacto vertical (para pontes comandadas por controle remoto ou pendente)	Ψ	1,1
Coeficiente de ponderação das ações permanentes (pré moldado)	γ_g	1,3
Coeficiente de ponderação das ações permanentes (metálica)	γ_g	1,25
Coeficiente de ponderação das ações variáveis	γ_q	1,5
Fator de combinação para ELS (vigas de rolamento)	Ψ_0	1
Fator de combinação para o Estado Limite de Fadiga	Ψ_1	1
Amplificação dinâmica p/ pré-fabricado (saque da fôrma, manuseio e montagem no canteiro)	β_a	1,3

Fonte: do autor.

2.4.1 Estado Limite Último - ELU

Conforme a norma NBR 8681 (ABNT, 2004), os Estados Limites Últimos (ELU) devem ser considerados usualmente como os estados que se caracterizam pela perda de equilíbrio, considerando a estrutura em análise como um objeto rígido, pela ruptura ou deformação plástica em excesso dos materiais, pela transformação da estrutura, toda ou em partes, em sistema hipostático, pela instabilidade por deformação e também pela instabilidade dinâmica.

Para tanto, quando se consideram as combinações para os ELU, os coeficiente de ponderação das ações são dados como o produto de outros dois, estes que levam em conta alguns possíveis erros dos resultados dos efeitos das ações, que podem ser problemas oriundos dos métodos construtivos (ABNT, 2004). Segundo Fonseca (2017), projetos estruturais de vigas de rolamento normalmente são baseados na condição de satisfazer dois estados limites últimos, o de ruptura e o de instabilidade de equilíbrio, para casos de componentes muito esbeltos comprimidos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 8800 (ABNT, 2008) trazem a Equação 4, para combinações últimas de ELU normal e de construção.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{gik} + \gamma_q \left[F_{q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0jef} F_{qjk} \right] \quad (4)$$

Sendo:

F_d = valor de cálculo das ações para combinação última;

F_{gik} = representa as ações permanentes diretas;

F_{q1k} = ação variável direta escolhida como principal;

F_{qjk} = ações variáveis secundárias que podem atuar simultâneo com a ação variável principal;

Ψ_{0jef} = fator de combinação efetivo de cada uma das demais variáveis diretas que podem agir simultaneamente com a principal;

γ_q = coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas;

γ_g = coeficiente de ponderação para as ações permanentes diretas.

Em se tratando de análise de construção, a NBR 9062 (ABNT, 2017) regulamenta que para analisar de forma aproximada as solicitações dinâmicas de forma estática equivalente, adota-se um coeficiente de amplificação dinâmica. Esse coeficiente tem a função de majorar os efeitos causados pela movimentação, transporte e montagem dos elementos pré-fabricados, que por sua vez, é feito na medida em que o concreto ainda não atingiu sua resistência máxima e a sua cura total. Sendo indicada a Equação 5 para cálculo da carga estática equivalente referente ao peso das estruturas.

$$g_{eq,d} \geq \gamma_f \cdot \beta_a \cdot g_k \quad (5)$$

Sendo:

g_k = carga estática característica permanente;

$g_{eq,d}$ = carga estática equivalente de cálculo permanente;

β_a = coeficiente de amplificação dinâmica;

γ_f = coeficiente de ponderação das ações, utilizar 1,30 para esta análise.

2.4.2 Fadiga

Essa condição emprega-se a elementos estruturais que estão sujeitos a ações que ocorrem em elevado número de ciclos ao longo de toda sua vida útil. Em consequência da variação de tensões no regime elástico cuja repetição e intensidade são suficientes para iniciar fissuração e colapso progressivo por fadiga (ABNT, 2008).

De acordo com Salgado (2013), entende-se que é um crescimento progressivo de uma fissura, que se iniciou em imperfeições no metal ou na solda, quando pensado nas estruturas em aço. Essas que atuam como amplificadores de tensão, aumentando as tensões elásticas, para tensões plásticas. À medida em que esses ciclos de movimentações e carregamentos são aplicados as tensões avançam, fazendo surgir uma nova ponta de fissura, e assim aumentando-as, para uma eventual ruptura.

A fadiga pode ser considerada uma diminuição gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura ou rompimento lento dos materiais empregados, pelo seguimento do avanço das trincas ou deformações plásticas, praticamente imperceptíveis, causado pelo carregamento cíclico (PIMENTA, 2019).

De acordo com a norma NBR 6120 (ABNT, 2019), para a verificação à fadiga, deve ser considerada, em cada VR, a ação de uma ponte rolante com toda capacidade das cargas verticais das rodas, majoradas pelo coeficiente de impacto vertical. Segundo Souza (2019), as análises de fadiga são normalmente estatísticas, pois não se consegue controlar todas as ações que influenciam na vida de uma peça. Uma estimativa para vida útil seria o tempo básico para a falha se originar e se agravar. Compara-se a isso todos os ciclos de carga e descarga,

podendo ter ou não outras influências, como imperfeições na estrutura, rugosidade e variação de temperatura.

Para fazer a verificação da fadiga, Fabiane (2012) indica quatro etapas a serem seguidas na coleta de informações. A primeira seria obter os esforços solicitantes com o cálculo das tensões e a combinação de ações, a segunda seria definir a faixa de variação das tensões, a consulta nas Tabelas K.1 e K.2 da norma 8800 para obtenção dos parâmetros de fadiga seria a terceira, e por último faz-se a definição da capacidade de fadiga predefinindo uma vida útil.

Com base nestes pontos, aplica-se o método S-N, que estabelece uma semelhança das diferenças de tensões com as máximas das tensões elásticas cíclicas, que normalmente atuam no ponto mais crítico da estrutura, com um número de ciclos N , que teoricamente iniciam uma microfissura por fadiga. Este método deve ser usado para evitar e prever a iniciação de trincas por fadiga, como a maior parte dos elementos estruturais são projetados para ter vidas úteis longas sob a tensão plástica, o S-N é o método mais usado na prática, por sua facilidade de entendimento e aplicação de cálculo (PRAVIA, 2003).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) para combinações de ações de um determinado ciclo de carga, faz-se a suposição de que os efeitos da fadiga se acumulam linearmente com a soma dos ciclos aplicado a um certo nível de tensão, para isso deve-se obedecer a Equação 6, descrita a seguir.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (6)$$

Sendo:

n_i = número de repetições aplicadas com as tensões solicitantes;

N_i = número das repetições que causariam a ruptura da estrutura por fadiga para a mesma condição das tensões aplicadas.

Já a consideração quanto às combinações de ações na verificação da fadiga, as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 8800 (ABNT, 2008), afirmam que pode ser feito um único nível de sollicitação, que é expresso pela Equação 8, combinação frequente de ações.

Para a combinação frequente de fadiga as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 8800 (ABNT, 2008) apresentam a Equação 7:

$$F_{d, fad} = \sum_{i=1}^m F_{gik} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{2j} F_{qjk} \quad (7)$$

Sendo:

F_{gik} = representa as ações permanentes diretas;

F_{q1k} = ação variável direta escolhida como principal;

F_{qjk} = ações variáveis secundárias que podem atuar simultâneo com a ação variável principal;

Ψ_1 = fator de redução para combinação quase permanente sobre ação variável principal;

Ψ_{2j} = fator de combinação das variáveis que podem agir simultaneamente com a principal;

2.4.2.1 Fadiga nas estruturas em concreto armado pré-fabricado

A NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda traz as verificações de fadiga do concreto e para a armadura, analisando os casos do concreto em compressão e tração, devendo satisfazer as equações descritas a seguir.

Para a verificação do concreto em compressão, a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as Equações 8, 9 e 10:

$$\eta_c \gamma_f \sigma_{c, max} \leq F_{cd, fad} \quad (8)$$

Onde:

η_c = parcela de resistência à compressão do concreto dado pela Equação 9;

γ_f = coeficiente de ponderação das ações;

$\sigma_{c,max}$ = tensão máxima de compressão no concreto;

$F_{cd,fad}$ = resistência de fadiga à compressão do concreto dada pela Equação 10.

$$\eta_c = \frac{1}{1,5 - 0,5 \left(\frac{|\sigma_{c1}|}{|\sigma_{c2}|} \right)} \quad (9)$$

Sendo:

$|\sigma_{c1}|$ = é o menor valor, em módulo, da tensão de compressão para uma certa distância da face;

$|\sigma_{c2}|$ = é o maior valor, em módulo, da tensão de compressão para uma certa distância da face.

$$F_{cd,fad} = 0,45F_{cd} \quad (10)$$

Onde:

F_{cd} = resistência de cálculo do concreto.

Para a verificação do concreto em tração, a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as Equações 11 e 12:

$$\gamma_f \sigma_{ct,max} \leq F_{ctd,fad} \quad (11)$$

Onde:

γ_f = coeficiente de ponderação das ações;

$\sigma_{ct,max}$ = tensão máxima de tração no concreto;

$F_{ctd,fad}$ = resistência de fadiga à tração do concreto.

$$F_{ctd,fad} = 0,3F_{ctd,inf} \quad (12)$$

Para a verificação da fadiga na armadura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta a Equação 13:

$$\gamma_f \Delta \sigma_{ss} \leq \Delta F_{sd,fad} \quad (13)$$

Onde:

γ_f = coeficiente de ponderação das ações;

$\Delta \sigma_{ss}$ = variação da tensão calculada;

$\Delta F_{sd,fad}$ é dado pela Tabela 23.2 da NBR 6118, que são os parâmetros para as curvas S-N, para a armadura no concreto, como a armadura passiva de aço CA-50, com valores para 2×10^6 ciclos e os coeficientes de k_1 e k_2 .

2.4.2.2 Fadiga nas estruturas em aço

A NBR 8800 (ABNT, 2008) descreve que para o cálculo da tensão máxima e a faixa de variação de tensões é baseada na análise elástica, essas tensões não devem ser aumentadas pelos fatores de concentração das tensões. Ainda no caso de atuação em conjunto de força axial e momentos fletores, as máximas das tensões normais e de cisalhamento devem ser consideradas com todos os esforços solicitantes. Estes valores não podem exceder a Equação 14, descrita a seguir, que tem-se categorias de A a F, listados pela Tabela K.1 da norma.

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327C_f}{N} \right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} \quad (14)$$

Sendo:

σ_{SR} = faixa admissível de variação das tensões;

N = número de ciclos de variação das tensões na vida útil da estrutura;

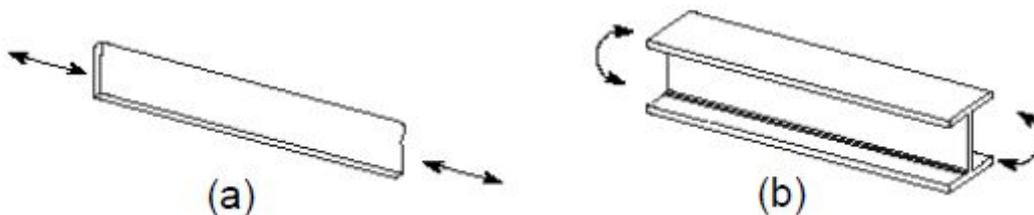
C_f = constante dada pela Tabela K.1 da NBR 8800, para a categoria correspondente;

σ_{TH} = limite admissível para a faixa de variação das tensões, para infinitos ciclos de solicitações, dado pela Tabela K.1 em MPa.

Para parâmetros de fadiga, na análise da Tabela K.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008), o presente estudo irá situar-se na descrição 1.1 da tabela, onde o metal-base é afastado de qualquer solda, com superfícies laminadas, na categoria de tensão A, com a Constante C_f de 250×10^8 , limite da tensão σ_{TH} igual a 165 MPa e o ponto de início com potencial de fissuração longe de qualquer solda ou ligação estrutural, conforme demonstra a Figura 10, da Tabela K.2 da norma em questão.

Figura 10 - Detalhes construtivos dos parâmetros de fadiga.

Seção 1 – Material-base afastado de qualquer solda



Fonte: ABNT (2008).

Todos estes requisitos se aplicam quando o valor das tensões calculadas não ultrapassa os valores dos momentos fletores (tensão normal) de $0,66 f_y$, combinando os eixos X e Y, e os esforços cortantes (tensão de cisalhamento) de $0,40 f_y$.

2.4.3 Estado Limite de Serviço - ELS

Quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS), a NBR 6120 (ABNT, 2019) afirma que para vigas de rolamento devem ser utilizadas combinações raras de serviço no cálculo de deslocamento máximos. A NBR 8681 (ABNT, 2004) apresenta a Equação 15 para combinações raras de serviço:

$$F_{d, uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gik} + F_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{1j} F_{Qjk} \quad (15)$$

Sendo:

F_{Gik} = representa as ações permanentes diretas;

F_{Q1k} = ação variável direta escolhida como principal;

F_{Qjk} = ações variáveis secundária que podem atuar simultâneo com a ação variável principal;

Ψ_{ij} = fator de combinação efetivo de cada uma das demais variáveis diretas que podem agir simultaneamente com a principal, tomadas como frequentes.

