

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

CAMILLE STEFEL
DANIEL MORO

**DIMENSIONAMENTO DE UMA PONTE DE MADEIRA
PARA REGIÕES RURAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

CAMILLE STEFEL

DANIEL MORO

**DIMENSIONAMENTO DE UMA PONTE DE MADEIRA
PARA REGIÕES RURAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Civil.

Orientador: Prof. MSc. Amacin Rodrigues Moreira

CURITIBA

2013

FOLHA DE APROVAÇÃO

DIMENSIONAMENTO DE UMA PONTE DE MADEIRA PARA REGIÕES RURAIS

Por

CAMILLE STEFEL E DANIEL MORO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 30 de Setembro de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Amacin Rodrigues Moreira, MSc.
UTFPR

Prof. Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

Prof. José Manoel Caron, MSc.
UTFPR

RESUMO

O presente trabalho apresenta conceitos básicos e um método de dimensionamento da superestrutura de uma ponte de madeira. São analisados métodos de tratamento da madeira e a escolha de espécies com resistência adequada à construção de pontes. Para o dimensionamento das vigas principais da ponte foi estudado a utilização de seções compostas com uso de anéis metálicos de ligação. O dimensionamento foi feito com base nos critérios da norma de projeto de estruturas de madeira NBR 7190 de 1997 comparados aos da NBR 7190 de 1982.

Palavras chave: Ponte de Madeira. Estrutura de Madeira. Dimensionamento. Anéis metálicos.

ABSTRACT

This dissertation presents a study of standard guidelines and the design of a wooden bridge superstructure. Treatment methods are analyzed and also the choice of wood species with adequate resistance to building bridges. For the design of the main beams of the bridge it was studied the use of composite sections with metal rings binding. The design was dimensioned according to the criteria of the standard design of timber structures NBR 7190 1997 compared to the 7190 NBR 1982.

Keywords: Wooden Bridge. Timber. Structural Design. Metal rings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição em planta das cargas móveis	17
Figura 2 - Veículos Tipo	18
Figura 3 – Vista inferior Ponte Estrada Floresta – Piracicaba/SP	22
Figura 4 - Ponte em vigas com peças roliças compostas	23
Figura 5 - Seção transversal da ponte em vigas roliças	24
Figura 6 - Vista superior da ponte	24
Figura 7 - Vista lateral da ponte em vigas roliças	24
Figura 8 - Posicionamento transversal do veículo-tipo sobre o rodeiro	27
Figura 9 - Posicionamento transversal do veículo-tipo fora do rodeiro	27
Figura 10 - Posicionamento do veículo-tipo para momento fletor e deslocamento vertical máximo	28
Figura 11 - Posicionamento do veículo-tipo para reação de apoio	28
Figura 12 - Posicionamento do veículo-tipo para cortante	29
Figura 13 - Posicionamento crítico de uma roda sobre o tabuleiro	29
Figura 14 - Tabuleiros transversal e longitudinal de pranchas de madeira serrada	34
Figura 15 - Tabuleiros compostos de madeira e concreto.	35
Figura 16 - Ponte com tabuleiro misto de madeira e concreto	36
Figura 17 - Tabuleiros compostos de peças roliças de madeira e concreto	36
Figura 18 - Espaçamentos em ligações com pinos	38
Figura 19 - Espaçamentos em ligações com Anéis Metálicos	40
Figura 20 – Projeto de ponte de madeira sobre o Rio Itaquí - São José dos Pinhais, Paraná	41
Figura 21 – Projeto da ponte de madeira - planta	44
Figura 22 – Projeto da ponte de madeira - elevação	44
Figura 23 – Projeto da ponte de madeira – seção transversal	45
Figura 24 – Carregamento do veículo sobre o tabuleiro	47
Figura 25 – Envoltória de momentos fletores da carga do veículo sobre o tabuleiro	47
Figura 26 – Rodeiro	48
Figura 27 – Guarda-corpo	49
Figura 28 – Linha de influência das ações do veículo sobre o tabuleiro	50
Figura 29 – Carregamento do peso próprio da longarina e reações de apoio	51
Figura 30 – Posicionamento das cargas acidentais para cálculo das reações de apoio	51
Figura 31 – Momento fletor máximo devido às cargas permanentes sobre a longarina	51
Figura 32 – Posicionamento do trem tipo para cálculo do momento fletor máximo	52
Figura 33 – Momento fletor máximo devido às cargas acidentais sobre a longarina	52
Figura 34 – Esforço cortante máximo devido às cargas permanentes sobre a longarina	52
Figura 35 – Posicionamento do trem tipo para cálculo do esforços cortantes	53
Figura 36 – Esforço cortante máximo devido às cargas acidentais sobre a longarina ..	53
Figura 37 – Anel metálico	56
Figura 38 – Esquema de ligação dos anéis metálicos	57

Figura 39 – Verificação dos critérios de distanciamento dos anéis metálicos.....	57
Figura 40 – Distanciamento dos anéis metálicos	57
Figura 41 – Solidarização dos postes do tabuleiro na viga por cintamento.....	58
Tabela 41 – Comparativo do dimensionamento feito nesse trabalho e do projeto de AAD (1998).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carregamentos conforme as Classes de Veículos	17
Tabela 2 - Características do Veículo Tipo	18
Tabela 3 - Fatores de Combinação e Utilização	21
Tabela 4 – Coeficientes de Ações.....	21
Tabela 5 – Altura do tabuleiro para pontes em vigas simples de peças roliças	26
Tabela 6 – Diâmetro médio das longarinas para pontes em vigas simples de peças roliças.....	26
Tabela 7 – Valores de $k_{mod, 1}$	32
Tabela 8 – Valores de $k_{mod, 2}$	33
Tabela 9 – Classe de resistência das dicotiledôneas.....	33
Tabela 10 - Comparativo do dimensionamento feito nesse trabalho e do projeto de AAD (1998).....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCA	Cromo Cobre Arsênio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite de Utilização
NBR	Norma Brasileira

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVO	11
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	11
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1.	ESCOLHA DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA	12
2.2.	TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS.....	14
2.3.	DIFERENÇAS ENTRE A NORMA DE PROJETOS DE ESTRUTURAS DE MADEIRA DE 1982 E DE 1997	15
2.4.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA PONTE 16	
2.4.1.	AÇÕES EM PONTES DE MADEIRA.....	16
2.4.2.	COMBINAÇÕES DE AÇÕES EM PONTES DE MADEIRA.....	20
2.4.3.	PONTES EM VIGA.....	22
2.4.4.	TABULEIROS DE PONTE DE MADEIRA	34
2.4.5.	LIGAÇÕES DE PEÇAS ESTRUTURAIS	36
3.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
3.1.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS UTILIZADOS NO PROJETO DIMENSIONADO CONFORME NBR 7190:1982.....	41
3.2.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA PONTE CONFORME A NBR 7190:1997	42
4.	DIMENSIONAMENTO DA PONTE	43
4.1.	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E DA CLASSE ESTRUTURAL DA PONTE....	43
4.2.	DEFINIÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA.....	45
4.3.	DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS DO TABULEIRO	46
4.4.	DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS.....	48
4.4.1.	ESTIMATIVA DA CARGA PERMANENTE:.....	48
4.4.2.	POSICIONAMENTO TRANSVERSAL DO VEÍCULO-TIPO	50
4.4.3.	CÁLCULO DOS ESFORÇOS MÁXIMOS	51
4.4.4.	COMBINAÇÕES DE AÇÕES	53
4.4.5.	DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS.....	54
4.5.	RECOMENDAÇÕES PARA LIGAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS	56

4.5.1.	POSICIONAMENTO DOS ANÉIS DE LIGAÇÃO NAS LONGARINAS.....	56
4.5.2.	FIXAÇÃO DO TABULEIRO SOBRE AS LONGARINAS.....	58
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
6.	CONCLUSÕES	59
7.	RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMOS ESTUDOS.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

As estradas rurais têm grande importância para o desenvolvimento do país, seja do ponto de vista social ou do ponto de vista econômico, pois devem assegurar a entrada de insumos nas localidades agrícolas, o escoamento da produção e o livre deslocamento das populações do meio rural. Muitas dessas estradas precisam da construção de pontes em algum ponto do seu trajeto. Levando em conta a facilidade de construção e a disponibilidade de recursos materiais deve ser considerada a construção de pontes de madeira.

A resistência da madeira, o baixo peso e o baixo consumo energético para a sua produção e processamento são propriedades essenciais. Ela é capaz de suportar sobrecargas de curta duração sem efeitos nocivos. Ao contrário do que a maioria das pessoas pensa, a madeira é um material estrutural muito bom. Além das excelentes propriedades mecânicas, principalmente a elevada resistência específica, se for tratada corretamente com os materiais certos, as peças apresentam resistência aos organismos deterioradores e ao fogo, sendo assim, possível a construção de grandes estruturas que devem durar por longos períodos como é o caso de pontes.

Como base para o dimensionamento feito neste trabalho foi utilizado um projeto de uma ponte de madeira já executado. Entretanto, os cálculos do projeto foram realizados de acordo com a NBR 7190 de 1982, e agora é utilizada a norma vigente de 1997. Isso gera a necessidade de uma comparação entre as versões da norma.

Este trabalho apresenta os conceitos básicos do sistema construtivo e os cálculos para o dimensionamento da superestrutura de uma ponte de madeira, com base nos critérios da norma de projeto de estruturas de madeira NBR 7190, em vigência.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é dimensionar uma superestrutura de uma ponte de madeira com vão de 10 metros que possa ser utilizado como base em regiões rurais onde a disponibilidade de materiais, equipamentos e mão de obra especializada para construção de uma ponte de concreto seja escassa e a construção necessite ser fácil e

rápida, com base nos critérios da NBR 7190 de 1997 comparados aos da NBR 7190 de 1982.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Constituem-se objetivos específicos deste trabalho:

- Encontrar um modelo apropriado de ponte de madeira que possa ser construído em locais de difícil acesso;
- Identificar uma espécie de madeira adequada para construção de uma ponte no modelo deste trabalho;
- Comparar a norma NBR 7190 do ano de 1997 com a de 1982.

1.2. JUSTIFICATIVA

Dentro dos imensos limites de terra que formam o Brasil existem muitas regiões, principalmente no interior, em pequenos vilarejos, fazendas e reservas ambientais onde é necessário passar por pequenos rios ou valas para se ter acesso a determinados lugares. A solução para essa passagem é a construção de uma ponte que corte esses pequenos rios ou valas e torne possível a fácil transição de veículos, pessoas e criações. Na maioria dos casos, seja pela disponibilidade próxima de materiais, de construtores com técnica construtiva adequada ou de recursos financeiros é mais viável a construção de uma ponte de madeira do que de outros materiais. Como solução para esses casos, será desenvolvido neste trabalho o dimensionamento da superestrutura de uma ponte em que a madeira pode ser utilizada em seu estado rústico, apenas com um tratamento químico, de modo a facilitar a construção dentro dos pré-requisitos citados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ESCOLHA DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA

A classe C50 citada neste trabalho não aparece na norma vigente, entretanto, Calil Junior coloca essa classe em seus manuais.