A partir dessa carga combinada, faz-se a verificação dos deslocamentos verticais (flechas), não podendo ultrapassar o limite já definido no item 2.2.4. Utilizando as Equações 16 e 17 de flechas máximas instantâneas elásticas para cargas móveis e distribuídas uniformemente (cargas permanentes), respectivamente.

$$f_{móv} = \frac{P \cdot b \cdot (L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}}{9 \sqrt{3} \cdot E \cdot I} \quad (16)$$

Sendo:

$f_{móv}$ = flecha final;

P = carga móvel pontual;

b = ponto mais desfavorável na VR;

L = vão da VR;

E = módulo de elasticidade;

I = inércia da seção.

$$f_{\text{perm.}} = -\frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (17)$$

Sendo:

f_{perm} = flecha final;

q = cargas permanentes uniformemente distribuídas;

L = vão da VR;

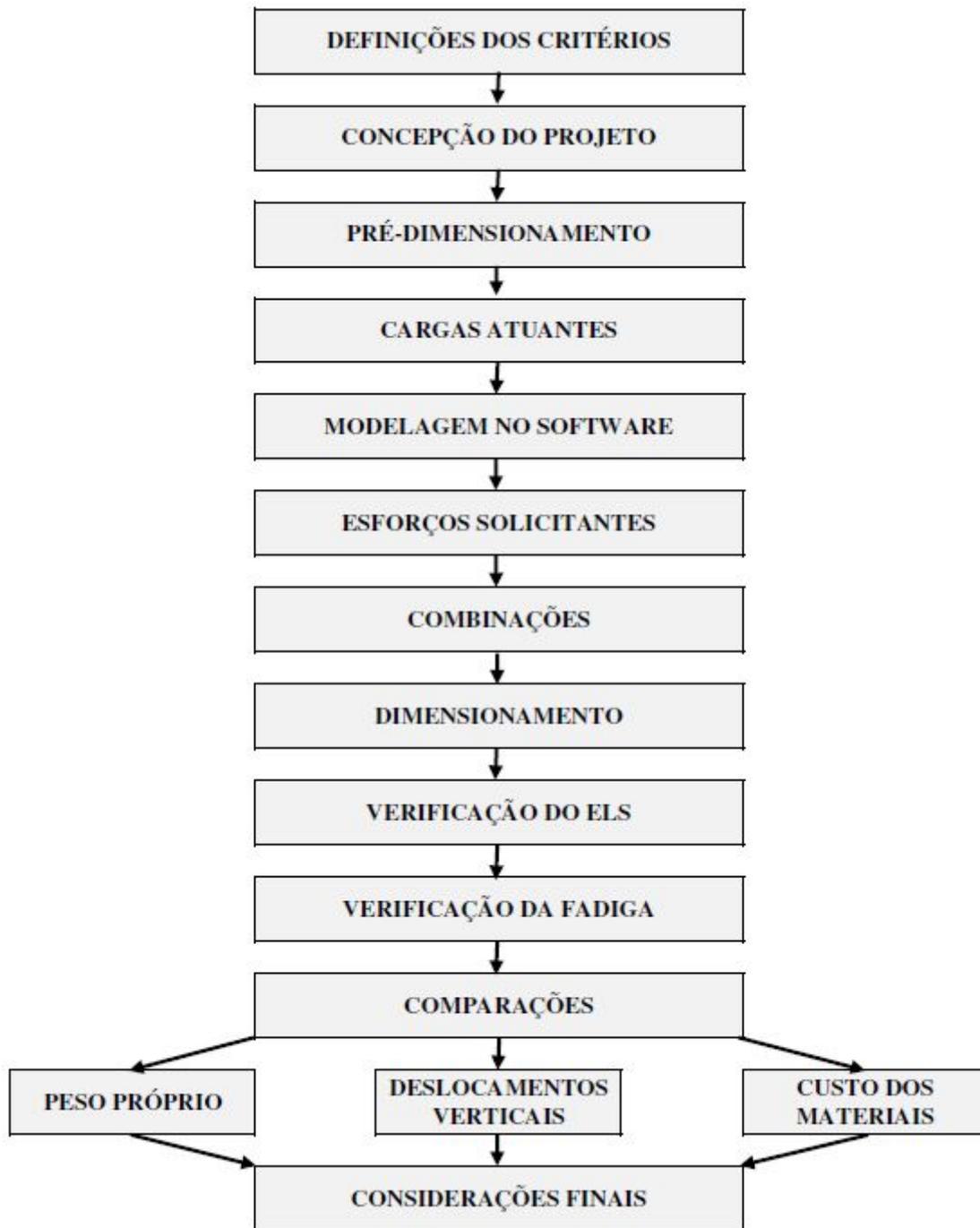
E = módulo de elasticidade;

I = inércia da seção.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho abordou uma análise comparativa entre vigas de rolamento em aço e concreto armado pré-fabricado, em relação ao peso próprio e deslocamentos verticais, usando o *software* Ftool para auxiliar nessa análise. Por fim, foi realizada uma estimativa de custos dos materiais envolvidos para as vigas de rolamento. Na Figura 11 é demonstrado o fluxograma de como procedeu o estudo. Primeiramente, durante todo o desenvolvimento elaborado, realizou-se pesquisas em referências bibliográficas para aprofundar o tema abordado e por consequência, definir os parâmetros adotados.

Figura 11 - Diagrama das etapas do trabalho



Fonte: do autor.

3.1 Definição dos critérios

Alguns critérios já foram descritos no capítulo 2 a fim de delimitar o estudo. Foram analisadas vigas de rolamento que suportam dois tipos de ponte rolante, em específico a ponte univiga com um vão nominal de 22 m, capacidade de içamento de 15 tf, controlada a partir

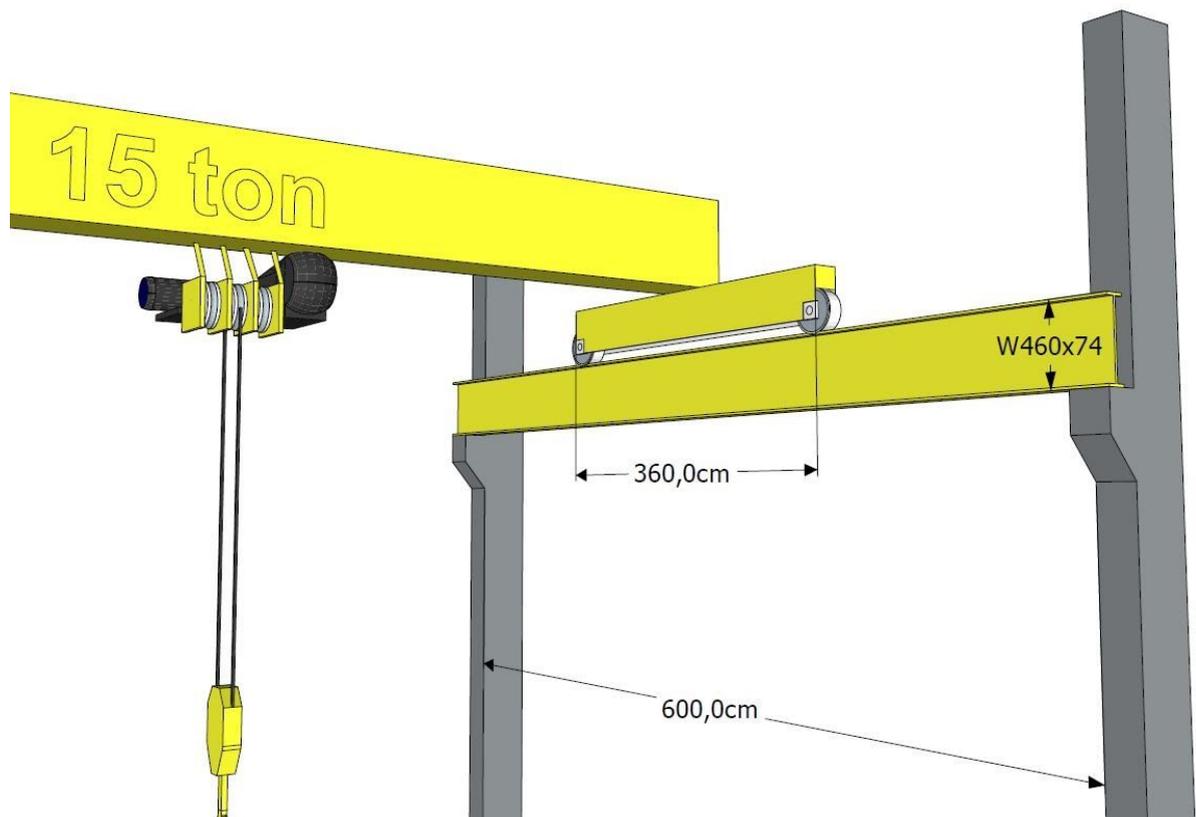
de controle pendente ou controle remoto. O conjunto do trole e seus mecanismos de içamento pesam 3,8 tf, com a distância entre eixo das rodas nas vigas de cabeceira medindo 3,6 m, e a distância mínima que o trole pode chegar até o apoio é de 1,3 m. A outra ponte rolante sendo biviga com um vão nominal de 36 m, capacidade de içamento de 40 tf, também controlada a partir de controle pendente ou controle remoto. O conjunto do trole e seus dispositivos pesam 4 tf, a distância entre eixo das rodas é de 2,5 m e a medida mínima que o trole chega até a extremidade da ponte é de 0,90 m. As informações sobre as pontes rolantes seguem os catálogos da Gerdau, Abus e Koch, no Anexo A, B e C, respectivamente, deste trabalho.

Já em relação à viga de rolamento, fica determinado que a mesma será bi-apoiada, visando apresentar melhor custo e benefício, será considerado um vão livre entre pilares de 6 metros, por ser uma medida muito utilizado pela maioria dos pavilhões contendo vigas de rolamento de concreto pré-fabricado. Para ser feito comparativo de valores ao final do dimensionamento, a VR de aço terá o mesmo vão livre entre pilares. Considera-se ainda, que está em um galpão fechado, onde não terá influência das atuações dos ventos sobre a ponte rolante e viga de rolamento.

3.2 Concepção do projeto

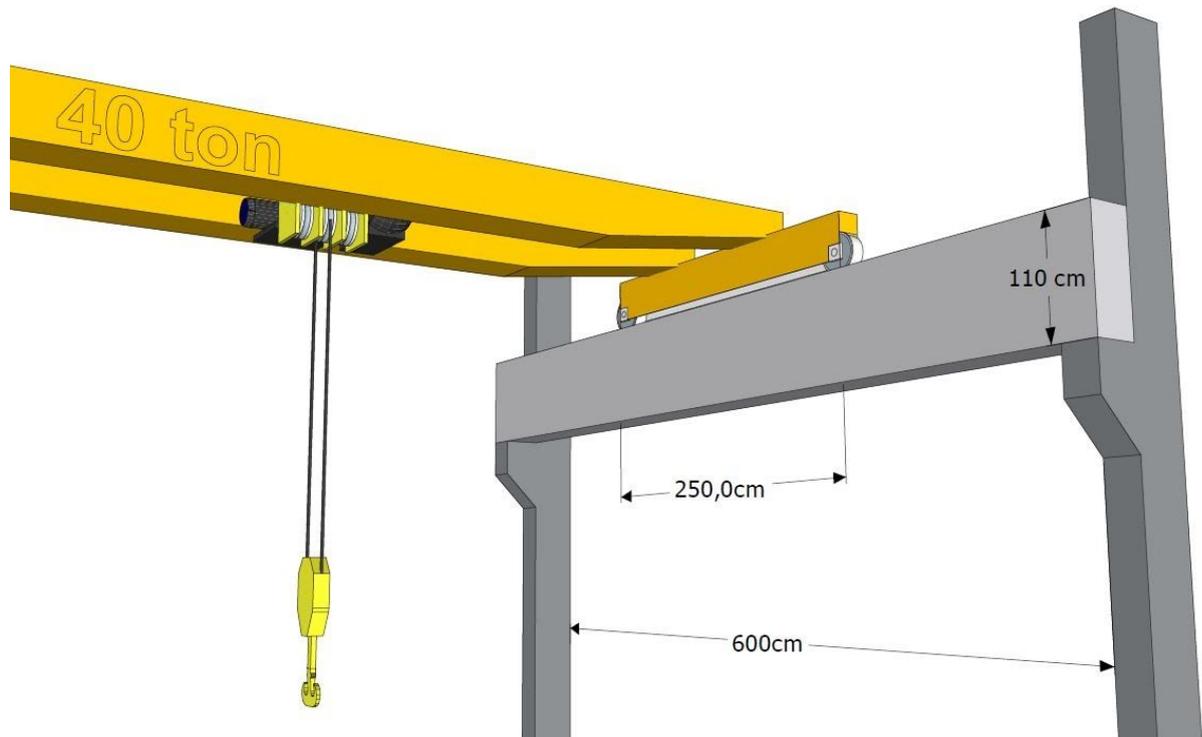
O esquema da estrutura foi desenhado no *software* SketchUp para a criação de um modelo tridimensional, com o lançamento das dimensões já estabelecidas, com o intuito de ilustrar de forma adequada o projeto. Para melhor entendimento do tema proposto, apresenta-se as Figuras 12 e 13, demonstrando o conjunto de todos os elementos envolvidos, já citados no trabalho, com imagens meramente ilustrativas.

Figura 12 - Modelo gráfico 3D de representação para viga de rolamento em aço com ponte univiga



Fonte: do autor.

Figura 13 - Modelo gráfico 3D de representação para viga de rolamento em concreto armado com ponte biviga



Fonte: do autor.

3.3 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento consiste em prever uma seção que atenda às normas e aos esforços nela aplicados, para isso, foi separado a seção em concreto armado e o aço, pois essa análise é feita de maneira diferente para cada material.

3.3.1 Pré-dimensionamento da seção concreto armado pré-fabricado

Usualmente, para vigas de edificios convencionais, sujeitas a cargas menores, utiliza-se a relação empírica de $L/10$, para tramos bi-apoiados, visando atingir os resultados e ter conformidade com as normas (SOUZA, 2019). Na falta de uma recomendação específica para VR, para este trabalho foi adotado inicialmente a relação de $L/8$, em função de ter-se um carregamento superior e diferente ao de uma edificação comum, entende-se que a primeira relação citada provavelmente não atenderia aos requisitos. Assim tem-se uma seção inicial para a viga com altura de 75 cm e largura de 25 cm, e com estes dados propostos, foi

realizado as verificações necessárias em relação aos esforços solicitantes, podendo ter essas medidas reduzidas ou aumentadas de acordo com o dimensionamento final.

3.3.2 Pré-dimensionamento do perfil de aço

Para determinar o pré-dimensionamento da VR em aço, conforme Margarido (2007) recomenda-se que se adote uma relação de L/15 a L/25 para vigas isostáticas, sendo uma fórmula empírica. Então, para alcançar a aprovação da VR em relação ao que é pressuposto pelas normas neste trabalho, foi adotado inicialmente o perfil I laminado de seção W 610 x 125,0, sendo realizadas todas as verificações necessárias. A escolha da seção também foi baseada no catálogo da Gerdau (MACHADO, 2018), apresentado no Anexo A. Podendo ter alteração desta seção ao longo do dimensionamento, para melhor atender às condições econômicas e aos carregamentos propostos.

3.4 Cargas atuantes

Para dar início às verificações do dimensionamento, foi feita uma relação das cargas que atuariam sobre as vigas de rolamento. Para expressar melhor, a Tabela 1 traz as devidas informações de cada carga separadamente referente à ponte rolante univiga. Já a Tabela 2 demonstra as informações da ponte rolante biviga.

Tabela 1 - Cargas atuantes referentes a ponte rolante univiga

CARGAS	VALOR	un. med.	VALOR	un. med.
Peso da carga içada	15	ton	150	kN
Peso próprio do trole	3,8	ton	38	kN
Peso próprio da ponte rolante	4,9	ton	49	kN
Peso próprio do trilho (TR37)	0,03711	ton/m	0,3711	kN/m
Peso próprio da viga rolamento VR1 (concreto)	0,6125	ton/m	6,125	kN/m
Peso próprio viga rolamento VR3 (aço)	0,074	ton/m	0,74	kN/m

Fonte: do autor.

Tabela 2 - Cargas atuantes referentes a ponte rolante biviga

CARGAS	VALOR	un. med.	VALOR	un. med.
Peso da carga içada	40	ton	400	kN
Peso próprio do trole	4	ton	40	kN
Peso próprio da ponte rolante	27,6	ton	276	kN
Peso próprio do trilho (TR37)	0,03711	ton/m	0,3711	kN/m
Peso próprio da viga rolamento VR2 (concreto)	1,1	ton/m	11	kN/m
Peso próprio viga rolamento VR4 (aço)	0,14	ton/m	1,4	kN/m

Fonte: do autor.

Os pesos próprios das duas pontes rolantes foram obtidos através da Equação 1 e as informações da carga içada e peso próprio do trole a ser empregado para a ponte rolante univiga, foram baseadas no Artigo da Gerdau sobre vigas de rolamento (MACHADO, 2018). Já para a ponte rolante biviga essas mesmas informações foram retiradas do catálogo da Abus, no Anexo B deste trabalho. E, ainda, o tipo de trilho foi baseado no catálogo da Koch, no Anexo C deste trabalho.

A partir destes resultados é possível observar uma grande diferença para cada tipo de ponte rolante, afetando significativamente no dimensionamento de cada seção. Por atuarem de maneira distintas uma das outras, as cargas foram analisadas separadamente, onde tem-se as cargas uniformemente distribuídas, sendo as cargas permanentes, que são os pesos próprios do trilho e da viga de rolamento de concreto ou aço. Essas últimas, têm o peso final das seções indicado, considerando que já estão adequadamente dimensionadas e serão descritas nos próximos itens do trabalho.

Já as demais cargas são tratadas como móveis, sendo feita a soma do conjunto de ponte rolante, trole e carga içada, que nada mais é uma carga pontual que se movimenta ao longo do elemento estrutural em que se aplica, neste caso, a viga de rolamento. Isso deve ser analisado por linhas de influência e, posteriormente, gerada envoltória de esforços cortantes e momento fletor. Estas linhas de influência e envoltórias foram geradas pelo *software* Ftool, e serão apresentadas no item a seguir.

Lembrando que as pontes rolantes também são bi-apoiadas, então estes valores se dividirão proporcionalmente para ambos os apoios, que são duas vigas de rolamento. Assim, foi considerado que a pior situação de carregamento na VR seria quando o trole com o peso içado estaria na posição mais próxima possível de um dos apoios da ponte rolante, como cada ponte tem propriedades diferentes, gerou-se esforços diferentes para cada dimensionamento.

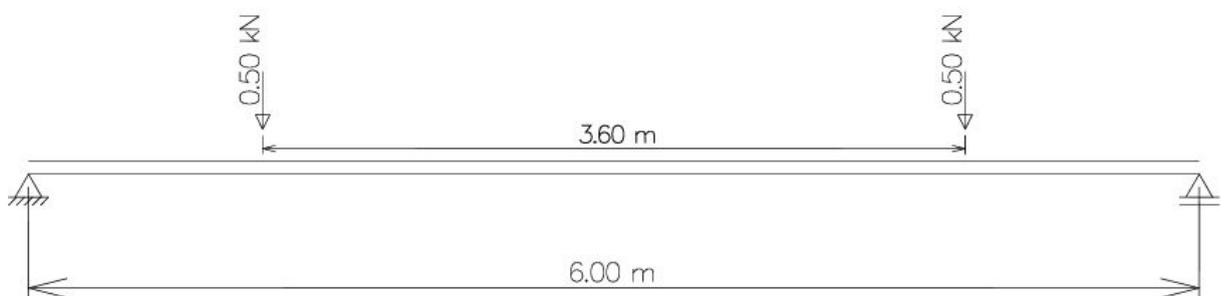
3.5 Modelagem no *software*

Uma das ferramentas mais utilizadas para análise estrutural bidimensional é o *software* Ftool, devido a sua simplicidade e poder de cálculo, pois ele traz esforços solicitantes e deformações para estruturas hiperestáticas e isostáticas.

Para a análise da carga móvel, o próprio *software* Ftool posiciona a carga em diversos pontos da VR, simulando uma movimentação gerando linhas de influência. Se informado ao *software* as características do trem tipo que representa a ponte rolante em “Load Train”, ele aplica essas cargas nas diversas posições, obtendo diagramas de cortante e momento fletor para cada ponto analisado. De forma automática, ele junta todos os diagramas gerando envoltórias de esforços cortantes e momentos fletores.

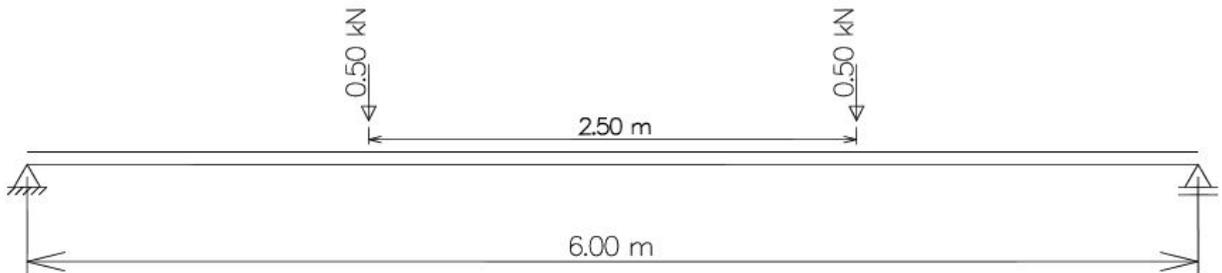
No presente estudo foram feitos dois modelos bidimensionais de viga de rolamento bi-apoiada no Ftool, um para cada tipo de ponte rolante. Para melhor entendimento a Figura 14 apresenta o modelo para a ponte rolante univiga e a Figura 15 apresenta o modelo para ponte rolante biviga.

Figura 14 - Modelo bidimensional da VR para ponte rolante univiga



Fonte: do autor.

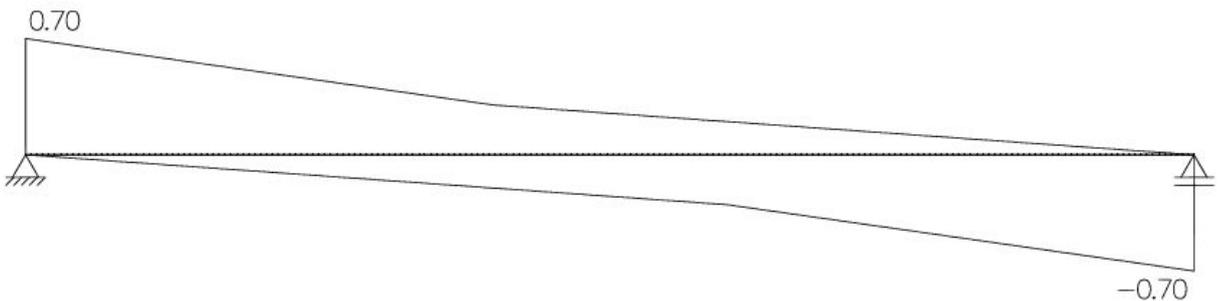
Figura 15 - Modelo bidimensional da VR para ponte rolante biviga



Fonte: do autor.

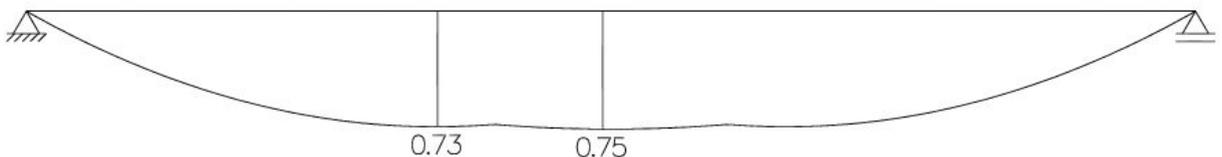
Aplicou-se uma carga total com um valor simbólico de 1, que se divide em dois pontos, que seriam os eixos das rodas da viga de cabeceira. A intenção foi obter os resultados gerados pelo modelo de forma unitária e posteriormente utilizá-los para um cálculo mais detalhado em uma planilha de dimensionamento no Excel elaborada pelo estudante. Para análise dos esforços gerados pelas cargas móveis, foi necessária a geração de envoltórias de esforços cortantes e de momento fletor. As Figuras 16 e 17 demonstram as a envoltórias de esforços cortantes e do momento fletor, respectivamente para a ponte rolante univiga.

Figura 16 - Envoltória de esforços cortantes oriundos da ponte rolante univiga (kN)



Fonte: do autor.

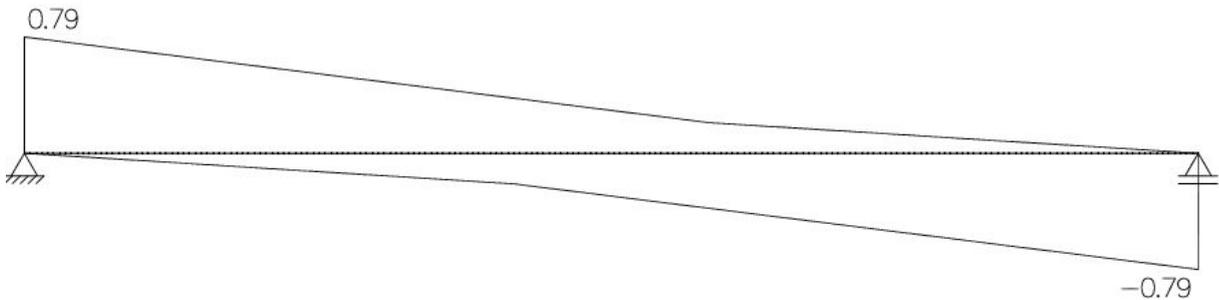
Figura 17 - Envoltória de momentos fletores oriundos da ponte rolante univiga (kN.m)



Fonte: do autor.

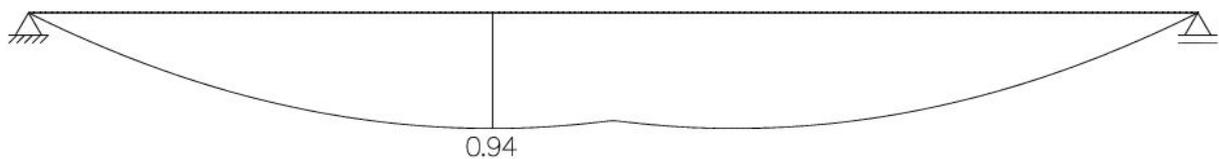
As Figuras 18 e 19 demonstram o mesmo só que agora para a ponte rolante biviga.

Figura 18 - Envoltória de esforços cortantes oriundos da ponte rolante biviga (kN)



Fonte: do autor.

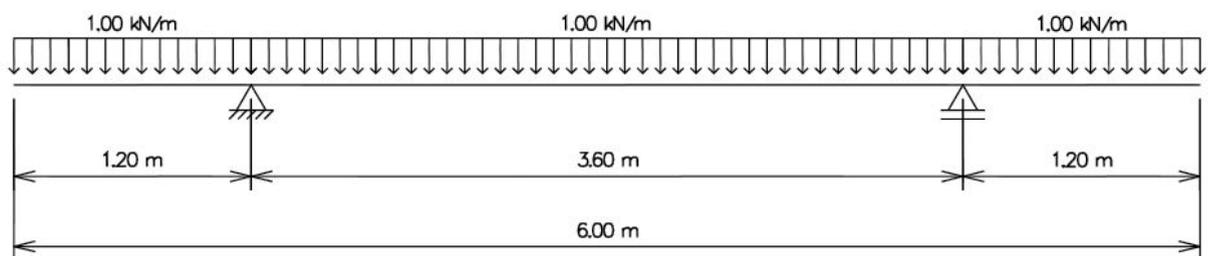
Figura 19 - Envoltória de momentos fletores oriundos da ponte rolante biviga (kN.m)



Fonte: do autor.

Para a VR de concreto armado pré-fabricado foi necessário a elaboração de outro modelo bidimensional, pelo fato da viga ser içada, tanto para o saque da fôrma como para o seu manuseio, em pontos intermediários colocados para que seu centro gravitacional fique estável, então isto fez com que tivesse um esforço diferente de cortante e um momento negativo, a Figura 20 demonstra esse modelo analisado.

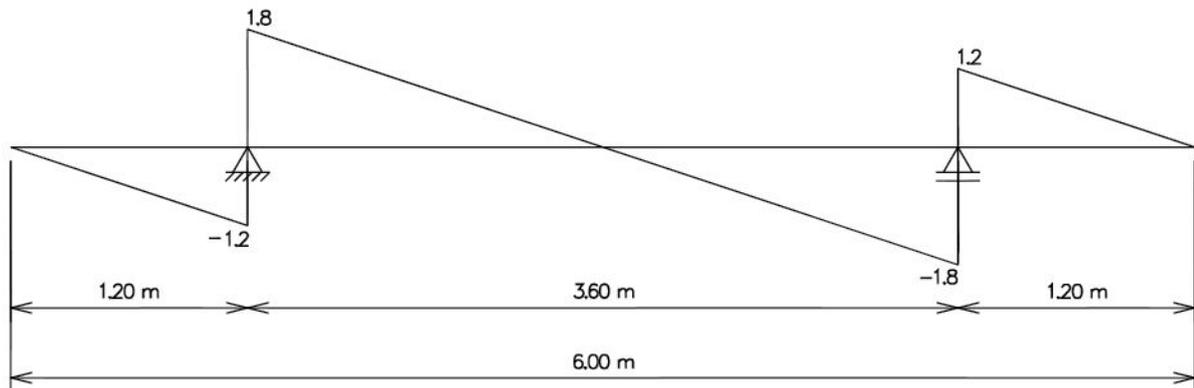
Figura 20 - Modelo bidimensional para o içamento da VR em concreto armado pré-fabricado



Fonte: do autor.

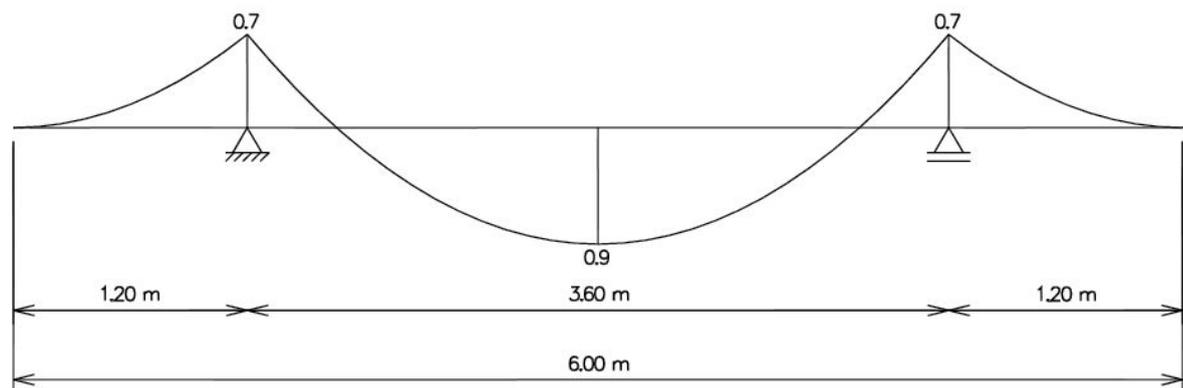
Foi adotado o mesmo padrão de lançamento de uma carga com um valor unitário simbólico, para que o cálculo final seja gerado pela planilha de dimensionamento de Excel, neste caso a carga é do seu peso próprio, então é tratada como uniformemente distribuída. Após o lançamento, gerou-se os esforços cortantes e momentos fletores para a mesma, demonstrados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Esforços cortantes oriundos do içamento da VR (kN)



Fonte: do autor.