Segundo Calil Junior (2006), a escolha da espécie de madeira para um determinado uso é uma das etapas mais importantes do projeto, pois para que haja um bom desempenho do material é necessário definir os requisitos de qualidade

necessários ao uso pretendido tais como, propriedades físicas e mecânicas, durabilidade natural, tratabilidade com produtos preservativos e fixação mecânica.

Segundo a ABNT, na NBR 7190 (1997) a escolha do material para elaboração de projetos estruturais deve ser feita com base nas classes de resistência da madeira descritas na própria norma, que tem por objetivo o emprego das madeiras com propriedades padronizadas. Pelos critérios da norma as classes de resistência são divididas entre as coníferas e as dicotiledôneas, sendo que as dicotiledôneas tem maior capacidade de resistência.

Calil Junior (2006) diz que normalmente, as construções de pontes são executadas com madeiras pesadas e de alta resistência que suportam cargas elevadas como a itaúba, jatobá, cumaru, maçaranduba, angico e o eucalipto citriodora. Na região Sul as madeiras mais usadas são as de reflorestamento, como o eucalipto - classes de resistência C40 a C60. No Norte e Nordeste, dá-se preferência ao jatobá, maçaranduba e piquiá, todas de classes de resistência alta - C50 a C60.

Segundo Ponce (1995), quando se pensa em espécies de rápido crescimento como alternativa para produção de madeira, o gênero *Eucalyptus* se apresenta como uma opção potencial das mais importantes não somente por sua capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes, mas, sobretudo, pela grande diversidade de espécies.

Entretanto, de acordo com Francischinelli (2006), o eucalipto apresenta baixa durabilidade natural devido aos agentes xilófagos como fungos e insetos, entre outros, e, portanto, necessitam de um tratamento com produto adequado de forma que, no fim do processo, se obtenha uma coroa externa penetrada e uma absorção de produto químico suficientes para inibir o processo de deterioração biológica.

Segundo Moreschi (2009) outro fator que deve ser observado é a grã. Ela refere-se ao arranjo e direção dos elementos anatômicos em relação ao eixo da árvore ou das peças de madeira. Pode ser classificada em reta, irregular e espiral.

Na grã reta, os elementos anatômicos se dispõem mais ou menos paralelos ao eixo da árvore ou peça de madeira, o que facilita a serragem. Típica em madeira de árvores que apresentam fibras orientadas em mais de um sentido, a grã irregular geralmente trata-se de uma característica genética, própria da espécie, como, por exemplo, espécies tropicais. A grã irregular também pode ser causada pelo crescimento irregular ou muito rápido da madeira, pela existência de um tecido de cicatrização no fuste, entre outros. Este tipo de defeito é responsável pela variação do

ângulo das fibras, pela alta dilatação e desenvolvimento de tensões internas da madeira, tendo como consequência baixas propriedades de resistência.

Já na grã espiral os elementos anatômicos seguem uma direção espiral ao longo do tronco. A inclinação pode ser tanto para o lado direito como para o esquerdo e variar a diferentes alturas. Uma volta completa em torno do eixo da árvore em menos de 10 metros, a madeira apresenta limitações industriais, sobretudo como material de construção. As peças de madeira retiradas de um tronco espiralado apresentam grã oblíqua.

2.2. TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS

De acordo com Morais (2008), a madeira deve ser tratada para prevenir sua deterioração e ampliar seu tempo de vida útil. O tratamento mais comum utilizado é o químico, no qual ocorre a fixação de elementos preservativos na madeira para que esta se torne mais resistente à ação de fungos e insetos, principalmente se a madeira a ser utilizada for ficar em contato com água ou solo.

Segundo Florian (2011), os processos preservativos sem pressão mais simples e baratos são aqueles por pincelamento ou aspersão, nos quais podem ser utilizados preservativos hidrossolúveis ou óleosolúveis de baixa viscosidade, que são aplicados em madeiras secas em regiões de baixa incidência de ataque de organismos xilófagos. Também pode ser feita uma imersão rápida, que varia de alguns segundos a minutos, e protege um pouco mais que o método anterior. Além desses, ainda há o método de imersão prolongada, que, quando feito em madeira verde, utiliza um produto hidrossolúvel que penetra por difusão, e quando feito em madeira seca, utiliza um óleosolúvel que penetra por capilaridade. Esse método pode ser de até vários dias sendo que a absorção é maior no princípio e diminui gradativamente com o tempo.

Morais (2008) diz que os métodos sem pressão são tratamentos superficiais, que não resultam em penetração profunda ou larga absorção do preservativo pela madeira. Uma penetração mais profunda pode ser atingida pela injeção do preservativo nas células da madeira utilizando o método com pressão.

De acordo com Silva (2006), o tratamento com pressão é realizado a vácuo em um autoclave, que é um cilindro que suporta pressão, onde se utiliza produtos

preservativos, regulamentados pelos órgãos competentes, que são injetados. Esse processo é mais seguro para o meio ambiente.

Segundo Morais (2008), o preservativo mais comum utilizado em processos com pressão é o Cromo Cobre Arsênio (CCA), onde o cobre funciona como fungicida, o arsênio como fungicida e inseticida e o cromo como fixador que também provê resistência aos raios ultravioletas. O CCA é aplicado na madeira em uma solução de água que reage quimicamente com a madeira e a torna virtualmente insolúvel por meio de uma reação de fixação.

De acordo com Calil Junior (2006), no caso de componentes estruturais e construtivos de madeira utilizados em pontes, os processos de impregnação sob pressão são os mais eficazes e recomendados. Eles promovem a distribuição e penetração mais uniforme do produto preservativo em todas partes permeáveis da madeira favorecendo o controle da quantidade de preservativo absorvido para uma proteção ampla da madeira, mesmo em condições de alto risco de deterioração biológica.

Segundo Francischinelli (2006), tomando os cuidados para fazer um tratamento químico correto, obtém-se um produto final com durabilidade esperada de 25 anos, valor que pode ser estendido mediante a adoção de um programa de manutenção preventiva, com previsão de inspeções periódicas, em geral a partir do oitavo ano e, se for o caso, o emprego de medidas curativas como, por exemplo, o reforço, *in loco*, do tratamento na linha de aforamento do poste com substâncias específicas para esse fim.

2.3. DIFERENÇAS ENTRE A NORMA DE PROJETOS DE ESTRUTURAS DE MADEIRA DE 1982 E DE 1997

A transição da versão de 1982 da NBR 7190 para a vigente traz grandes alterações nos conceitos relativos ao projeto de estruturas de madeira. De uma norma determinista de tensões admissíveis passa-se a uma norma probabilista de estados limites. O projeto de estruturas de madeira passou a seguir os mesmos caminhos que os trilhados pelo projeto de estruturas de concreto e de aço. (FUSCO *et al.*, 1996)

A norma estabelece as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões,

coberturas, pisos e cimbres. Na norma antiga de estruturas de madeira não se aplicava nenhum tipo de coeficiente de segurança, modificação ou ponderação às solicitações, simplesmente trabalhando com seus valores característicos. A NBR 7190, em vigência, descreve as ações a considerar permanentes, variáveis e excepcionais, e orienta sobre as combinações que devem ser feitas. Classifica-as entre as várias formas de ocorrência e estabelece os coeficientes de ponderação para aplicação nas diversas formas de combinações em estados limites últimos: combinações últimas normais, últimas especiais ou de construção e últimas excepcionais; e estados limites de utilização: combinações de longa duração, de média duração, de curta duração e de duração instantânea. (TERNI; OLIVEIRA; FERREIRA, 2001)

As vantagens da nova formulação dos conceitos de segurança são inúmeras e inegáveis. Uma delas é que o dimensionamento em regime de ruptura permite a racionalização da segurança das estruturas. (FUSCO *et al.*, 1996)

2.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA PONTE

2.4.1. AÇÕES EM PONTES DE MADEIRA

As ações são as causas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações nas estruturas. As forças são consideradas como ações diretas e as deformações impostas como ações indiretas (ABNT NBR 7190:1997). Elas podem ser classificadas em ações permanentes, variáveis e excepcionais.

Cargas permanentes

Segundo a ABNT na NBR 7190 (1997), as cargas permanentes são aquelas que estão presentes em quase toda a vida da construção. No caso das pontes, elas são constituídas pelo peso próprio dos elementos estruturais:

- Madeira na classe de umidade 1 (12%)
- Elementos metálicos das conexões: 3% do peso próprio da madeira.
- Admite-se uma variação de no máximo 10% entre o peso próprio real e o estimado inicialmente.

E também pelo peso próprio de elementos não estruturais, como revestimento, guarda-corpo, lastros e outros elementos.

Cargas acidentais

As cargas acidentais são forças variáveis, elas atuam na construção em função do uso, como, por exemplo, pessoas, veículos e vento. Para as forças variáveis devemos considerar apenas as parcelas que possuem efeitos desfavoráveis na estrutura. No caso de ações variáveis móveis, consideramos a pior situação para o cálculo. (ABNT NBR 7190:97)

Cargas Acidentais Verticais em Pontes:

De acordo com Calil Junior (2006) serão consideradas as cargas de pedestres e veículos. Para passarela de pedestres, se considera uma classe única com $p=5\text{kN/m}^2$, sem impacto.

As pontes rodoviárias são divididas em três classes:

- Classe 45: veículo-tipo pesando 450kN
- Classe 30: veículo-tipo pesando 300kN
- Classe 12: veículo-tipo pesando 120kN

Os carregamentos estão indicados na tabela 1:

Tabela 1 - Carregamentos conforme as Classes de Veículos

Classe da Ponte	Veículo Tipo	Peso Total		Carga Uniformemente Distribuída				Disposição da Carga
		kN	tf	p		p'		
				kN/m ²	kgf/m ²	kN/m ²	kgf/m ²	
45	45	450	45	5	500	3	300	Carga p em toda a pista Carga p' nos passeios
30	30	300	30	5	500	3	300	
12	12	120	12	4	400	4	400	

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7188 (1982 p. 2).

Na figura 1 é indicado a disposição dos carregamentos:

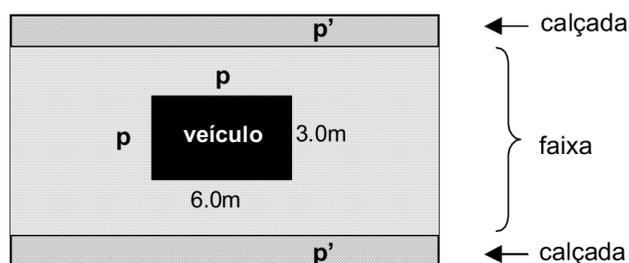


Figura 1 - Disposição em planta das cargas móveis

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7188 (1982 p. 2).

Na tabela 2 estão apresentadas as características do veículo e a figura 2 mostra os detalhes.