Figura 22 - Esforços de momentos fletores oriundos do içamento da VR (kN.m)



Fonte: do autor.

3.6 Esforços solicitantes

Para análise dos esforços solicitantes, considerou-se somente as ações que estariam atuando na viga de rolamento mais solicitada, ou seja, no apoio da ponte rolante mais próximo ao trole. Com isso apresentam-se nas Tabelas 3 e 4 os dados das pontes rolantes e cargas atuantes sobre as VR, sendo feita uma análise do deslocamento de cargas no sentido transversal, transição do trole sobre a ponte rolante. Para a pior situação foi considerado que o trole estaria com o peso içado na posição mais próxima possível da VR, já o peso próprio da ponte é dividido igualmente nos dois apoios.

Tabela 3 - Análise do sentido transversal para a ponte rolante univiga

AÇÃO	VALOR
Vão da ponte rolante (m)	22
Distância mín. do trole até a viga de rolamento (m)	1,3
Peso içado e trole na viga de rolamento (kN)	176,89
Peso da ponte rolante na viga de rolamento (kN)	24,5

Fonte: do autor.

Tabela 4 - Análise do sentido transversal para a ponte rolante biviga

AÇÃO	VALOR
Vão da ponte rolante (m)	36
Distância mín. do trole até a viga de rolamento (m)	0,9
Peso içado e trole na viga de rolamento (kN)	429,00
Peso da ponte rolante na viga de rolamento (kN)	138

Fonte: do autor.

A análise do deslocamento das cargas no sentido longitudinal, transição da ponte rolante sobre a VR, considerou também a pior situação, carga máxima içada e na posição mais crítica. Para esta análise, foi considerado os momentos e cortantes de cargas unitárias gerados pelo Ftool já apresentados no item anterior e sintetizados nas Tabelas 5 e 6. Vale destacar que as duas primeiras linhas indicam resultados da análise da carga móvel e as duas últimas são exclusivamente para o içamento da viga de concreto pré-fabricada.

Tabela 5 - Análise do sentido longitudinal para a ponte rolante univiga

AÇÃO	VALOR
Envoltória de esforços do cortante (kN)	0,7
Envoltória do momento fletor (kN.m)	0,75
Momento para o içamento da VR de concreto (kN.m)	-0,7
Cortante para o içamento da VR de concreto (kN)	1,8

Fonte: do autor.

Tabela 6 - Análise do sentido longitudinal para a ponte rolante biviga

AÇÃO	VALOR
Envoltória de esforços do cortante (kN)	0,79
Envoltória do momento fletor (kN.m)	0,94
Momento para o içamento da VR de concreto (kN.m)	-0,7
Cortante para o içamento da VR de concreto (kN)	1,8

Fonte: do autor.

A partir destes resultados, pode-se obter os esforços de cortante e momento para as cargas da ponte rolante e conjunto do trole com o içado atuantes na VR, fazendo-se o produto dos resultados das Tabelas 3 e 4, com os resultados das Tabelas 5 e 6, para as demais cargas, que seriam os pesos próprios das VR e do trilho, são feitas através dos cálculos tradicionais para cortante e momento. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 7 e 8 para cada ponte em separado.

Tabela 7 - Esforços para ponte rolante univiga

AÇÃO	Cortante Vk (kN)	Momento Mk (kNm)
Carga içada + Peso próprio do trole	123,82	132,67
Peso próprio da Ponte rolante (univiga)	17,15	18,38
Peso próprio do trilho (TR37)	1,11	1,67
Peso próprio da viga de rolamento (aço)	2,22	3,33
Peso próprio da viga de rolamento (concreto)	18,38	27,56
Peso próprio da viga de rolamento (concreto) para içamento	33,08	-19,29

Fonte: do autor.

Tabela 8 - Esforços para ponte rolante biviga

AÇÃO	Cortante Vk (kN)	Momento Mk (kNm)
Carga içada + Peso próprio do trole	338,91	403,26
Peso próprio da Ponte rolante (univiga)	109,02	129,72
Peso próprio do trilho (TR37)	1,11	1,67
Peso próprio da viga de rolamento (aço)	4,20	6,30
Peso próprio da viga de rolamento (concreto)	33,00	49,50
Peso próprio da viga de rolamento (concreto) para içamento	59,40	-34,65

Fonte: do autor.

A partir destes resultados obtidos, faz-se as combinações necessárias para dar início ao dimensionamento das VR, sendo elas as combinações de ELU Normal, ELU de construção (para viga de rolamento de concreto pré-fabricado), ELU de fadiga e ELS rara, que serão descritas no próximo item.

3.7 Combinações

As combinações para análise não foram feitas através das cargas, mas sim através dos esforços de cortante e momento fletor. Isto se justifica devido ao caráter diferente das cargas, parte delas é estática e parte significativa é móvel. Além disso, essa abordagem é correta pois foi feita a análise linear elástica, logo, combinar forças ou combinar esforços leva aos mesmos resultados finais. Foram feitos quatro tipos de combinações, sendo as de ELU normal, de construção e referente à fadiga e ELS rara. Apenas na viga de aço não foi feita combinação ELU de construção, pois nessa fase o perfil já está consolidado e estaria sujeito a esforços menores do que na fase de uso.

Para gerar os Estados Limites Últimos e de Serviço é feito a combinação dos esforços com o seus respectivos coeficientes, esses que já foram apresentados no item 2.4 deste trabalho, onde é realizado uma verificação para cada combinação, sendo que a condição mais crítica irá comandar o dimensionamento. As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores finais de ambas as pontes aplicadas para cada combinação, onde já foi feito o produto dos esforços com seus coeficientes de ponderação e majoração e o somatório de todas elas combinadas.

Tabela 9 - Combinações para ponte rolante univiga

MATERIAL	COMBINAÇÃO	CORTANTE - Vd (kN)	MOMENTO - Md (kN.m)
CONCRETO	ELU de Construção	19,72	7,67
	ELU Normal	253,17	282,09
	ELU de Fadiga Mín	19,49	29,23
	ELU de Fadiga Máx	174,56	195,38
	ELS rara	161,58	181,95
AÇO	ELU Normal	232,06	250,42
	ELU de Fadiga Mín	3,33	5,00
	ELU de Fadiga Máx	158,40	171,15
	ELS rara	143,19	154,37

Fonte: do autor.

Tabela 10 - Combinações para ponte rolante biviga

MATERIAL	COMBINAÇÃO	CORTANTE - Vd (kN)	MOMENTO - Md (kN.m)
CONCRETO	ELU de Construção	34,55	13,44
	ELU Normal	753,40	910,18
	ELU de Fadiga Mín	34,11	51,17
	ELU de Fadiga Máx	526,84	637,45
	ELS rara	483,16	585,82
AÇO	ELU Normal	715,75	853,71
	ELU de Fadiga Mín	5,31	7,97
	ELU de Fadiga Máx	498,04	594,25
	ELS rara	452,13	539,28

Fonte: do autor.

3.8 Dimensionamento

O dimensionamento consiste em utilizar os dados de esforços cortantes e momentos fletores das combinações ELU e ELS para obter-se as armaduras e a seção de concreto armado e definir as dimensões da seção em aço.

3.8.1 Seção concreto armado pré-fabricado

Para as vigas em concreto armado foram considerados os métodos que a NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 9062 (ABNT, 2017) dispõem para calcular as armaduras longitudinais de flexão e as transversais, que são os estribos. Também necessitou-se considerar a armadura de pele, visto que a altura da viga é superior a 60 cm. Atentou-se também que para a NBR 9062 (ABNT, 2017) que cita que para elementos pré-fabricados podem ser adotados coeficientes de minoração dos materiais que diferenciam da NBR 6118, sendo eles os coeficientes de segurança $\gamma_c = 1,3$ para o concreto e $\gamma_s = 1,10$ para a armaduras. Como apoio, foi elaborada uma planilha em Excel com todo método programado.

Sendo considerado a resistência do concreto com o f_{ck} de 30 MPa aos seus 28 dias e com uma resistência mínima de 18 MPa na data de içamento, sendo essa 24 horas depois da concretagem.

Em relação ao cobrimento mínimo, a NBR 9062 (ABNT, 2017), regulamenta que para qualquer barra da armadura, seja ela de montagem, principal, distribuição ou estribo, considera-se o mesmo estabelecido na NBR 6118.

3.8.2 Seção aço

Já para as vigas em aço deve-se também fazer as considerações e aplicação dos métodos para verificar a seção indicados na NBR 8800. O dimensionamento considerou a resistência à flexão e ao cortante. Na análise à flexão, foram avaliados todos os modos de flambagem local da alma e da mesa e global relativo a flexão lateral com torção. Em relação ao cortante, não foi necessária a consideração de enrijecedores de alma. Toda a análise também foi feita em uma planilha em Excel com todo método programado. O tipo de aço que será adotado é o mais convencional no mercado atual, o ASTM A 572 grau 50.

3.9 Verificação dos deslocamentos verticais ELS

Os resultados, obtidos pelo modelo do Ftool, combinados conforme a combinação rara, indicada na Equação 15 e os coeficientes são os mesmos já indicados no Quadro 2 cujo o valor desta combinação está mencionado nas Tabelas 9 e 10, assim, a partir deste resultado de

combinação, analisou-se verificações para deslocamentos provocados pela carga permanente e separadamente os deslocamentos provocados pela carga móvel em sua posição mais crítica.

Para a VR de concreto armado pré-fabricado foi feita também a verificação da abertura de fissuras, considerando o momento gerado pela combinação de ELS, já citada, após isso foi feita a verificação da flecha imediata e diferida e para obter esses valores foi considerado a fluência do concreto igual a 1,9, a favor da segurança, como prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para a VR de aço, considerou-se somente o deslocamento vertical, as flechas de ambas as VR foram obtidas através da Equação 17 para as cargas distribuídas uniformemente (cargas permanentes) e para as cargas concentradas (cargas móveis) através da Equação 16, gerando uma flecha para cada carga separada, após somou-se todos esses deslocamentos, chegando assim ao resultado de flecha máxima que não pode ultrapassar o limite estabelecido por norma que foi considerado $L/600$, sendo L o vão da VR.

3.10 Verificação da fadiga

A verificação da fadiga é feita através da variação de tensão, por isso se tem os valores de mínimos e máximos, onde seguiu-se o proposto pelo item 2.4.2 deste trabalho, sendo ainda necessário a indicação do número de ciclos, para definir essa variação de tensões durante a vida útil de projeto da estrutura. A favor da segurança será adotado uma média de um ciclo a cada dez minutos, em uma jornada de trabalho de oito horas diárias, gerando um total de 48 ciclos por dia, ao longo de uma vida útil de 50 anos como indicam as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 8800 (ABNT, 2008), totalizando 876000 ciclos.

3.11 Comparações

Após obtidos todos os dados do dimensionamento das VR, foram feitas as comparações dos resultados obtidos, com a intenção de indicar qual o material tem melhor custo-benefício, menor flecha e qual material teria o menor peso próprio.

Com o intuito de obter resultados mais coerentes como base para os custos foram feitos três orçamentos em empresas ambientadas no Rio Grande do Sul e capacitadas para

fornecer este tipo de elemento estrutural, sendo empresas de fabricação de pré-moldados e metalúrgicas. Essas forneceram os valores de venda dos produtos que oferecem, sem considerar o valor de projeto, transporte e montagem, que normalmente é contabilizado. Resumindo, o valor final apresentado foi a soma de materiais envolvidos e os custos com produção e/ou fabricação.

A comparação será feita para cada conjunto de VR (aço e concreto) para cada ponte rolante, já que essas têm propriedades diferentes uma da outra, por exemplo, para a ponte rolante univiga se obteve um perfil para a VR de aço e uma seção de concreto armado pré-fabricado, então será feita as comparações já citadas para estas entre si. O mesmo será feito com os resultados obtidos para a ponte rolante biviga, comparando as VR dimensionadas para tal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos para o dimensionamento das vigas de rolamento feito através de planilha Excel, além do Ftool. A partir disso, foram realizadas as comparações relacionadas à diferença de peso próprio e deslocamentos verticais, quantitativos de materiais e custos envolvidos para a produção das vigas de rolamento para cada ponte rolante: univiga e biviga.

Para facilitar a apresentação dos resultados, as vigas de rolamento foram nomeadas da seguinte forma:

- a) viga de rolamento de concreto armado para ponte rolante univiga: VR 1 - 35x70;
- b) viga de rolamento de concreto armado para ponte rolante biviga: VR 2 - 40x110;
- c) viga de rolamento de aço para ponte rolante univiga: VR 3 - W460x74;
- d) viga de rolamento de aço para ponte rolante biviga: VR 4 - W610x140.

4.1 Apresentação dos resultados do dimensionamento

Com o dimensionamento, a verificação dos deslocamentos verticais e a verificação da fadiga concluídos, pode-se gerar um detalhamento de projeto para todas as VR, apresentado nas Apêndices A, B, C e D.

4.1.1 Viga de rolamento em concreto armado pré-fabricado

Cada tipo de combinação serviu para um propósito diferente no método de cálculo e cada uma delas está apresentado na Tabela 11, onde os valores apresentados são os calculados e não os realmente utilizados. Para a verificação da abertura de fissuras foi considerada a classe de agressividade de grau dois com o CAA igual a 0,3mm, conforme prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014). Os limites de tensão da armadura para a fadiga vai de acordo com a bitola de armadura adotada, que para este caso foi o de 105 MPa para barras retas ou dobradas e 85 MPa para estribos, também como indica a mesma norma.

Tabela 11 - Combinações e valores calculados

COMBINAÇÃO	CALCULADO	Área de aço (flexão)	Área de aço (cortante)
ELU normal	Área de armadura para flexão e para cortante	VR1 = 9,92 cm ² VR2 = 20,01 cm ²	VR1 = 1,07 cm ² /m VR2 = 8,04 cm ² /m
ELU construção	Área de armadura para flexão e para cortante de içamento	VR1 = 0,25 cm ² VR2 = 0,28 cm ²	VR1 = 4,06 cm ² /m VR2 = 4,64 cm ² /m
ELU fadiga	Tensões máx. e mín. (limites 105 para flexão e 85 para cortante conforme NBR6118)	VR1 = 105,00 MPa VR2 = 104,98 MPa	VR1 = 85,00 MPa VR2 = 82,75 MPa
ELS	Abertura de fissuras (limite CAA = 0,3 mm, conforme NBR6118)	VR1 = 0,05 mm VR2 = 0,04 mm	

Fonte: do autor.