Tabela 2 - Características do Veículo Tipo

	Unidade	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN - tf	450-45	300-30	120-12
Peso de cada roda dianteira	kN - tf	75-7,5	50-5	20-2
Peso de cada roda traseira	kN - tf	75-7,5	50-5	40-2
Peso de cada roda intermediária	kN - tf	75-7,5	50-5	-
Largura de contato B1 de cada roda dianteira	m	0.5	0.4	0.2
Largura de contato B3 de cada roda traseira	m	0.5	0.4	0.3
Largura de contato B2 de cada roda intermediária	m	0.5	0.4	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0.2	0.2	0.2
Área de contato de cada roda	m ²	0,2 x b	0,2 x b	0,2 x b
Distância entre eixos	m	1.5	1.5	3
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2	2	2

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7188 (1982 p. 3).

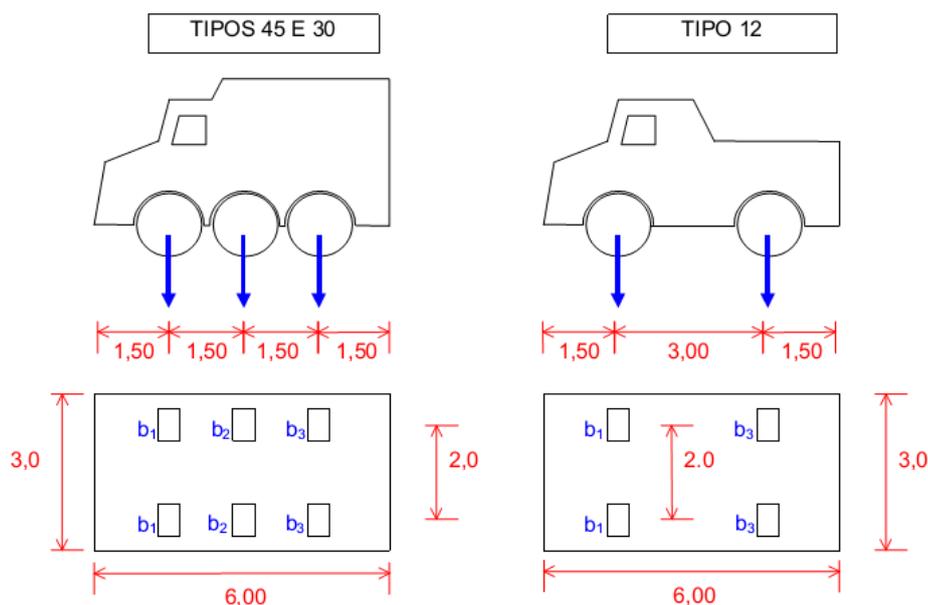


Figura 2 - Veículos Tipo

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7188 (1982 p. 3).

A partir da distribuição transversal de carga entre os elementos que compõe a estrutura podemos obter o trem-tipo. Como já foi dito, deve-se considerar a situação mais desfavorável.

Impacto vertical em pontes:

Segundo Calil Junior (2006), o impacto é uma ação de curta duração sobre as cargas móveis verticais e é calculado através da equação (1):

$$\varphi = 1 + \frac{\alpha}{40+L} \quad (1)$$

Onde:

Para ponte em viga: L = vão teórico do tramo.

Para pontes rodoviárias com revestimento de madeira: $\alpha = 20$

Devido à maior resistência da madeira às cargas de curta duração, na verificação da segurança nos estados limites últimos as solicitações nas peças de madeira devidas ao impacto vertical serão multiplicadas por 0,75.

Forças longitudinais em pontes:

De acordo com Calil Junior (2006), as forças longitudinais são decorrentes da aceleração e frenagem dos veículos. Nas pontes rodoviárias ela deve ser considerada 2,00m acima da superfície de rolamento. Ambas são aplicadas sem impacto. As condições de verificação para pontes rodoviárias são:

$F_{long} \leq 5\%$ do carregamento total do tabuleiro com carga móvel uniformemente distribuída (aceleração).

30% do veículo – tipo para cada faixa de tráfego (frenagem).

Ação do vento:

A ação do vento é de curta duração e segundo a norma NBR 7190 (1997) ela deve ser considerada para as pontes rodoviárias da seguinte maneira: o valor característico nominal será de 2 kN/m, aplicado a 1,2 m acima da superfície de rolamento.

Força no guarda-corpo:

A força no guarda-corpo também é considerada horizontal distribuída, de curta duração, com valor característico nominal de 1kN/m². (ABNT NBR 7190:1997)

2.4.2. COMBINAÇÕES DE AÇÕES EM PONTES DE MADEIRA

Segundo Calil Junior (2006), no caso de pontes de madeira vamos considerar apenas as combinações últimas normais para os estados limites últimos e as combinações de longa duração para os estados limites de utilização definidas na NBR 7190 (1997). Isso acontece porque se considera apenas as ações permanentes normais e o trem-tipo associado ao impacto.

As combinações utilizam fatores de ponderação das ações os quais consideram as probabilidades de ocorrência simultâneas das ações e, ao mesmo tempo, consideram as variações que podem ocorrer nas avaliações do projetista.

Para a avaliação dos estados limites últimos são definidas três combinações possíveis. As combinações últimas normais, as combinações especiais ou de construção e as combinações excepcionais. Para a avaliação dos estados limites de utilização, podem ser efetuadas combinações de longa duração, média duração, curta duração ou instantânea, de acordo com o rigor que se pretende nesta verificação.

2.4.2.1 Estados limites últimos

Para as combinações últimas normais, utiliza-se a equação (2):

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_Q \cdot [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}] \quad (2)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ = valor característico das ações permanentes

$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada como principal

$\psi_{0j} F_{Qj,k}$ = valores reduzidos de combinação das demais ações variáveis, determinados de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Fatores de Combinação e Utilização

Ações em estruturas correntes	Ψ0	Ψ1	Ψ2
Variações uniformes de temperatura em relação a média anual local	0.6	0.5	0.3
Pressão dinâmica do vento	0.5	0.2	0
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Ψ0	Ψ1	Ψ2
Pontes de pedestres	0.4	0.3	0.2
Pontes rodoviárias	0.6	0.4	0.2
Pontes ferroviárias (não especializadas)	0.8	0.6	0.4

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997 p. 09).

A tabela 4 apresenta os coeficientes de ações:

Tabela 4 – Coeficientes de Ações

Ações permanentes de pequena variabilidade		
Combinações	Para efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	Yg = 1,3	Yg = 1,0
Especiais ou de construção	Yg = 1,2	Yg = 1,0
Excepcionais	Yg = 1,1	Yg = 1,0
Ações permanentes de grande variabilidade		
Combinações	Para efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	Yg = 1,4	Yg = 0,9
Especiais ou de construção	Yg = 1,3	Yg = 0,9
Excepcionais	Yg = 1,2	Yg = 0,9
Ações Variáveis		
Combinações	Ações variáveis em geral incluídas as cargas acidentais móveis	Efeitos da temperatura
Normais	Yg = 1,4	Yg = 1,2
Especiais ou de construção	Yg = 1,2	Yg = 1,0
Excepcionais	Yg = 1,0	Yg = 0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997 p. 12).

2.4.2.2 Estados limites de utilização

As combinações de longa duração são consideradas no controle usual das deformações das estruturas. Nestas combinações, todas as ações variáveis atuam com seus valores correspondentes à classe de longa duração (CALIL JUNIOR, 2006). Estas combinações são expressas pela equação (3):

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \quad (3)$$

2.4.3. PONTES EM VIGA

As pontes em vigas são as mais práticas e mais encontradas para pontes de madeira. As vigas são, geralmente, utilizadas na forma de vão único, ou seja, vigas bi-apoiadas. Quando o comprimento é excessivo, pode-se construir apoios intermediários, ou seja, vigas contínuas. (CALIL JUNIOR, 2006)

2.4.3.1 Vigas de peças roliças

Segundo Calil Junior (2006), a viga simples de peças roliças é a seção mais fácil de obter, mas sua utilização exige alguns cuidados especiais. Primeiro, deve-se atentar ao fato de que, nas toras, diferentemente das vigas serradas, há a presença do alburno. A durabilidade natural do alburno é baixa, mas, por outro lado, é mais fácil o tratamento químico por ser mais permeável e menos denso. Outra questão relevante é a de que a geometria cônica das toras faz com que seja obrigatória a compensação longitudinal entre os diâmetros do topo e da base e a regularização do tabuleiro.



**Figura 3 – Vista inferior Ponte Estrada Floresta – Piracicaba/SP
Fonte: Calil Junior (2006 p. A11).**

Devido às baixas propriedades mecânicas do alburno e os altos comprimentos obtidos pode-se associar duas ou mais seções roliças, resultando nas vigas de peças roliças compostas. Esta associação é realizada por parafusos passantes transversais associados a elementos para transmitir as tensões de cisalhamento, tais como tarugos ou anéis metálicos.

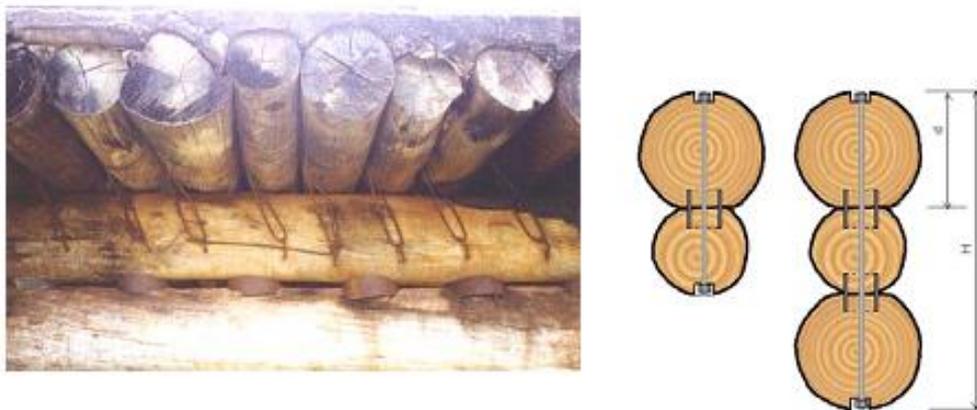


Figura 4 - Ponte em vigas com peças roliças compostas
Fonte: Calil Junior (2006 p. 31).

Diretrizes para o projeto de ponte em vigas de peças roliças:

De acordo com Calil Junior (2006), nas pontes de vigas simples de peças roliças observa-se os seguintes elementos estruturais:

- As longarinas, que são formadas por peças roliças de madeira dispostas no sentido longitudinal. Elas são responsáveis por suportar o peso próprio da estrutura e também as cargas acidentais e seus efeitos dinâmicos.
- O tabuleiro, que é constituído por peças de madeira serrada, dispostas no sentido transversal, e ligadas as longarinas por parafusos auto-atarraxantes. O tabuleiro deve suportar a carga acidental do veículo tipo, no caso excepcional do mesmo sair do rodeiro.
- O rodeiro, que é formado por peças de madeira serrada, dispostas no sentido longitudinal, e ligadas ao tabuleiro por parafusos auto-atarraxantes. O rodeiro tem a função de indicar onde o veículo deve passar e melhorar a distribuição das cargas acidentais para o tabuleiro e as longarinas.
- Por fim, o guarda-rodas e a defesa, que constituem itens de segurança ao tráfego da ponte.

Nas figuras 5, 6 e 7 são ilustradas as localizações dos elementos estruturais:

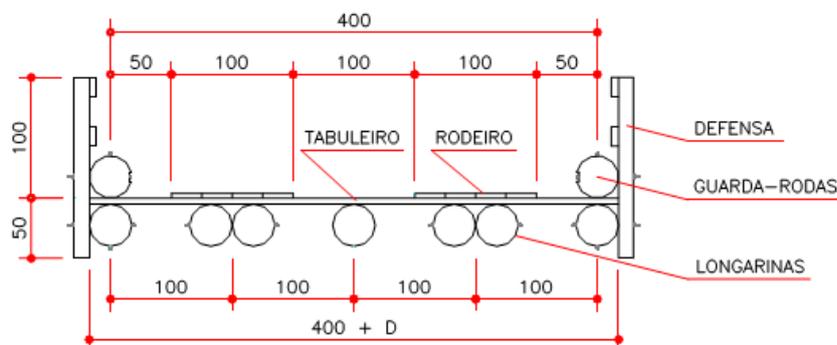


Figura 5 - Seção transversal da ponte em vigas roliças

Fonte: Calil Junior (2006 p. 80).

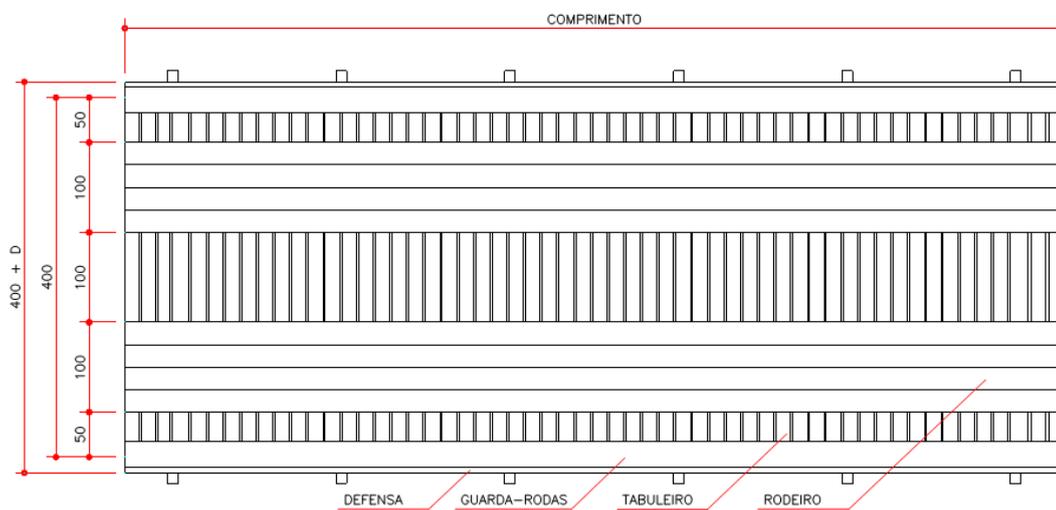


Figura 6 - Vista superior da ponte

Fonte: Calil Junior (2006 p. 80).

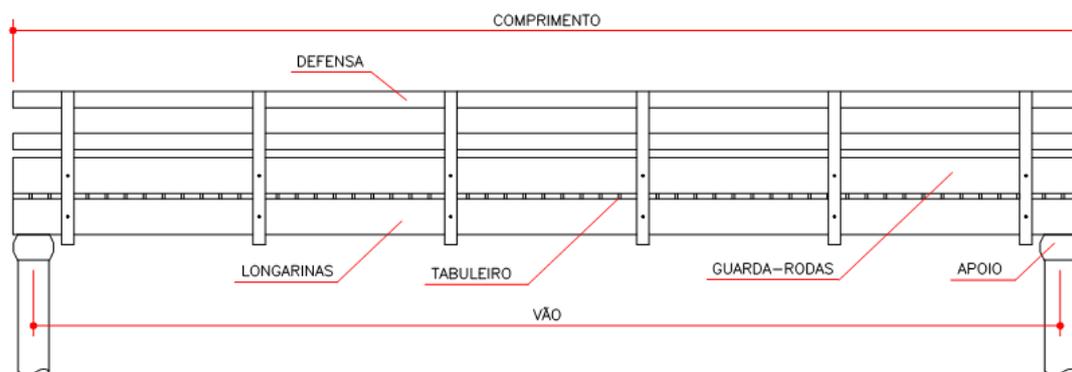


Figura 7 - Vista lateral da ponte em vigas roliças

Fonte: Calil Junior (2006 p. 80).

De acordo com Calil Junior (2006), para o dimensionamento da ponte devem-se considerar as seguintes hipóteses de cálculo:

- As longarinas diretamente abaixo do rodeiro são dimensionadas para suportar a ação permanente de peso próprio e as ações acidentais e seus efeitos dinâmicos;
- Em cada linha de rodas do veículo-tipo têm-se duas vigas suportando o carregamento;

Apesar do tabuleiro e rodeiro contribuírem na distribuição transversal do carregamento para as longarinas vizinhas, este efeito não é considerado para o dimensionamento.

Calil Junior (2006) esquematizou de forma simplificada os passos para o dimensionamento:

1º) Definir a geometria e a classe estrutural da ponte:

Deve-se definir o vão, largura e número de faixas da ponte baseado em fatores decorrentes das condições locais. O vão efetivo da ponte é a distância medida de centro a centro dos apoios. Para o sistema de ponte em questão, o número de faixas de tráfego e, conseqüentemente, a largura da ponte ficam limitadas ao padrão de 4m, já que são utilizadas principalmente em vias rurais de baixo volume de tráfego.

A classe estrutural da ponte é definida em função dos veículos que possam trafegar com maior frequência sobre a ponte. A norma NBR 7188 define três classes de pontes, Classe 12, Classe 30 e Classe 45. Apesar deste tipo de ponte ser utilizado em vias rurais com baixo volume de tráfego, a Classe 12 não é recomendada, pois os veículos atuais utilizados nas vias rurais não pavimentadas facilmente superam este limite.

2º) Definir a classe da resistência da madeira:

Na NBR 7190 é permitido que o projetista especifique uma espécie de madeira ou utilize as recomendações de classes de resistência. Se o dimensionamento for feito por classes de resistência o cliente poderá optar pela espécie de madeira mais conveniente que se encaixe na classe.

3º) Estimar a carga permanente:

Definida a classe da ponte, o vão teórico e classe da madeira a ser utilizada, pode-se recorrer às indicações das tabelas 5 e 6 para estimar a carga permanente. Lembrando-se que se deve acrescentar 3% ao peso próprio da madeira, devido aos conectores metálicos.

Tabela 5 – Altura do tabuleiro para pontes em vigas simples de peças roliças

Veículo - tipo	Madeira		
	C60	C50	C40
Classe 30	6 cm	7 cm	8 cm
Classe 45	8 cm	9 cm	10 cm

Fonte: Adaptado de Calil Junior (2006 p. 89).

A tabela 6 apresenta uma estimativa do diâmetro médio necessário para construção de pontes em vigas simples de peças roliças. A tabela deve ser utilizada para estimar as cargas permanentes da ponte para o dimensionamento da mesma.

Tabela 6 – Diâmetro médio das longarinas para pontes em vigas simples de peças roliças

Comprimento (m)	Vão (m)	Classe 30			Classe 45		
		C60	C50	C40	C60	C50	C40
6	5,5	37 cm	39 cm	43 cm	43 cm	45 cm	48 cm
7	6,5	40 cm	43 cm	46 cm	46 cm	49 cm	
8	7,5	43 cm	46 cm	50 cm	50 cm		
9	8,5	46 cm	49 cm				
10	9,5	49 cm					

Fonte: Adaptado de Calil Junior (2006 p. 89).

4º) Posicionamento transversal do veículo tipo:

Nas pontes de madeira em vigas roliças, o rodeiro indica o local correto por onde o veículo deve transitar. Esta é a posição mais crítica para as longarinas. A figura 8 ilustra o posicionamento transversal crítico para o dimensionamento das longarinas.

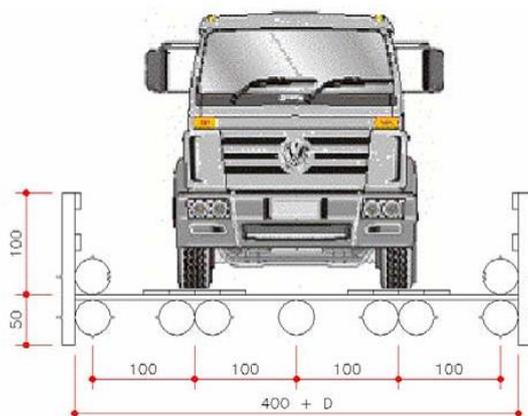


Figura 8 - Posicionamento transversal do veículo-tipo sobre o rodeiro
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 82).

Outra possibilidade de solicitação que pode ocorrer nas pontes em vigas roliças é quando o veículo-tipo sair fora do rodeiro. Esta é a situação mais crítica para o tabuleiro. Na figura 9 está ilustrado o posicionamento transversal crítico para o dimensionamento do tabuleiro.

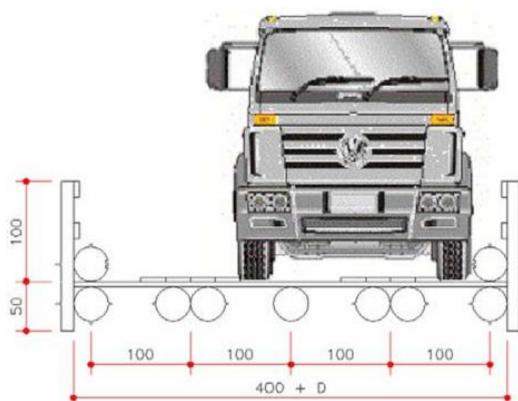


Figura 9 - Posicionamento transversal do veículo-tipo fora do rodeiro
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 82).

5º) Realizar o cálculo dos esforços internos máximos:

Para o dimensionamento das longarinas deve-se calcular o momento fletor máximo, a cortante máxima e o deslocamento vertical máximo devido à carga permanente e à acidental. Na figura 10 está ilustrado o posicionamento do veículo-tipo para o cálculo do momento fletor e deslocamento vertical máximo.