Para cada tipo de ponte rolante gerou-se um dimensionamento das vigas de rolamento em separado e após isso se fez uma tabela com o quantitativo de aço necessário e também o volume de concreto a ser utilizado. Essas informações serviram para realizar o orçamento, pois entende-se que as empresas necessitam de um projeto estrutural para isso, então o mesmo foi fornecido, considerando também os métodos construtivos para as VR. A Tabela 12 apresenta a armadura dimensionada, ainda traz o peso final da armadura e o volume de concreto, este que foi considerado com resistência à compressão de f_{ck} igual a 30 MPa, já mencionado no trabalho.

Tabela 12 - Dimensionamento das duas vigas de rolamento em concreto

ARMADURA	VR 1 - 35x70 (univiga)	VR2 - 40x110 (biviga)
Superior	2 x Ø16 mm	4 x Ø16 mm
Inferior	8 x Ø20 mm	12 x Ø25 mm
Pele	2x4 x Ø10 mm	2x4 x Ø12,5 mm
Transversal (estribos)	2 ramos Ø10 mm c/ 13 cm	4 ramos Ø12,5 mm c/ 12 cm
Estribos Horizontais	2x2 x Ø10 mm	2x3 x Ø12,5 mm
Estribos Suspensão	2x3 x Ø10 mm	2x3 x Ø12,5 mm
Peso total da armadura	256,4 kg	675,1 kg
Volume de Concreto (30 MPa)	1,47 m ³	2,64 m ³

Fonte: do autor.

Como pode-se observar, a taxa de aço ficou com 174,4 kg/m³ para a VR que suporta a ponte rolante univiga e 255,7 kg/m³ para a que suporta a ponte biviga, a fadiga foi um forte condicionante para o dimensionamento, como pode-se observar as áreas de aço calculadas são inferiores às adotadas, isso se deu pelo fato da variação das tensões geradas, tendo que ser aumentada a seção e a armadura para conseguir atender o proposto pela norma.

Então por consequência disso e com base nos dados apresentados, nota-se uma elevada taxa de aço para ambas as vigas, principalmente para a VR2 que suporta a ponte rolante biviga, isso devido à alta carga aplicada, considerando que a mesma é pontual se movimentando sobre a VR. Buscou-se no dimensionamento, atender todas as condições com o mínimo possível de armadura e seção de concreto, para obter um orçamento com um bom custo-benefício.

4.1.2 Viga de rolamento em aço

Para o dimensionamento das VR em aço, o tipo de aço que foi considerado foi o ASTM A 572 grau 50 e perfil laminado. Estas que também foram dimensionadas em separado por tipo de ponte rolante. Considerando a ponte univiga, para iniciar a verificação foi adotado um perfil inicial de W 610x125, após concluído o dimensionamento foi visto que o mesmo poderia ser diminuído para também deixá-lo com maior aproveitamento possível, sendo adotado o perfil W 460x74 para a VR3. Para a VR4 da ponte rolante biviga, o perfil inicial

não foi aprovado, teve que ser aumentado para que o dimensionamento atendesse todos os requisitos propostos, por fim, ficou definido o perfil W 610x140. A Tabela 13 apresenta os resultados do dimensionamento dos perfis metálicos.

Tabela 13 - Dimensionamento das duas vigas de rolamento em aço

PERFIL	RESISTÊNCIA AO CORTANTE - V_{sd}/V_{rd} (kN)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO - M_{sd}/M_{rd} (kN.m)
VR 3 - W 460 x 74,0 Laminado	29,98%	98,85%
VR 4 - W 610 x 140,0 Laminado	47,06%	99,88%

Fonte: do autor.

Nos resultados apresentados, observa-se que ambas as VR estão praticamente no limite quanto a sua resistência à flexão, sendo que é considerado o perfil aprovado quando não ultrapassa os 100% de utilização da seção. Já a resistência ao cortante não é tão requisitada assim, então não fazendo-se necessário o uso dos enrijecedores.

4.2 Pesos próprios

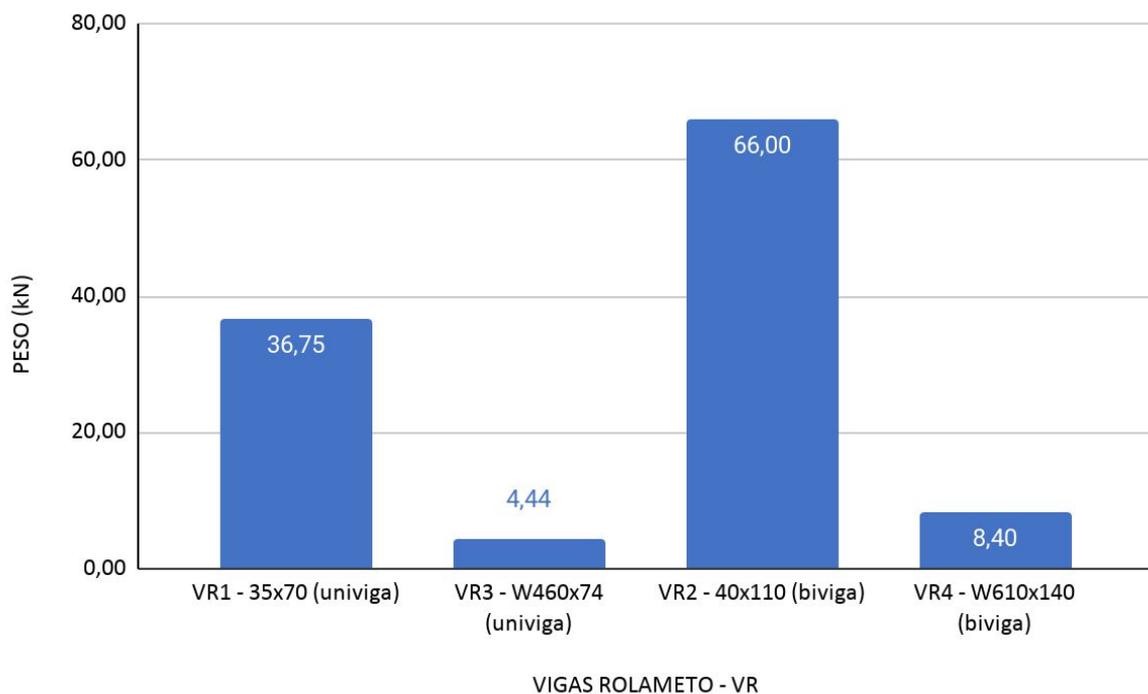
Os pesos próprios foram definidos a partir do momento que obteve-se as seções e perfis verificados pelo dimensionamento. Assim, para as VR de aço faz-se o produto da massa por metro indicado no perfil pelo comprimento total da VR. Já para a VR de concreto armado pré-fabricado, é feito o produto do volume de cada viga pelo valor de 2500 kg/m³, conforme indica a NBR 6118 (ABNT, 2014). Demonstrando esses dados, segue a Tabela 14 e a Figura 23 com o gráfico comparativo.

Tabela 14 - Pesos próprios

MATERIAL	VIGAS ROLAMENTO - VR	MASSA (kg)	PESO (kN)
CONCRETO	VR1 - 35x70 (univiga)	3.675,00	36,75
	VR2 - 40x110 (biviga)	6.600,00	66,00
AÇO	VR3 - W460x74 (univiga)	444,00	4,44
	VR4 - W610x140 (biviga)	840,00	8,40

Fonte: do autor.

Figura 23 - Gráfico comparativo dos pesos próprios



Fonte: do autor.

Como já mencionado, o comparativo foi feito da VR1 x VR 3, para ponte rolante univiga e a VR 2 x VR 4, para ponte rolante biviga e como já era esperado, as VR de aço são muito mais leves do que as de concreto, com uma grande diferença de peso entre elas.

Para o primeiro grupo de comparação, a ponte univiga, tem-se uma diferença de 3231 kg, totalizando 727,7% de diferença de peso em relação a uma VR da outra. Para o segundo grupo de comparação, ponte biviga, uma diferença de 5760 kg, totalizando 685,7% de

diferença de peso. Podendo ser considerado assim as VR de aço mais leves para a estrutura de uma maneira global para a edificação.

Essa diferença de peso pode impactar em diversos fatores, um deles seria a facilidade de transporte até a obra, o manuseio e içamento da peça, onde para isso a VR de aço teria vantagem, a disponibilidade de um veículo como caminhão munck ou guindaste para a montagem da obra também é um seria um ponto positivo, pois um veículo menor com capacidade de içamento limitado, poderia chegar em locais de difícil acesso, agilizando a montagem da obra e podendo trazer um menor custo de orçamento final do valor global da edificação.

Mas nem sempre o material mais leve é o melhor para uma construção, em termos de estabilidade da edificação como um todo, uma VR com mais peso poderia garantir-lá. Enfim, são aspectos que o engenheiro responsável deverá ter atenção na escolha do projeto, em questão de segurança, como elemento único, ambas as VR estão atendendo os requisitos necessários.

4.3 Deslocamentos verticais

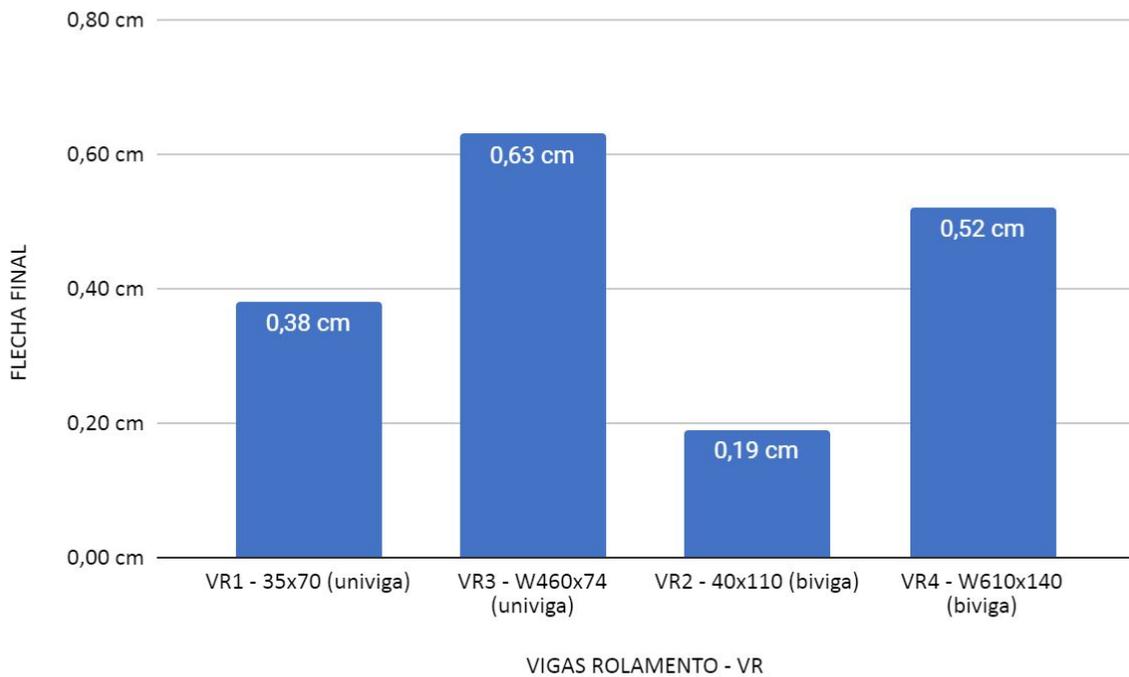
Os deslocamentos verticais, que são as flechas imediata e diferida, foram verificados e durante o dimensionamento se garantiu que estariam dentro do limite indicado por norma. Visto que se não atendessem, o mesmo estaria em inconformidade com as normas regentes e o comparativo ficaria prejudicado. Para cada VR tem-se a flecha final apresentados na Tabela 15 e na Figura 24 é demonstrado o gráfico comparativo das mesmas.

Tabela 15 - Deslocamentos verticais (flechas)

MATERIAL	VIGAS ROLAMENTO - VR	FLECHA LIMITE (L/600)	FLECHA FINAL
CONCRETO	VR1 - 35x70 (univiga)	1,00 cm	0,38 cm
	VR2 - 40x110 (biviga)	1,00 cm	0,19 cm
AÇO	VR3 - W460x74 (univiga)	1,00 cm	0,63 cm
	VR4 - W610x140 (biviga)	1,00 cm	0,52 cm

Fonte: do autor.

Figura 24 - Gráfico comparativo dos deslocamentos verticais (flechas)



Fonte: do autor.

Nas informações de flechas apresentadas nota-se uma boa diferença entre elas nos grupos de comparação, na comparação das VR 1 x VR 3, tem-se uma diferença de 0,25 cm, onde a VR de concreto tem menor flecha que a de aço, com 65,8% de diferença de flecha final. Para a comparação das VR 2 x VR 4, há uma diferença de 0,33 cm, sendo a VR de concreto a que tem menor flecha também nesse caso, com 173,7% de diferença de flecha final.

Mas esse não é um fato que seja condicionante para o projeto de VR, visto que se ambas as VR estão dentro do limite estipulado por norma, estas estariam atendendo a conformidade de projeto, mesmo o aço tendo uma maior flecha. Isso já era esperado, visto que seu módulo de elasticidade é maior, então ele consegue voltar a sua forma antiga com facilidade, o que já não acontece com o concreto, este que tem efeitos diferidos. O fato da resistência dos dois materiais terem uma grande diferença entre si, 345 MPa para o aço e 30 MPa para o concreto, faz com que sua seção seja muito menor, logo isso reduz a sua inércia, que no final sofre com maiores deslocamentos verticais. Neste caso todos os valores foram

apresentados com suas flechas finais devido ao seu tempo de uso, e estariam atendendo o limite proposto por norma, então todas estariam atendendo este quesito.

4.4 Comparação dos custos envolvidos

Os projetos das vigas foram encaminhados para três empresas de cada ramo de produção, de pré-fabricados e de elementos metálicos, todas situadas no Vale do Taquari-RS, que apresentaram seus preços de vendas finais. Para demonstrar os valores obtidos, a Tabela 16 traz o orçamento de cada empresa e o valor médio.

Tabela 16 - Orçamento das vigas de rolamento

MATERIAL	VIGAS ROLAMENTO - VR	Empresa A	Empresa B	Empresa C	MÉDIA
CONCRETO	VR1 - 35x70 (univiga)	R\$ 3.423,00	R\$ 3.540,00	R\$ 4.100,00	R\$ 3.687,67
	VR2 - 40x110 (biviga)	R\$ 8.200,00	R\$ 6.358,00	R\$ 8.900,00	R\$ 7.819,33
AÇO	VR3 - W460x74 (univiga)	R\$ 5.098,00	R\$ 6.660,00	R\$ 4.995,00	R\$ 5.584,33
	VR4 - W610x140 (biviga)	R\$ 9.645,00	R\$ 12.600,00	R\$ 9.450,00	R\$ 10.565,00

Fonte: do autor.