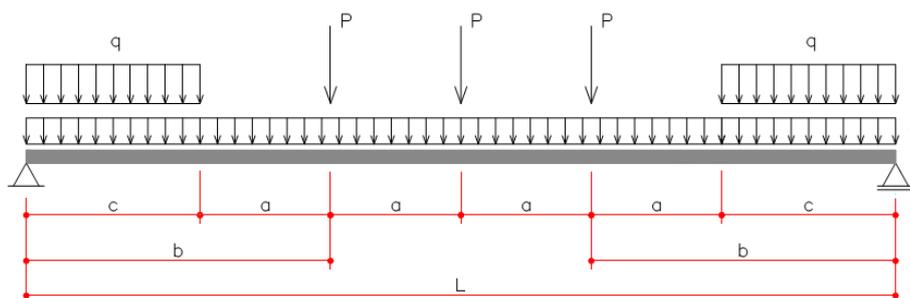


Figura 10 - Posicionamento do veículo-tipo para momento fletor e deslocamento vertical máximo
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 83).

onde:

L = vão teórico;

a = 1,5 m (Classes 30 e 45);

b = $(L-2a)/2$;

c = $(L-4a)/2$;

q = carga acidental;

g = carga permanente.

O deslocamento vertical máximo devido a carga permanente é dado pela equação (4):

$$\delta_{g,k} = \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_{M,ef} \cdot I} \quad (4)$$

Para as classes estruturais 30 e 45, pode ser considerada a equação (5), desprezando o efeito da carga acidental distribuída perto dos apoios:

$$\delta_{q,k} = \frac{P}{48 \cdot E_{M,ef} \cdot I} \cdot [L^3 + 2 \cdot b \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot b^2)] \quad (5)$$

Para o cálculo da reação de apoio o veículo-tipo deve ser posicionado conforme ilustrado na figura 11. O valor é usado para o dimensionamento da região dos apoios e fundações.

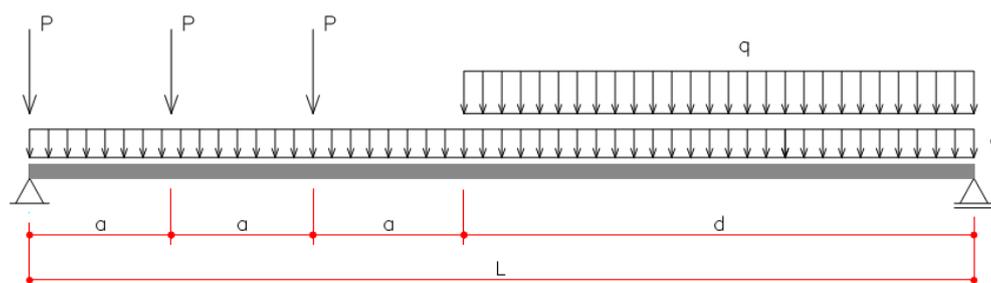


Figura 11 - Posicionamento do veículo-tipo para reação de apoio
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 84).

onde:

$$d = L - 3a.$$

Para o cálculo da cortante, o veículo-tipo pode ser posicionado conforme a figura 12, levando em consideração a redução da cortante.

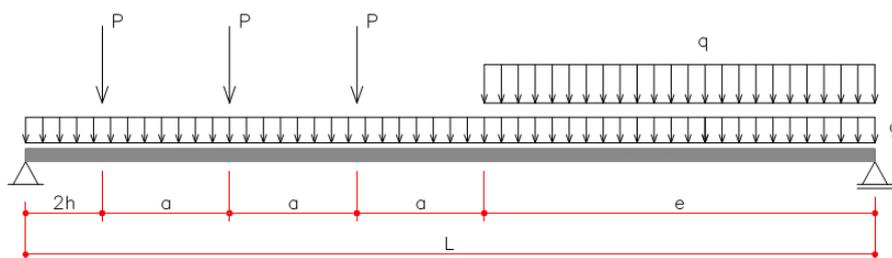


Figura 12 - Posicionamento do veículo-tipo para cortante
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 85).

onde:

$$e = L - 3a - 2h;$$

$h = 1$ centímetro, espaço suficiente para a força não estar em cima do apoio e o resultado do esforço cortante máximo não ser igual a zero.

Para o dimensionamento do tabuleiro deve-se apenas calcular o momento fletor máximo devido a carga acidental e seus efeitos dinâmicos. Os efeitos do peso próprio podem ser desprezados devido à pequena influência.

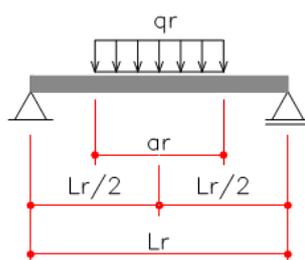


Figura 13 - Posicionamento crítico de uma roda sobre o tabuleiro
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 86).

onde:

$$q_r = P / a_r;$$

$a_r = 0,5$ m para Classe 45 e $0,4$ m para Classe 30;

$L_r =$ vão do tabuleiro (distância entre longarinas).

A sugestão de análise do tabuleiro ilustrada na figura 13 é uma aproximação razoável de um modelo real. Para uma análise mais precisa, deve-se considerar o tabuleiro como uma viga contínua apoiada sobre as longarinas que por sua vez podem ser analisadas como apoios elásticos.

6º) Realizar as combinações das ações:

Para o dimensionamento das longarinas, os valores de cálculo das ações momento fletor e cortante devem ser obtidos da combinação última normal seguindo as especificações da NBR 7190:1997. Seguem as equações (6) e (7) conforme a norma:

$$Md = \gamma_g \cdot M_{g,k} + \gamma_q \cdot [M_{q,k} + 0,75 \cdot (\varphi - 1) \cdot M_{q,k}] \quad (6)$$

$$Qd = \gamma_g \cdot Q_{g,k} + \gamma_q \cdot [Q_{q,k} + 0,75 \cdot (\varphi - 1) \cdot Q_{q,k}] \quad (7)$$

Onde o coeficiente de impacto vertical é calculado conforme a equação (8):

$\gamma_g = 1,3$ para madeira classificada (pequena variabilidade) e $1,4$ quando o peso próprio não supera 75% da totalidade dos pesos permanentes (grande variabilidade)

$\gamma_q = 1,4$ para ações variáveis (cargas acidentais móveis)

φ = coeficiente de impacto vertical

Para o dimensionamento dos apoios, o valor de cálculo da reação de apoio deve ser obtido da combinação última normal não considerando o coeficiente de impacto, conforme a equação (8), seguindo as especificações da NBR 7190:1997.

$$R_d = \gamma_g \cdot R_{g,k} + \gamma_q \cdot R_{q,k} \quad (8)$$

Para as longarinas em pontes de madeira, sugere-se que o deslocamento vertical máximo seja verificado considerando a condição expressa na equação (9):

$$\delta_{d,k} \leq \frac{L}{360} \quad (9)$$

O valor de cálculo do momento fletor no tabuleiro deve ser obtido da combinação última excepcional, desprezando os efeitos da carga permanente, conforme a equação (10).

$$M_{r,d} = M_{rq,k} \quad (10)$$

7º) Dimensionamento das longarinas e tabuleiro:

A altura do tabuleiro é determinada pela condição expressa na equação (11):

$$\sigma \geq \frac{M}{w}, \text{ tensões normais.} \quad (11)$$

Onde:

esp.- espessura do tabuleiro;

larg.- largura da roda (20cm para as Classes 30 e 45).

onde: $w = \frac{I}{y}$; $I = \frac{\pi D^4}{64}$, para seções circulares

O diâmetro mínimo das longarinas é determinado pelo maior resultado dentre as verificações expressas nas equações (12), (13) e (15):

$$\sigma \geq \frac{M}{w}, \text{ tensões normais.} \quad (12)$$

Onde:

$$w = \frac{I}{y} ; I = \frac{20 \cdot \pi \cdot D^4}{64}, \text{ para seção de 4 postes ligados.}$$

As tensões devido ao cisalhamento para vigas roliças podem ser calculadas com a equação (13):

$$\tau \geq \frac{Q}{b \cdot I} \cdot M_s, \text{ tensões tangenciais.} \quad (13)$$

onde:

b – largura da seção

M_s – momento estático

Entretanto, como a seção calculada nesse trabalho é composta, Abdalla (2002), desenvolveu a equação (14), para o espaçamento mínimo:

$$e \leq \frac{R_{anel} \cdot I}{Q_d \cdot M_s} \quad (14)$$

onde:

e – espaçamento entre os anéis

M_s – momento estático

O deslocamento vertical máximo pode ser calculado com a equação (15):

$$\frac{L}{360} \geq \delta_{g,k} + \delta_{q,k}, \text{ deslocamento vertical máximo.} \quad (15)$$

Para os cálculos de dimensionamento serão necessários os dados de resistência da madeira, que são estipulados pela NBR 7190:1997.

De acordo com a NBR 7190, o $f_{c,0d}$ é obtido através da equação (16):

$$f_{c,0d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0k}}{\gamma_w} \quad (16)$$

Onde:

$f_{c,0k}$ é obtido através da tabela 9:

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3}$$

A resistência ao cisalhamento paralela às fibras, quando não se conhece a espécie da madeira, pode ser obtido através da equação (17), para dicotiledôneas:

$$f_{v,0d} = 0,10 \cdot f_{c,0d} \quad (17)$$

O coeficiente parcial de modificação $k_{mod,1}$ leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado e é definido através da tabela 7.

Tabela 7 – Valores de $k_{mod,1}$

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira Serrada/ Madeira laminada colada/ Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,6	0,3
Longa Duração	0,7	0,45
Média Duração	0,8	0,65
Curta Duração	0,9	0,9
Instantanea	1,1	1,1

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190: 1997 (p. 18).

O coeficiente parcial de modificação $k_{mod,2}$ leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado, e é definido através da tabela 8.

Tabela 8 – Valores de $k_{mod,2}$

Classes de Umidade	Madeira Serrada/ Madeira laminada colada/ Madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1	1
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190: 1997 (p. 18).

Já o $k_{mod,3}$ considera se a madeira é de primeira ou segunda categoria. No caso de primeira categoria, admite-se $k_{mod,3} = 1,0$. Para segunda, $k_{mod,3} = 0,8$.

Na tabela 9 são definidos valores para resistência, módulo de elasticidade e peso específico das classes de resistência das dicotiledôneas:

Tabela 9 – Classe de resistência das dicotiledôneas

Dicotiledôneas					
(Valores na condição padrão de referência U=12%)					
Classes	$f_{c,0k}$ MPa	f_{vk} MPa	$E_{c,0m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997 p. 16).

8º) Conferência do peso próprio considerado:

Deve-se conferir o peso próprio estimado no início dos cálculos com o obtido das dimensões obtidas no 7º passo. Se a diferença entre o peso próprio estimado e o real for maior que 10% deve-se refazer os cálculos com o novo valor de peso-próprio. Esse procedimento iterativo deve continuar até que a diferença seja menor que 10%.

2.4.4. TABULEIROS DE PONTE DE MADEIRA

Define-se tabuleiro como a parte da superestrutura da ponte que forma a pista de rolamento e distribui as cargas das rodas dos veículos para as vigas principais. O tipo, a espessura e o material do tabuleiro são baseados no peso e volume de tráfego que ele precisa suportar. Os tabuleiros de madeira são tipicamente construídos de um ou três materiais: pranchas de madeira serrada, madeira laminada pregada e madeira laminada colada. Os tabuleiros compostos de concreto e madeira também são usados nas superestruturas de pontes em algumas aplicações. (CALIL JUNIOR, 2006)

2.4.4.1 Pranchas de madeira serrada

Os tabuleiros compostos de pranchas de madeira serrada são os tipos mais antigos e simples. Estas pranchas têm espessura entre 6 cm e 16 cm e largura entre 25 a 30 cm, são dispostas na direção transversal e fixadas diretamente nas vigas principais de madeira com pregos de grandes dimensões. Também podem ser usadas longitudinalmente fixadas em transversinas.

Os tabuleiros de pranchas de madeira dispostos na posição transversal e horizontal são práticos em pontes de pequenos vãos ou de uso especial. Eles não são à prova d'água e apresentam pouca proteção dos materiais para os efeitos de intemperismos. Outro tipo de tabuleiro com pranchas de madeira é o constituído por duas camadas ortogonais de pranchas superpostas formando um ângulo de 45 graus com o eixo longitudinal da ponte. (CALIL JUNIOR, 2006)

Na figura 14 são ilustrados tabuleiros em pranchas de madeira serrada:



Figura 14 - Tabuleiros transversal e longitudinal de pranchas de madeira serrada
Fonte: Calil Junior (2006 p. A11).

2.4.4.2 Compósitos de madeira e concreto

Os tabuleiros compostos de madeira e concreto consistem de uma laje de concreto rigidamente conectada aos elementos estruturais de madeira de tal modo que a construção funciona como um monólito. Em vigas simplesmente apoiadas, o concreto resiste à compressão enquanto a madeira resiste à tração. Nas regiões de apoio intermediárias de vigas contínuas, o contrário é verdadeiro.

Há dois tipos básicos de tabuleiros compostos de madeira/concreto: tabuleiros em vigas T e tabuleiros em lajes.

Os tabuleiros em vigas T são construídos fundindo a laje de concreto, que forma o flange do T, na viga de MLC, que forma a alma do T. A ação conjunta entre a madeira e o concreto é proporcionada por conectores de cisalhamento dispostos ao longo dos topos da viga de MLC.

Os tabuleiros em lajes são construídos pela utilização de uma camada de concreto em uma base contínua de peças de madeira pregadas longitudinalmente. As peças de madeira são colocadas lado a lado na direção do fluxo do tráfego (longitudinal), com lâminas alternadas de diferentes alturas, variando de 3 cm a 5 cm, para formar encaixes na base. (CALIL JUNIOR, 2006)

Nas figuras (15) e (16) são ilustrados tabuleiros compostos de madeira e concreto:

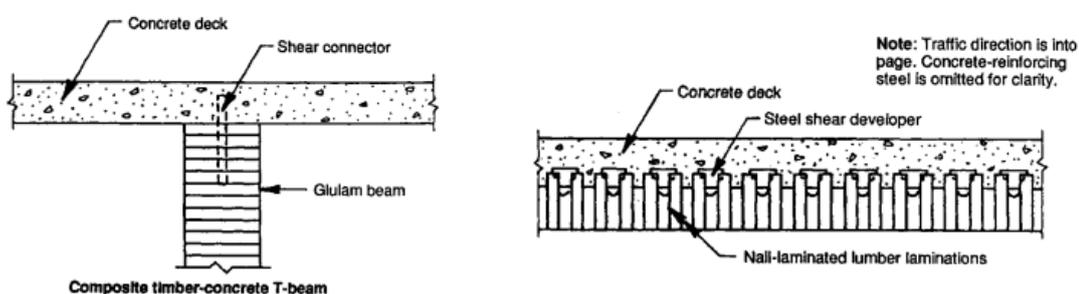


Figura 15 - Tabuleiros compostos de madeira e concreto.
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 45).



Figura 16 - Ponte com tabuleiro misto de madeira e concreto
 Fonte: Calil Junior (2006 p. A15).

Outro tipo de tabuleiro composto madeira/concreto é o formado por peças roliças de madeira, revestido por uma camada de concreto.

A fixação das peças do tabuleiro é feita alternadamente nas vigas principais, através de tiras metálicas de 3 mm de espessura por 30 mm de largura, com parafusos de rosca soberba. Sobre o tabuleiro é colocada uma camada de concreto simples para promover a regularização da superfície e a distribuição da carga das rodas sobre o tabuleiro da ponte. Uma camada de asfalto é colocada sobre o concreto com a finalidade de proteger as peças de madeira e regularizar a superfície de concreto. Na figura 17 é ilustrado este tipo de tabuleiro. (CALIL JUNIOR, 2006)

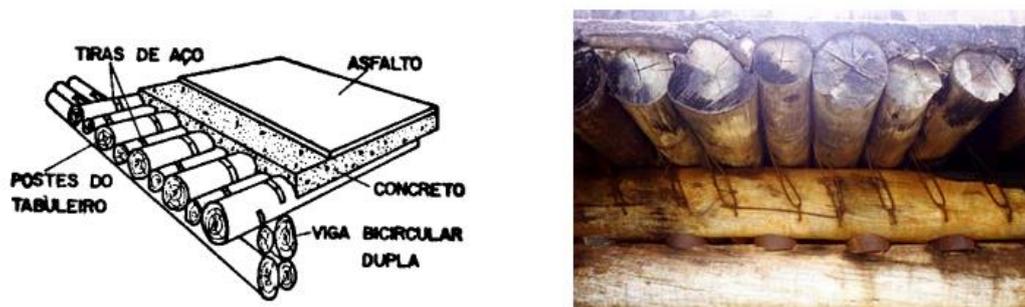


Figura 17 - Tabuleiros compostos de peças roliças de madeira e concreto
 Fonte: Calil Junior (2006 p. 46).

2.4.5. LIGAÇÕES DE PEÇAS ESTRUTURAIS

A madeira tem boa resistência à tração na direção das fibras, podendo ser utilizada como peça sujeita à tração axial. O ponto crítico para o dimensionamento fica nas emendas ou ligações de extremidade das peças. Os principais elementos de ligação são pregos, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes. (PFEIL, 1982)

Segundo Pfeil (1982), o principal requisito das peças de ligação é a resistência, ou seja, elas devem ser capazes de transmitir as forças de uma peça de madeira para a outra. Outro requisito importante é a rigidez: o deslizamento entre as peças deve ser restringido de modo a não prejudicar o funcionamento da estrutura.

2.4.5.1 Pregos e parafusos

Os pregos são fabricados com arame de aço-doce, em grande variedade de tamanhos. As bitolas utilizadas no Brasil descrevem os pregos por dois números: o primeiro representa o diâmetro em fieira francesa, o segundo mede o comprimento em linhas portuguesas. Fabricam-se também pregos com arames de aço-duro, com superfície helicoidal, para maior resistência ao arrancamento (PFEIL, 2003).

Em uniões pregadas será obrigatoriamente feita a pré-furação da madeira, com diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d_{ef} do prego, com os valores usuais:

coníferas: $d_0 = 0,85d_{ef}$

dicotiledôneas: $d_0 = 0,98d_{ef}$

onde:

d_{ef} = diâmetro efetivo medido nos pregos a serem usados.

Os parafusos são instalados em furos ajustados, de modo a não ultrapassar uma pequena folga. Após a colocação dos parafusos, a porcas são apertadas, comprimindo fortemente a madeira na direção transversal, sendo o esforço transferido a madeira com o auxílio de arruelas. O esforço transversal favorece a ligação, pois desenvolve atrito nas interfaces. Entretanto, devido à retração e à deformação lenta da madeira, o esforço transversal permanente é aleatório, o que obriga a dimensionar a ligação admitindo que o parafuso trabalhe apenas como um pino. (PFEIL, 2006)

De acordo com a NBR 7190 (1997), para que as ligações parafusadas sejam consideradas rígidas, a pré-furação deve ser feita com diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d do parafuso, acrescido de 0,5 mm. Caso sejam empregados diâmetros d_0 maiores, a ligação deve ser considerada deformável.

Existem também os parafusos auto-atarraxantes, que não são considerados pela NBR 7190 (1997) como conectores de peças estruturais de madeira. Para o dimensionamento, deve-se utilizar a norma europeia, o EUROCODE 5. As ligações com parafusos auto-atarraxantes são muito sensíveis aos efeitos da umidade sobre a madeira. Elas são geralmente empregadas em obras secundárias ou provisórias. (PFEIL, 2006)

Os espaçamentos mínimos para pregos e parafusos, segundo a NBR 7190 (1997), estão indicados na figura 18:

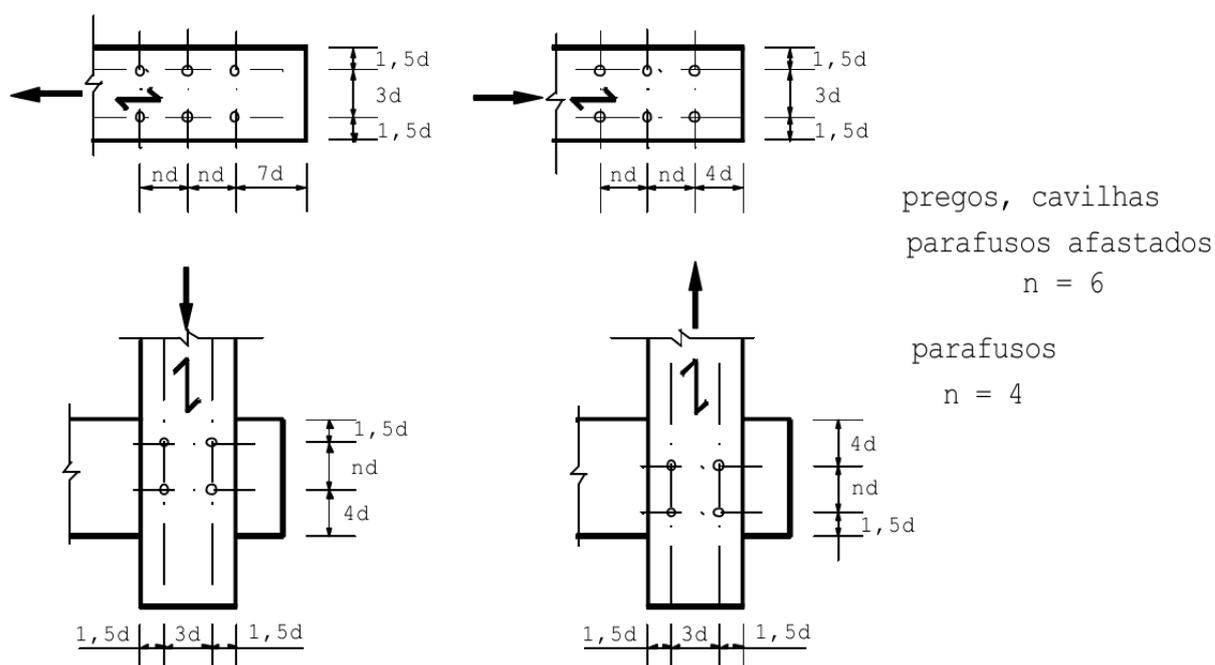


Figura 18 - Espaçamentos em ligações com pinos
Fonte: Adaptado ABNT NBR 7190 (1997 p. 38).