Com base nos valores apresentados, pode-se destacar que ambas as VR de concreto armado pré-fabricado tem o custo bem inferior que as de aço. Por ter-se valores bem distintos entre os orçamentos, o mais indicado é fazer um comparativo com os menores valores de cada grupo, então para a ponte rolante univiga, o menor valor da VR de concreto foi da Empresa A R\$3.423,00 e a de aço foi da Empresa C R\$4.995,00, tendo uma diferença de R\$1.572,00, já para a ponte rolante biviga, onde o menor valor para VR de concreto foi de R\$6.358,00 e a de aço foi de R\$9.450,00, apresentando uma diferença de R\$3.092,00, são valores bem significativos que podem impactar bastante no custo final da obra.

Vale destacar que em virtude da Pandemia, o atual momento do mercado vive uma escassez de matéria-prima, pois as indústrias tiveram seu quadro de funcionários reduzidos para não ocasionar aglomerações, o consumo de material se manteve e isso resultou na falta de produtos, gerando um aumento dos valores de comércio.

4.5 Comparativos finais

Como demonstrado nos itens anteriores, a VR de concreto tem seu peso muito elevado em comparação com a de aço, envolvendo maiores custos com transportes, guindastes adequados para içamento. Também seria necessário pilares e fundações mais robustos na edificação, para suportar essa carga. Mas mesmo assim, pode-se dizer que a VR de concreto armado pré-fabricado seria o melhor material de aplicação, pois a diferença de preço é bem relevante entre elas. Tendo em vista que uma ponte rolante normalmente é aplicada em grandes pavilhões, podendo ultrapassar os 100 metros de rolamento, então a quantidade de VR se somariam o que representaria uma diferença ainda maior no custo final da obra.

Todos os valores apresentados se deram somente para este um elemento estrutural da edificação, e para avaliar qual é o material mais adequado o engenheiro deve estudar com cuidado a edificação como um todo, de uma maneira global do empreendimento. Já que nem sempre o material com o menor valor de orçamento, pode trazer um menor custo final da obra.

5 CONCLUSÃO

Por fim, ao concluir o dimensionamento das quatro vigas de rolamento com auxílio do *software* Ftool e planilhas no Excel, o objetivo geral do presente trabalho que era comparar aço e concreto armado pré-fabricado para vigas de rolamento, foi atendido. Onde foi proposto duas situações diferentes para comparativos, sendo elas, a ponte rolante univiga com capacidade de 15 toneladas e a ponte rolante biviga com capacidade de 40 toneladas.

A partir do dimensionamento das vigas de rolamento em concreto armado pré-fabricado, verificou-se que a VR1 teve uma taxa de aço com $174,4 \text{ kg/m}^3$, e a VR2 com $255,7 \text{ kg/m}^3$, sendo que esses valores não são comuns para vigas. Isso se justifica pelo fato da carga aplicada ser pontual, que já é uma situação desfavorável em uma estrutura, e se movimentar sobre a VR, ocasionando uma alta tensão em um curto período de tempo. Com essa variação de carregamento e descarregamento sobre a VR, a fadiga desse elemento se tornou um forte condicionante no dimensionamento, fazendo com que a área de aço a ser utilizada seja muito maior que a calculada para flexão.

Já para o dimensionamento das vigas de rolamento de aço, a fadiga não se sobrepôs às demais verificações. O fato do aço ter o módulo de elasticidade maior que o de concreto, fez com que a viga consiga retornar a sua forma inicial sem gerar fissuração. A resistência à flexão foi a verificação que mais está sendo solicitada no dimensionamento, com valores bem próximos a 100%, mas dentro do limite, e por isso, os perfis foram considerados aprovados.

O comparativo dos pesos próprios tiveram uma grande diferença para cada tipo de material, o que já era esperado, sabendo que o aço poderia ter um perfil com seção menor a do concreto. As diferenças foram de 727,7% para a comparação das VR que suportam a ponte rolante univiga e 685,7% para as que suportam a ponte biviga. Essas elevadas diferenças, são um aspecto importante na escolha do projeto mais adequado, pois as VR de concreto, apresentando um peso tão elevado, podem trazer custos a mais para a obra em que forem empregadas, sendo eles de transportes, guindastes e até segurança quanto ao manuseio das VR.

A análise dos deslocamentos verticais atenderam o limite estipulado por norma, então ambas estariam em conformidade, mesmo o aço apresentando uma maior flecha com diferença do aço para o concreto armado pré-fabricado de 0,25 cm e 0,33 cm para univiga e biviga, respectivamente. Isso se deu pelo fato de a seção de aço ser muito menor que a de concreto, reduzindo significativamente a sua inércia, e gerando maiores deslocamentos verticais. O limite estipulado por norma foi de 1 cm, e como todas as VR tiveram que ser dimensionadas já atendendo este quesito, todas elas estariam aptas para uso.

Com o comparativo de custos da viga de rolamento como um elemento estrutural único, pôde-se avaliar qual material de fato seria o melhor a ser empregado para a viga de rolamento, sendo a VR de concreto armado pré-fabricado a mais favorecida, pois teve um custo bem menor em comparação com a de aço. Considerando que normalmente os pavilhões que têm ponte rolante tem uma via de rolamento extensa, para fazer valer o seu uso de transporte, o custo da viga de rolamento acaba impactando bastante no custo final de toda a edificação.

Dessa forma, considera-se que o objetivo geral do trabalho foi atingido, assim como todos os objetivos específicos e para avaliar qual realmente é o melhor material, o engenheiro responsável deve analisar com atenção a edificação de uma maneira global considerando o empreendimento, pois nem sempre o material com o menor valor de orçamento, pode trazer um menor custo final da obra. Neste caso as VR de concreto apresentaram o menor valor, mas tem um elevado peso próprio, influenciando no dimensionamento de toda estrutura, ocasionando pilares mais robustos, e por consequência, as fundações também necessitam ser

maiores. Assim, toda a obra acaba ficando com maior quantidade de materiais e mão de obra, impactando em transporte, maior controle e gerenciamento e demais setores. Então cabe somente ao responsável técnico pelo empreendimento a decisão final de qual melhor material a ser utilizado para o seu tipo de obra.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 10084**: Cálculo de estruturas-suportes para equipamentos de elevação e movimentação de cargas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2020.

ABUS. **Ponte Rolante**. Rio Grande do Sul, 2019.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em aço**: projeto e cálculo. 6 ed. São Paulo: Pini, 2006.

Bravo Metal Engenharia. **Pontes Rolantes**. Paraná, 2019. Disponível em <<https://www.bravometal.com/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

BRITO, André L. S.; COSTA, João V.; LEMOS, Lucas S.; NASCIMENTO, Leonardo S. **Projeto**: ponte rolante univiga. 2017. 45 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos. Disponível em <https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20172_TAI3_Ponterolante.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2020.

CALENZANI, Adenilcia F. G.; FERREIRA, Walnório G.; SALGADO, Rafael A. **Análise estrutural e dimensionamento de vigas de rolamento de aço de acordo com a NBR**

8800:2008. Pirenópolis: Z.J.G.N Del Prado, 2013. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/314089200_Analise_estrutural_e_dimensionamento_de_vigas_de_rolamento_de_aco_de_acordo_com_a_nbr_88002008>. Acesso em: 05 abr. 2020.

CAMILLO, Carolina A. **Análise estrutural e dimensionamento de galpões usuais de pré-moldado de concreto.** 2010. 170 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em <<https://needoc.net/analise-estrutural-e-dimencional-de-galpoes-pre-moldados>>. Acesso em: 09 mar. 2020.

CARDIN, Jonathan C. L. **Dimensionamento de vigas de rolamento de ponte rolante em concreto protendido.** 2019. 71 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28139/1/DimensionamentoVigaRolamento.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

COSTA, Humberto C. **Aplicação de técnicas de modelagem e controle em sistemas tipo ponte rolante.** 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Curso Engenharia Elétrica. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.pgee.ime.eb.br/pdf/humberto_costa.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

EL DEBS, Mounir K. Almofadas de argamassa modificadas em ligações de estruturas de concreto pré-moldado. **Industrializar em concreto.** Abcic. São Paulo, 9ª edição. Página 58-65. Dezembro 2019. Disponível em <<http://www.industrializaremconcreto.com.br/Edicoes/Edicao/2715>>. Acesso em: 20 out. 2020.

FABEANE, Ricardo; FICANHA, Ricardo; PRAVIA, Zacarias M. C. **Verificação à fadiga de vigas de rolamento de pontes rolantes industriais.** In: _____. Congresso da construção mecânica. 2012. Disponível em <https://www.abcem.org.br/construmetal/2012/arquivos/Cont-tecnicas/apresentacoes/14_VE_RIFICACAO-A-FADIGA-DE-VIGAS-DE-ROLAMENTO-DE-PONTES-ROLANTES-INDUSTRIAIS.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2020.

MACHADO, Camila da S. **Vigas de Rolamento com perfis estruturais Gerdau.** Disponível em <<https://www2.gerdau.com.br/downloadable-resource/vigas-de-rolamento-com-perfis-estruturais-gerdau>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

MARGARIDO, Aluizio F. **Fundamentos de estruturas.** São Paulo: Zigurate, 2007.

MOVISERVI. **Pontes Rolantes.** São Paulo, 2020. Disponível em <<http://www.moviservi.com.br/produtos/ver/139/fabrica-o-e-manuten-o-de-pontes-rolantes-conforme-as-normas-nbr-8400>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

GOMES, Paulo A. **Dimensionamento de vigas de rolamento presentes em edifícios industriais**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30717/1/Dimensionamento%20de%20vigas%20de%20rolamento%20presentes%20em%20edif%C3%ADcios%20industriais%20-%20Paulo%20A%20Gomes%20-%20DEES-UFMG%2C%202017.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

GONÇALVES, Roberto M.; MALITE, Maximiliano, SALES, José J. **Edifícios industriais em aço com ponte rolante: exemplo de cálculo**. 1999. 126 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em <http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/6214/Sales,JoseJairo_EdificiosIndustriaisAcoPonteRolante.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 mai. 2020.

KOCH Metalúrgica. **Ponte Rolante**. Rio Grande do Sul. 2017.

LEITE, Luiz R.S. **Análise numérica de vigas de rolamento de aço sem contenção lateral entre apoios**. 2016. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2017ME_LuizRafaelSantosLeite.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2020.

LONARDONI, Thiago; SILVA, Leopoldo M. **Projeto de atualização tecnológica de uma ponte rolante aplicada na indústria siderúrgica**. 2018. 259 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11724/1/CT_COELE_2018_2_04.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2020.

PAULA, Geraldo D.; PIMENTA, José C. C.; SOUZA, Flávio T. Influência da geometria e do posicionamento dos enrijecedores na resistência da viga de rolamento à fadiga. In: _____. **Revista científica do ITPAC**. Araguaína: 2019. v. 12 n. 2 p. 33. Disponível em <https://assets.unitpac.com.br/arquivos/revista/vol-12-num-2-ago-2019/artigo-4.pdf?_hstc=220468295.c4a577029c49e44b73bd3bee6fa38565.1578096000153.1578096000154.157809600155.1&_hssc=220468295.1.1578096000156&_hsfp=814434119>. Acesso em: 20 mai. 2020.

PENTAS PRÉ-FABRICADOS. **Pontes Rolantes**. Nova Odessa, 2012. Disponível em <<https://www.pentax.com.br/>>. Acesso em: 04 abr. 2020.

PRAVIA, Zacarias M. C. **Estabilidade de estruturas de pontes metálicas com fraturas**. 2003. 150 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/43237825/estabilidade-de-estruturas-de-pontes-metalicas-com-fraturas>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

RODRIGUES, Camila. **Sistematização do cálculo e verificação de sistemas estruturais de galpões pré-fabricados de concreto**. 2012. 197 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de

pós-graduação em estruturas e construção civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4676/4584.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 mar. 2020.

SANTOS, Andreilton P. **Análise estrutural de galpões atirantados de concreto pré-moldado**. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2010ME_AndreiltondePaulaSantos.pdf. Acesso em: 13 mar. 2020.

SENA, Larissa V. T. **Contribuições ao dimensionamento de vigas de rolamento em aço com contenção lateral entre os apoios**. 2017. 228 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/24999>. Acesso em: 27 abr. 2020.

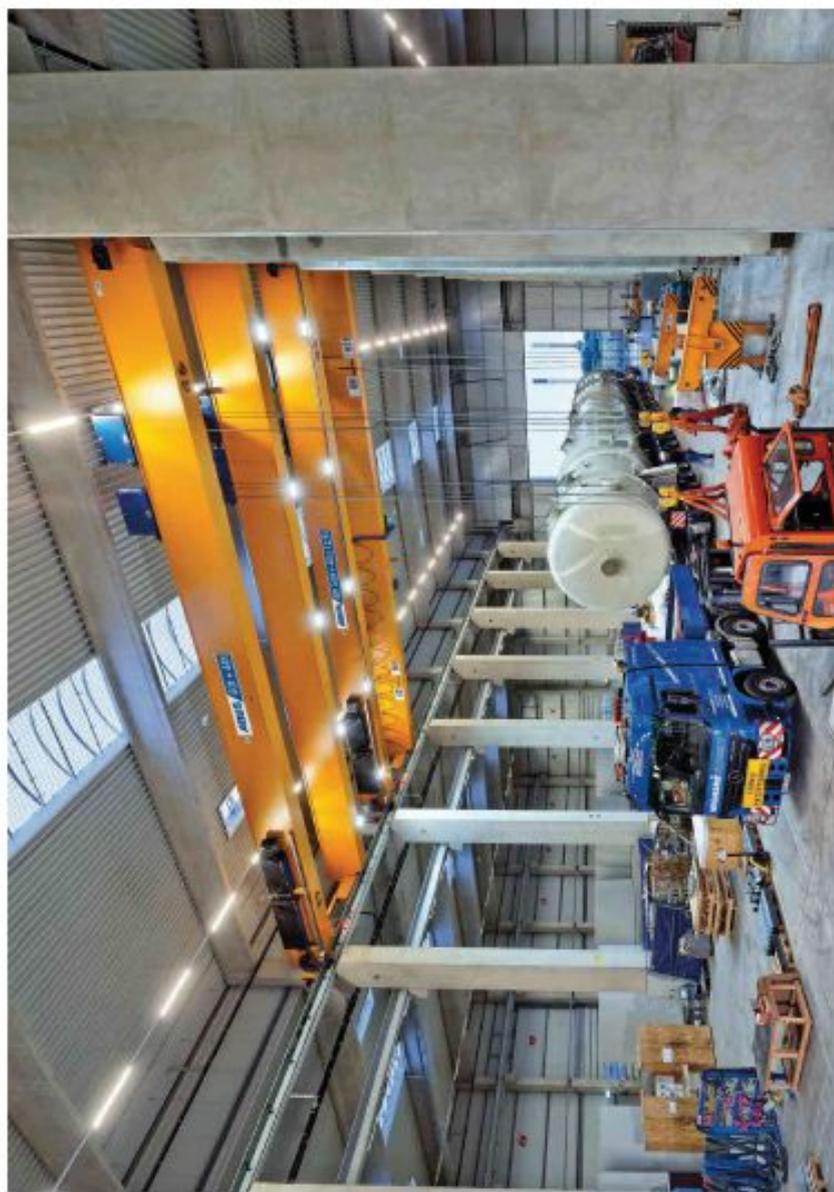
SORDI, Giovani. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante**. 2016. 60 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Centro Universitário Univates, Lajeado. Disponível em <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1263/1/2016GiovaniSordi.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2020.