2.4.5.2 Anéis metálicos

Segundo Calil Junior (2006), os conectores de anel são peças metálicas, colocadas em entalhes nas interfaces das madeiras e mantidas na posição por meio de parafusos. Alguns tipos de conectores metálicos são: conector de anel inteiro, conector de anel partido e conector de anel de macho-e-fêmea.

Os anéis metálicos são colocados em entalhes no formato de anel, previamente cortados na madeira, com o auxílio de ferramentas especiais. Os conectores de anel partido são os mais utilizados. A parede do anel recebe os esforços da madeira por

apoio desta na superfície do entalhe. O corte no anel é feito para facilitar para facilitar sua colocação no entalhe da madeira.

A NBR 7190 (1997) sugere o emprego de anéis metálicos estruturais apenas com diâmetros internos d de 64 mm e 102 mm. Entretanto, Calil Junior (2006) descreve sobre o uso de anéis com diâmetros maiores no caso de estruturas de pontes. Os anéis devem ser fabricados com aço submetido às prescrições da NBR 8800.

De acordo com a NBR 7190 (1997) a resistência de um anel metálico correspondente a uma dada seção de corte da ligação entre duas peças de madeira é determinada em função das resistências ao cisalhamento longitudinal $f_{v0,d}$ das duas madeiras interligadas. O valor de cálculo da resistência ao cisalhamento da madeira correspondente a um anel metálico é dado pelo menor dos valores:

$$R_{anel\ 1} = \frac{\pi d^2}{4} f_{v0,d} \text{ e } R_{anel\ 2} = t d f_{c\alpha,d} \quad (18)$$

Onde:

t = profundidade de penetração do anel em cada peça de madeira;

d = diâmetro interno, como mostrado na figura 19;

$f_{c\alpha,d}$ = valor de cálculo da resistência à compressão inclinada de α

Nas ligações em que forem usados anéis metálicos, eles devem ser aplicados em ranhuras previamente feitas nas peças de madeira, com ferramentas apropriadas.

Os espaçamentos mínimos recomendados são os seguintes:

- a) entre os centros de anéis metálicos na direção das fibras: 1,5 d ;
- b) do centro de qualquer anel metálico à extremidade da peça, no caso de esforço de tração paralelo às fibras: 1,5 d ;
- c) do centro de qualquer anel metálico à extremidade da peça, no caso de esforço de compressão paralelo às fibras: 1,0 d ;
- d) do centro de qualquer anel metálico à borda lateral: 0,75 d ;

e) do centro de qualquer anel metálico à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde são acarretadas tensões de tração normal: $1,0 d$;

f) do centro de qualquer anel metálico à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde são acarretadas tensões de compressão normal: $0,75 d$

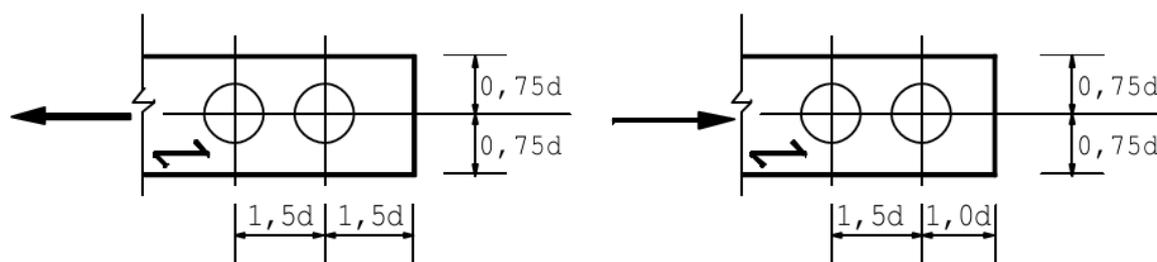


Figura 19 - Espaços em ligações com Anéis Metálicos
 Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997 p. 38).

2.4.5.3 Entalhes

Os entalhes são ligações em que a transmissão do esforço é feita por apoio nas interfaces. Eles devem ser executados com grande precisão, a fim de que as faces transmissoras de esforços fiquem em contato antes do carregamento. Havendo folga, a ligação se deformará até que as faces se apoiem efetivamente. As peças ligadas por entalhe são mantidas na posição por meio de parafusos ou talas laterais pregadas. Esses parafusos não são levados em consideração no cálculo da capacidade de carga da ligação. (PFEIL, 1982)

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento dos cálculos desse trabalho será utilizado como base o dimensionamento de uma ponte de madeira, desenvolvido por AAD (1998), conforme a norma de Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira NBR 7190:1982. Será analisado o método de dimensionamento do projeto existente e então será dimensionado o projeto da ponte conforme a norma vigente de Projeto de Estruturas de Madeira NBR 7190:1997.

3.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS UTILIZADOS NO PROJETO DIMENSIONADO CONFORME NBR 7190:1982

Os procedimentos utilizados no dimensionamento da ponte do projeto utilizado como base para este trabalho, conforme a antiga norma NBR 7190:1982 está descrito a seguir. De acordo com esta norma o dimensionamento era calculado com o método das tensões admissíveis. Na figura 20 são ilustrados os projetos da ponte dimensionada por AAD (1998).

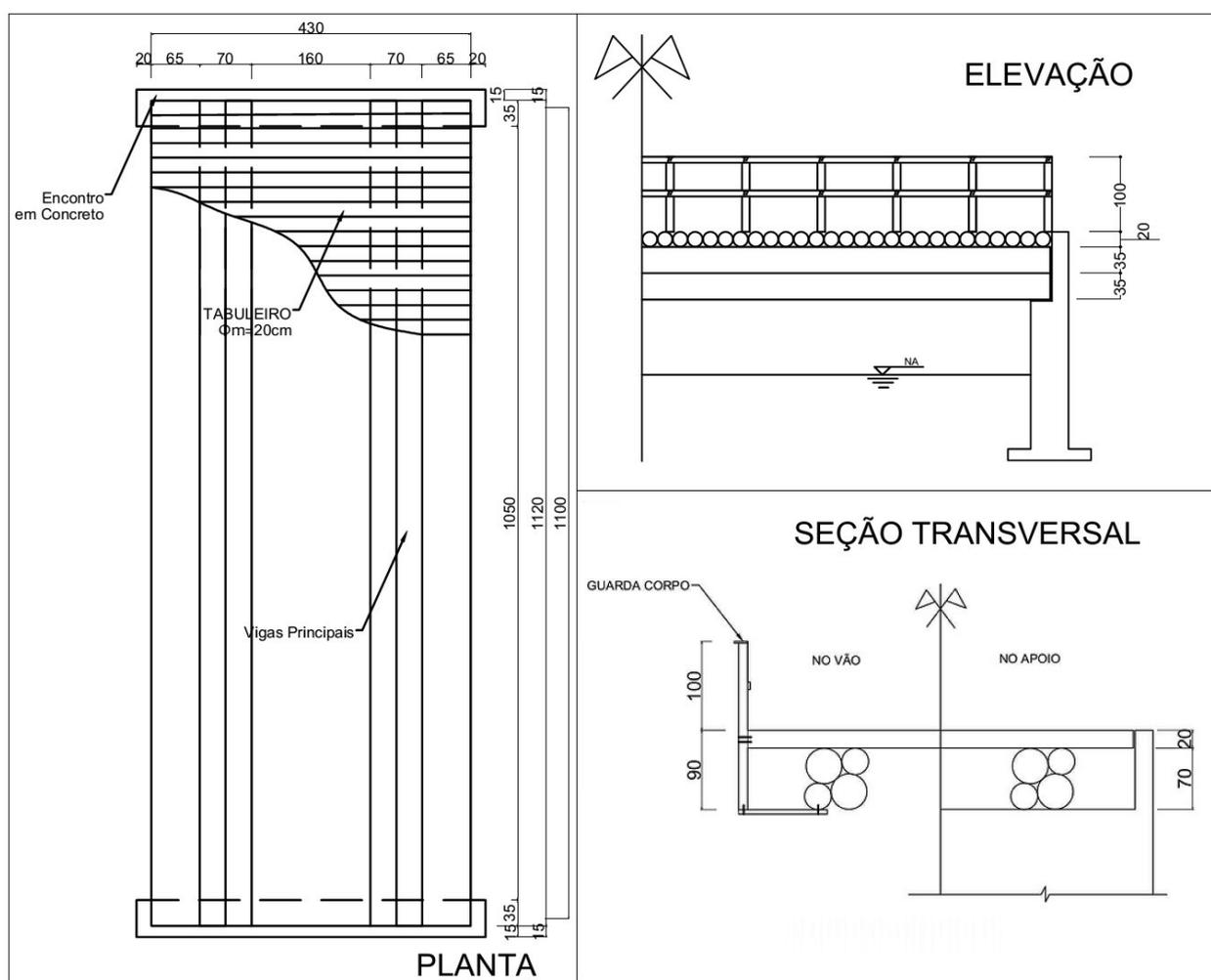


Figura 20 – Projeto de ponte de madeira sobre o Rio Itaquí - São José dos Pinhais, Paraná
 Fonte: Adaptado de AAD(1998).

- Dimensionamento das vigas principais e peças do tabuleiro
 1. Cargas permanentes;
 2. Cargas acidentais;
 3. Momentos fletores máximos;
 4. Cortantes máximos;
 5. Dimensionamento das peças:
 - a) Flexão;
 - b) Cisalhamento na flexão;
 - c) Deslocamento vertical máximo.

- Ligações das peças estruturais
 1. Posicionamento dos anéis de ligação nas longarinas;
 2. Fixação do tabuleiro sobre as longarinas.

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA PONTE CONFORME A NBR 7190:1997

Na NBR 7190 de 1997 o dimensionamento passa a ser calculado conforme a probabilidade de estados limites. Para o cálculo dos esforços máximos será utilizado o programa computacional *Ftool versão 3.00*.

Para o dimensionamento da superestrutura, será considerado que esta deve estar bem fixada nas extremidades. Nesse trabalho não serão verificados a resistência da superestrutura às forças longitudinais de aceleração e frenagem e nem a resistência às forças devido ao vento.

Segue a sequência que será utilizada para o dimensionamento das peças da ponte:

- Familiarização com o projeto arquitetônico;
- Dimensionamento das vigas principais e peças do tabuleiro:
 1. Definição da geometria e da classe estrutural da ponte;
 2. Definição da classe de resistência da madeira;
 3. Estimativa da carga permanente;

4. Posicionamento transversal do veículo-tipo;
 5. Cálculo dos esforços máximos:
 - a) Momentos fletores máximos;
 - b) Cortantes máximos;
 - c) Deslocamentos verticais máximos;
 6. Combinações de ações:
 - a) Combinações últimas normais (estados limites últimos);
 - b) Combinações de longa duração (estados limites de utilização);
 7. Dimensionamento das peças:
 - a) Tensões normais;
 - b) Tensões tangenciais;
 - c) Deslocamento vertical máximo;
 - d) Conferência do peso próprio considerado.
- Ligações das peças estruturais
 1. Posicionamento dos anéis de ligação nas longarinas
 2. Fixação do tabuleiro sobre as longarinas.