ANEXO A - Catálogo GERDAU

Ponte Rolante		Trole		Viga de rolamento					
Capacidade de içamento (tf)	Vão livre (m)	Distância entre rodas (mm)	Reação vertical máx. por roda (tf)	Distância entre apoios (m)					
				5	6	7	8	10	12
2	10	3100	1,90	W 250 x 32,7	W 310 x 38,7	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0
	14	3100	2,10	W 250 x 32,7	W 310 x 44,5	W 360 x 58,0	W 360 x 64,0	W 530 x 101,0	W 610 x 125,0
	18	3600	2,30	W 250 x 32,7	W 310 x 44,5	W 360 x 58,0	W 360 x 64,0	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0
	22	3600	3,20	W 250 x 38,5	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0
	26	4200	3,50	W 250 x 38,5	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0
3,2	10	3100	3,20	W 250 x 44,8	W 360 x 58,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0
	14	3100	3,40	W 250 x 44,8	W 360 x 58,0	W 360 x 64,0	W 460 x 89,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0
	18	3600	3,90	W 250 x 44,8	W 360 x 58,0	W 360 x 64,0	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0
	22	3600	4,50	W 250 x 44,8	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0
	26	4200	5,10	W 250 x 44,8	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0
5	8	2400	2,90	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 109,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	12	2800	3,23	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 109,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	16	3200	3,52	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 109,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	20	3200	3,95	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 109,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	24	3400	4,35	W 310 x 52,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 530 x 109,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
6,3	8	2400	3,66	W 410 x 60,0	W 360 x 64,0	W 530 x 109,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	12	2800	3,88	W 410 x 60,0	W 360 x 64,0	W 530 x 109,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	16	3200	4,26	W 410 x 60,0	W 360 x 64,0	W 530 x 109,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	20	3200	4,60	W 410 x 60,0	W 360 x 64,0	W 530 x 109,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
	24	3400	5,15	W 410 x 60,0	W 360 x 64,0	W 530 x 109,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0
8	12	2800	4,83	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0
	16	3200	5,20	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0
	20	3200	5,65	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0
	24	3400	6,55	W 360 x 72,0	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0
	10	8	2400	5,35	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0
12		2800	5,80	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	
16		3200	6,25	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	
20		3200	6,70	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	
24		3400	7,56	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	
12,5	10	3100	7,90	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	14	3100	8,60	W 360 x 72,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	18	3600	9,20	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	22	3600	9,90	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	26	4200	10,7	W 360 x 79,0	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
13	8	2800	6,80	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	12	2800	7,40	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	16	3200	7,95	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	20	3200	8,40	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
	24	3400	9,34	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0	
15	10	3100	9,90	W 360 x 79,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	14	3100	10,70	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	18	3600	11,40	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	22	3600	12,40	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	26	4200	13,20	W 460 x 97,0	W 610 x 125,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
16	8	2800	8,48	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	12	2800	9,20	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	16	3200	9,79	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	20	3200	10,50	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
	24	3400	11,20	W 530 x 101,0	W 610 x 140,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0		
20	8	2800	10,40	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0		
	12	2800	11,10	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0		
	16	3200	11,80	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0		
	20	3200	12,60	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0		
	24	3400	13,30	W 610 x 113,0	W 610 x 155,0	W 610 x 155,0	W 610 x 174,0		

ANEXO B - Catálogo ABUS

Pontes rolantes ABUS de dupla viga ZLK: Especialistas para casos de peso.



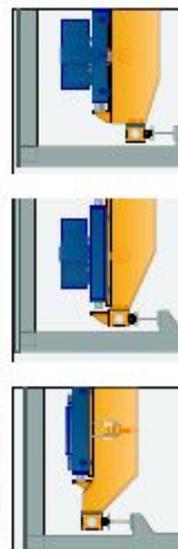
Tipo	Capacidade (t)	Vão máx. (m)
ZLK Ponte rolante de viga com viga de caixa aberta	até 40	40
	até 60	37
	até 100	30

Em duplo e mais resistente, assim as pontes rolantes ABUS de dupla viga são a primeira escolha para o transporte elevado de cobertura de cargas pesadas até 120 t. Como todas as pontes rolantes ABUS de uso interno elas são, através de diferentes variantes construídas, particularmente integráveis em construções planejadas novas ou existentes e garantem, a qualquer tempo, o máximo em funcionalidade, flexibilidade e conforto de operação.

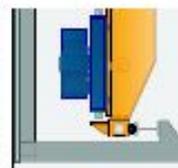
O programa de acessórios ABUS oferece, além disso, uma grande quantidade de complementos especiais para soluções específicas. As pontes rolantes de dupla viga ABUS estão disponíveis na versão ZLK, com viga principal tipo caixa soldada. Todas os perfis das vigas principais e das cabeceras são otimizados por cálculo computadorizado, e unem assim capacidade operacional máxima com redução peso próprio. Vantagens que

se pagam esteticamente e financeiramente. As pontes rolantes ABUS de dupla viga são produtivas com vãos de até 40 m e oferecem as melhores condições para altas velocidades de transporte, especialmente maior velocidade de travessia de pontes rolantes, a instalação de passantes de manutenção, trocas com passantes ou talhas auxiliares.

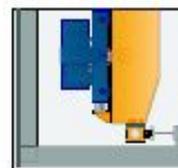
Variantes de construção de vigas principais para ajuste às condições individuais dos prédios



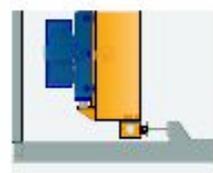
Modelo robusto*



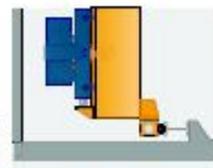
Fixação pendulo



Modelo elevado Variante 2



Modelo elevado Variante 3



Modelo elevado Variante 4



Modelo elevado Variante 5

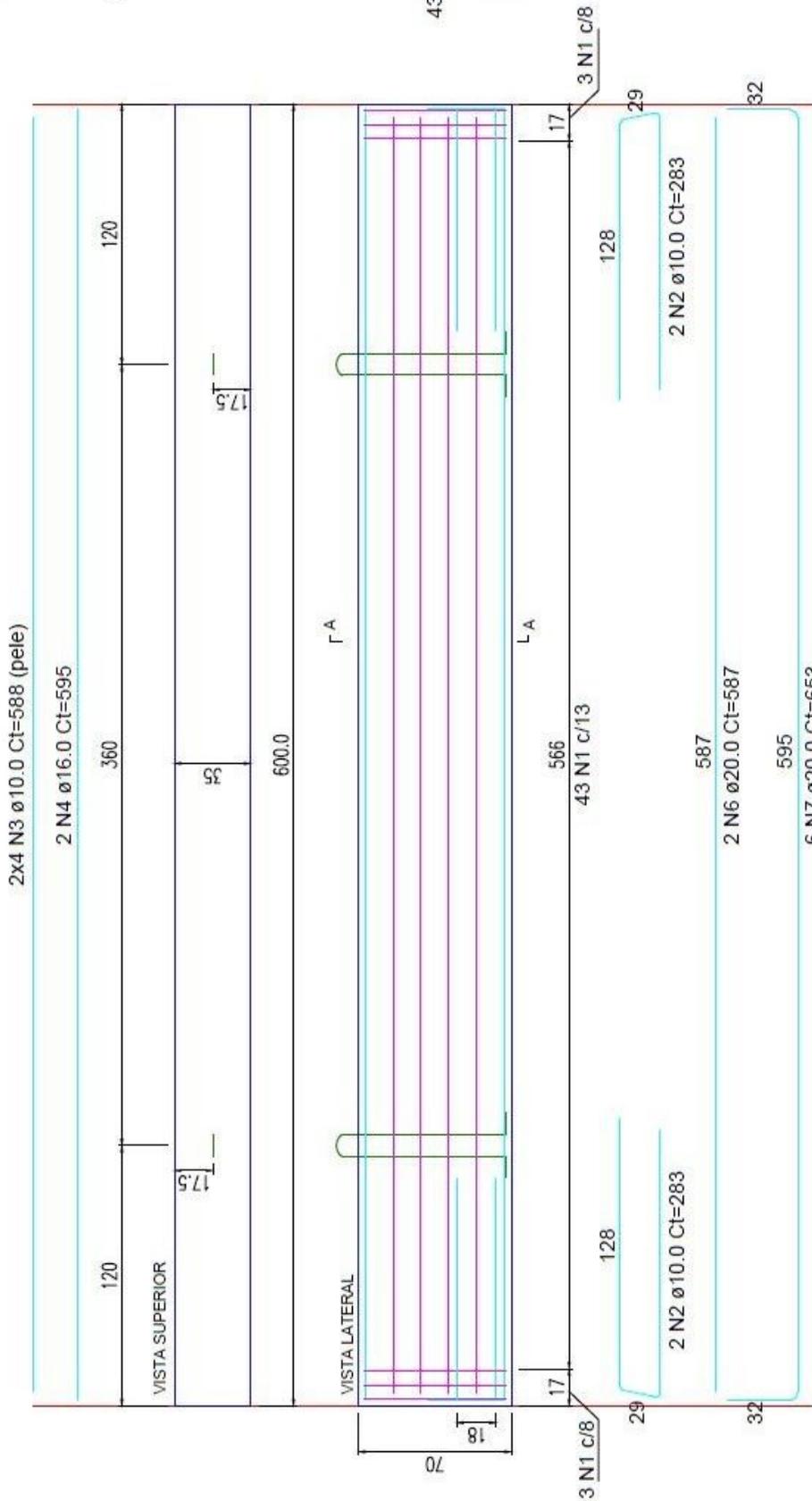
* aqui em combinação com trechos auxiliares

ANEXO C - Catálogo KOCH

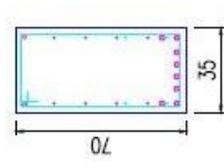
Capacidade (T)	Grupo de Mecanismo	Tipos de Talha	Viga	Velocidade Transversal (m/min)	Velocidade Longitudinal (m/min)	Elevação (m)	Vão máximo da viga	Distância mínima do caminho de rolamento até o teto (mm)	Tensão (3F+N) (V)	Trilho Caminho de rolamento (mm)
Pequeno Porte Monoviga										
0,5			W	8,5	20,0/3,33	6,00	12	515		Barra Chata 2"X1"
1	NBR-DIN 1Am	Talha elétrica de correntes com trole motorizado	W	8,5	32,0/5,3	6,00	12	515	220V 380V 440V (60Hz)	Barra Chata 2"X1"
2,5	FEM-ISO M4		W	8,5	32,0/5,3	6,00	12	515		Barra Chata 2"X1"
5			W	8,5	32,0/5,0	6,00	12	515		Barra Chata 2"X1"
Médio Porte Monoviga										
3			W	16,0/2,6	30,0/5,0	9,00	12	515		TR25
5	NBR-DIN 1Am	Talha elétrica de cabos de aço com trole motorizado	W	16,0/2,6	19,0/3,2	9,00	12	818	380V 440V (60Hz)	TR25
10	FEM-ISO M4		Caixão	16,0/2,6	26,0/4,3	12,00	20	920		TR37
15			Caixão	16,0/2,6	26,0/4,3	20,00	20	1000		TR37
Médio Porte Dupla viga										
3			W	16,0/2,6	30,0/5,0	9,0	20	515		TR25
5		Carro motorizado com talha elétrica de cabos de aço	W	16,0/2,6	26,0/4,3	9,0	20	818		TR25
10	NBR-DIN 1Am		Caixão	16,0/2,6	26,0/4,3	12,0	20	920	380V 440V (60Hz)	TR37
15	FEM-ISO M4	Caixão	16,0/2,6	26,0/4,3	12,0	20	20	1000		TR37
20			Caixão	16,0/2,6	26,0/4,3	12,0	20	1100		TR37

APÊNDICE A – Detalhamento VR1

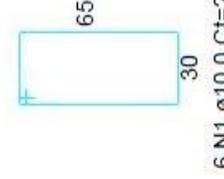
VIGA DE ROLAMENTO PARA PONTE ROLANTE UNIVIGA
VR 1 - (35 x 70cm) - 1x



SEÇÃO A-A



SUSPENSÃO



43 N1 ϕ 10.0 Ct=200
 2 N5 ϕ 16.0 Ct=186

6 N1 ϕ 10.0 Ct=200
 2 N5 ϕ 16.0 Ct=186

RELAÇÃO DO AÇO

ELEMENTO	AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
VR 1 - (35x70)	CA50	1	10.0	49	200	9400
	CA50	2	10.0	4	283	1132
	CA50	3	10.0	8	588	4704
	CA50	4	16.0	2	595	1190
	CA50	5	16.0	2	186	372
	CA50	6	20.0	2	587	1174
	CA50	7	20.0	6	653	3918

RESUMO DO AÇO

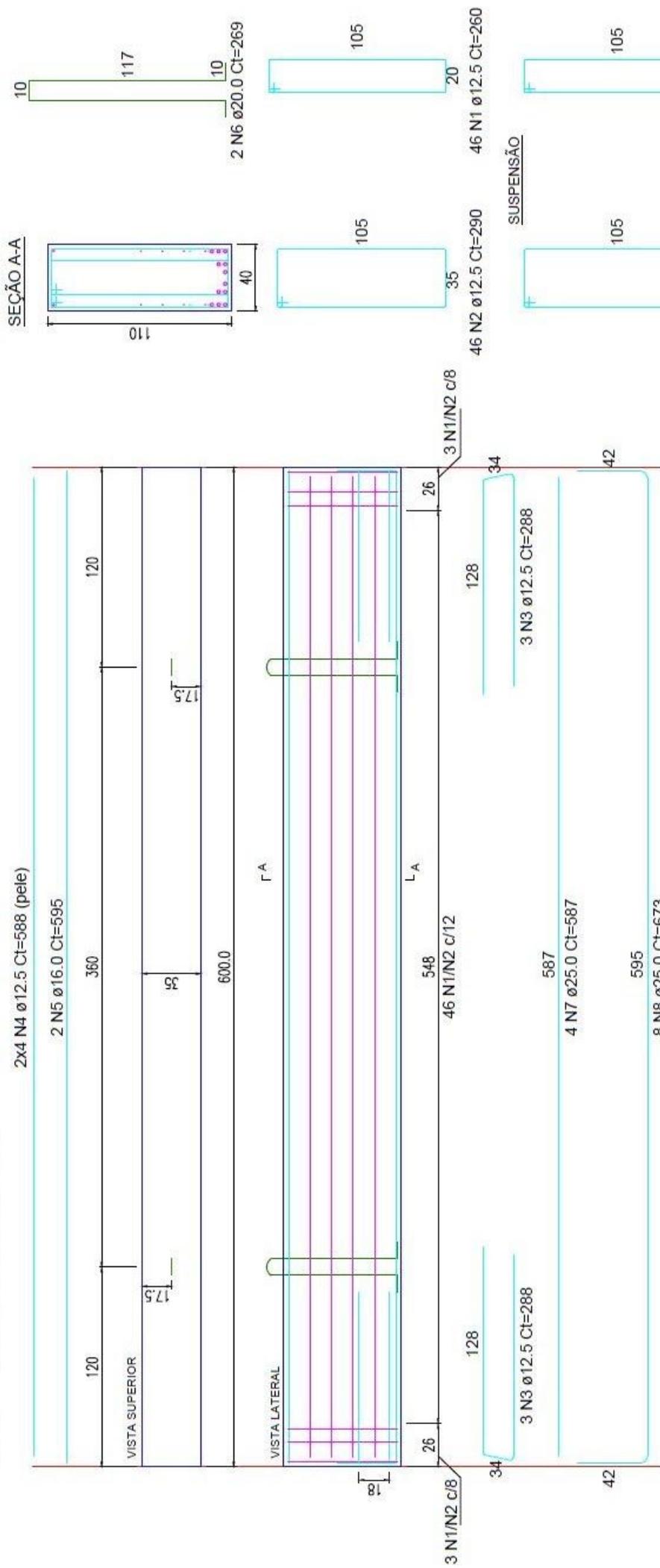
AÇO	DIAM (mm)	C.TOTAL (m)	QUANT + 5% (Barra)	PESO + 5% (kg)
CA50	10.0	152.4	13.3	98.7
	16.0	15.6	1.4	25.9
PESO TOTAL (kg)				131.8
CA50				256.4

Volume de concreto (C-35) = 1,47 m³
 Peso total da peça = 3675 kg

APÊNDICE B – Detalhamento VR2

VIGA DE ROLAMENTO PARA PONTE ROLANTE BIVIAJA

VR 2 - (40 x 110cm) - 1x



RESUMO DO AÇO

AÇO	DIAM (mm)	C. TOTAL (m)	QUANT + 5% (Barra)	PESO + 5% (kg)
CA50	12.5	338.8	29.8	342.8
CA50	16.0	11.9	1.0	19.7
CA50	25.0	117.9	10.3	305.3
PESO TOTAL				
CA50	876.1	Volume de concreto (C-35) = 2,64 m³		
				Peso total da peça = 8600 kg

RELAÇÃO DO AÇO

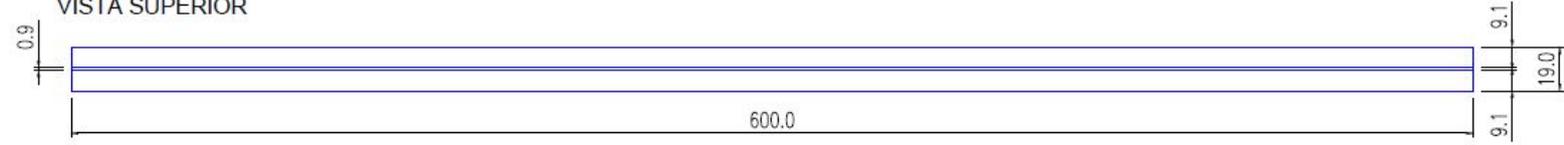
ELEMENTO	AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C. UNIT (cm)	C. TOTAL (cm)
VR 2 - (40x110)	CA50	1	12.5	52	260	15080
	CA50	2	12.5	52	260	13520
	CA50	3	12.5	6	288	576
	CA50	4	12.5	8	588	4704
	CA50	5	16.0	2	595	1190
	CA50	6	20.0	2	269	538
	CA50	7	25.0	4	587	2348
	CA50	8	25.0	8	873	5384

APÊNDICE C – Detalhamento VR3

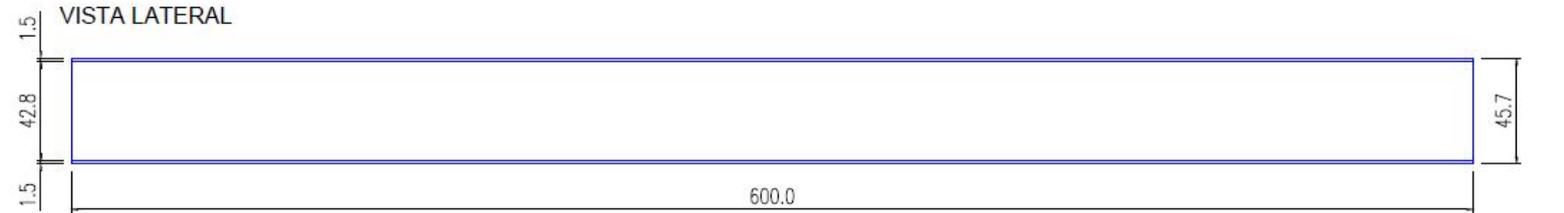
VIGA DE ROLAMENTO PARA PONTE ROLANTE UNIVIGA

VR 3 - W 460 x 74 - 1x

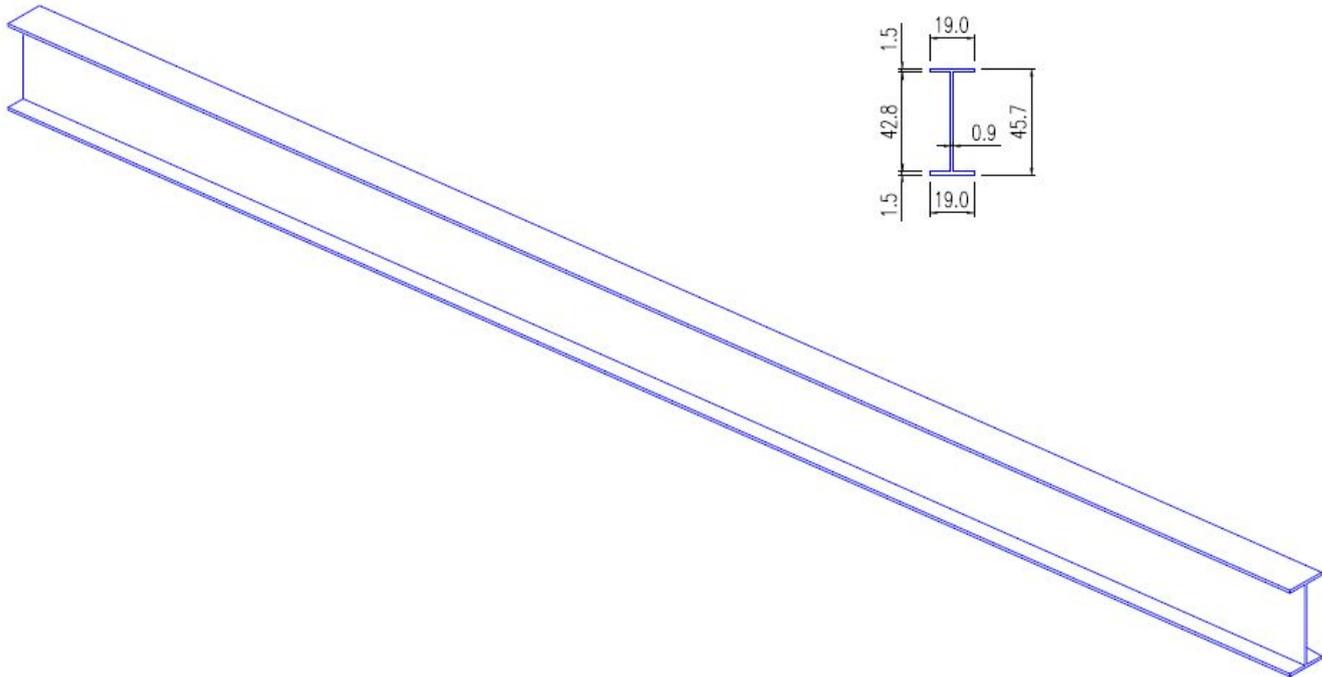
VISTA SUPERIOR



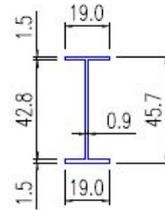
VISTA LATERAL



ISOMÉTRICO



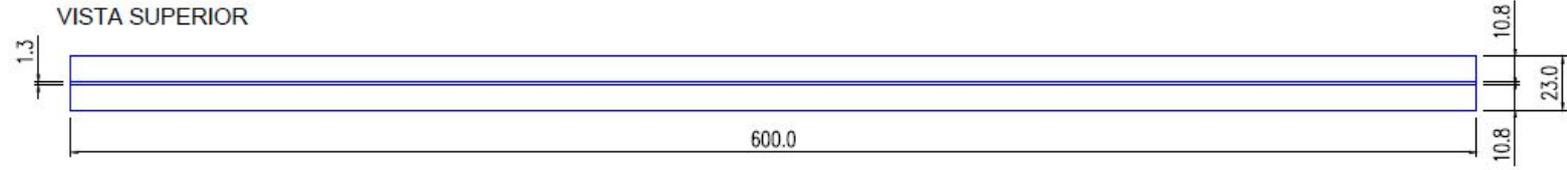
SEÇÃO



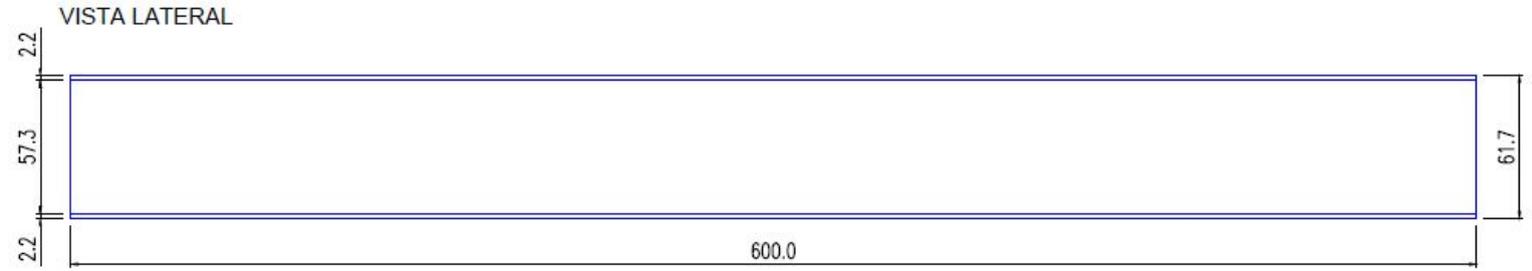
APÊNDICE D – Detalhamento VR4

VIGA DE ROLAMENTO PARA PONTE ROLANTE BIVIGA
VR 4 - W 610 x 140 - 1x

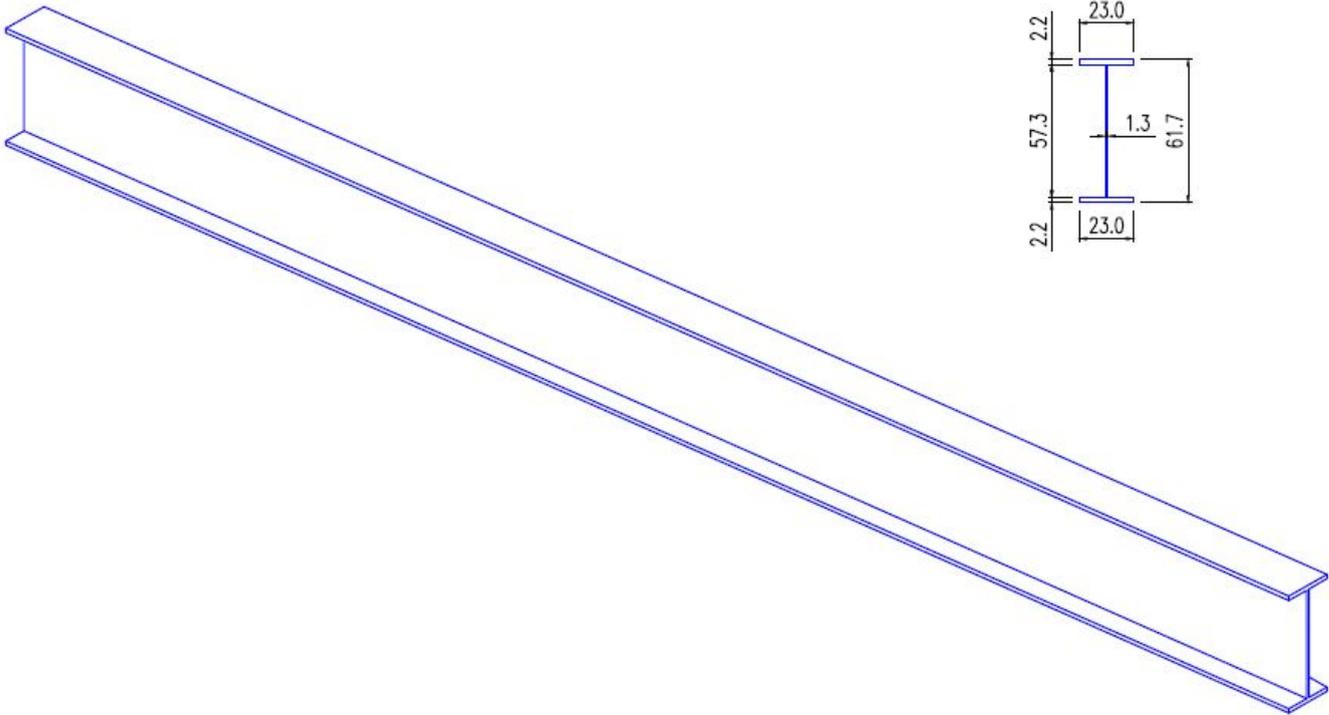
VISTA SUPERIOR



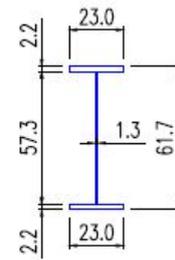
VISTA LATERAL



ISOMÉTRICO



SEÇÃO





UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09