4. DIMENSIONAMENTO DA PONTE

4.1. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E DA CLASSE ESTRUTURAL DA PONTE

A geometria da ponte dimensionada nesse trabalho será a demonstrada nas figuras 21, 22 e 23, que são baseadas no projeto de AAD com pequenas alterações.

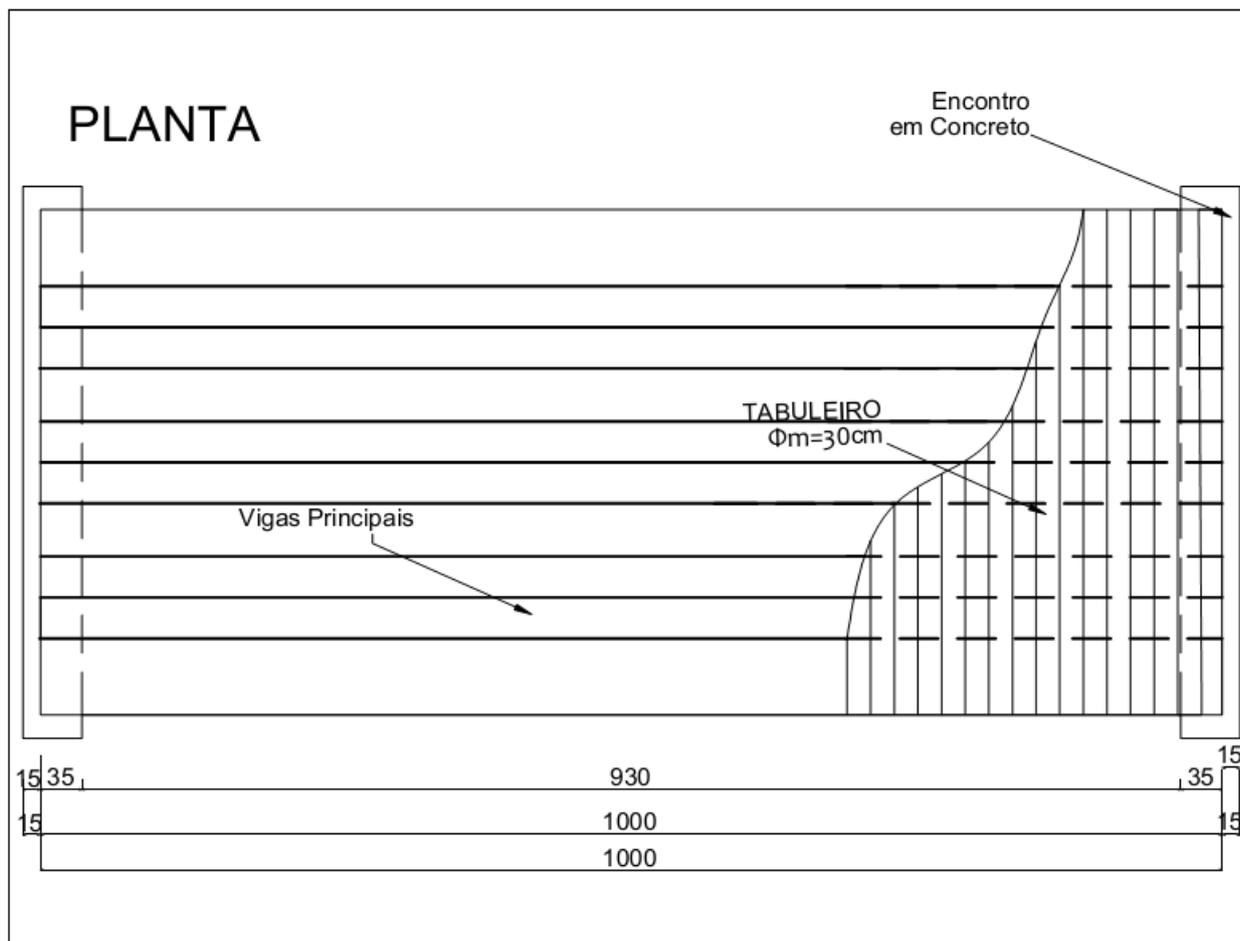


Figura 21 – Projeto da ponte de madeira - planta
Fonte: Os Autores.

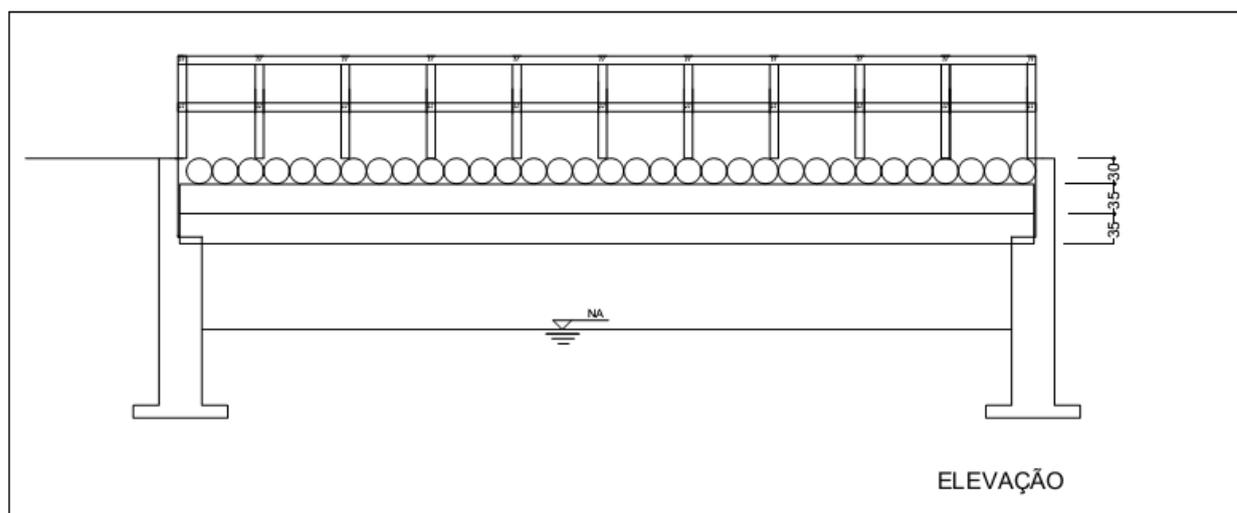


Figura 22 – Projeto da ponte de madeira - elevação
Fonte: Os Autores.

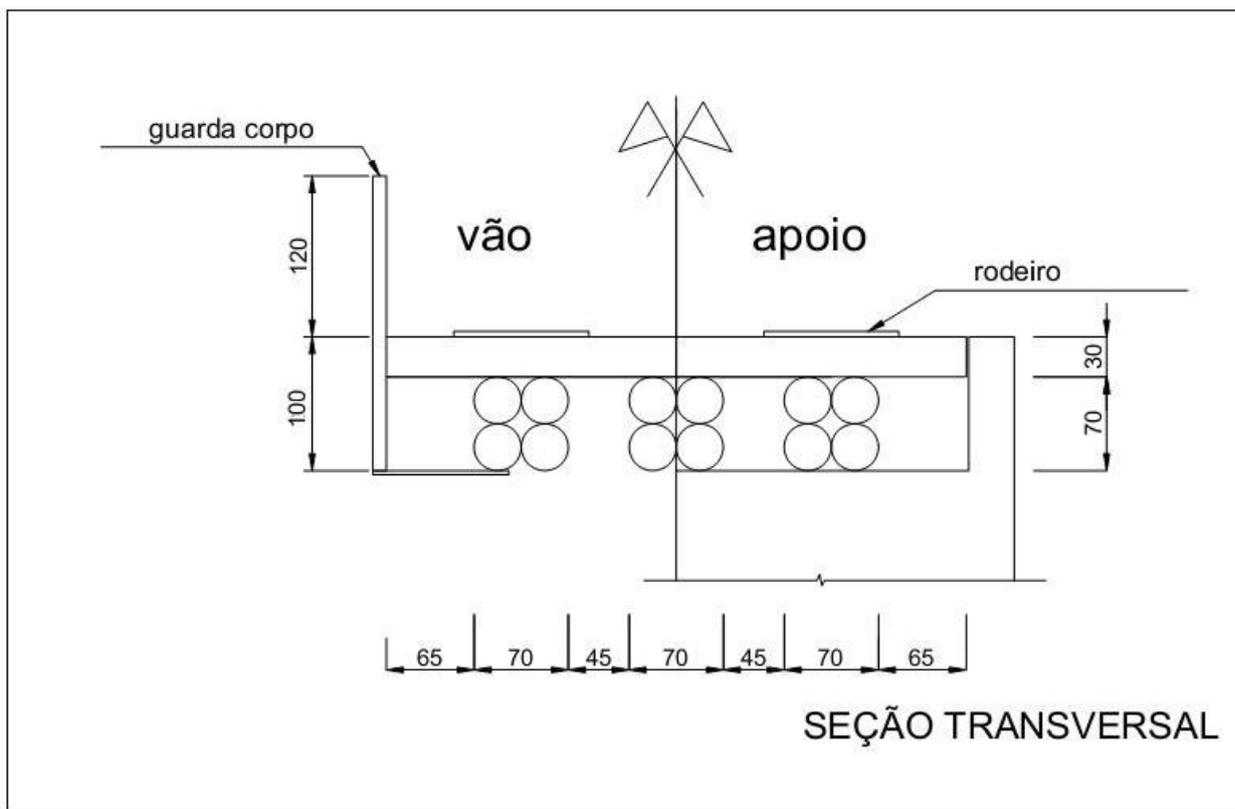


Figura 23 – Projeto da ponte de madeira – seção transversal
Fonte: Os Autores.

Como a utilização deve ser para vias rurais onde o volume de tráfego é baixo será dimensionada uma ponte Classe 30, pois como é citado no item 2.4.3, a classe 12 não é recomendada. Com isso se fez necessária a utilização de três longarinas em vez de duas como no projeto de AAD (1998).

4.2. DEFINIÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA

Conforme descrito no item 2.1 deste trabalho as classes mais utilizadas para pontes variam entre a C40 e a C60 das dicotiledôneas. Como provavelmente a classe mais fácil de ser encontrada é a menos resistente, no dimensionamento será considerado peças da classe C40 para formação do tabuleiro. Já para formação das longarinas será considerado peças da classe C60, pois, para classes menos resistentes, seriam necessárias peças com diâmetros muito elevados.

Nos cálculos deste trabalho será levada em consideração uma inclinação das fibras da madeira de até 6 graus, que é o admitido pela NBR 7190 sem ter que

considerar a grã irregular. No caso de inclinações maiores deve ser feito um cálculo levando em consideração a redução de resistência.

4.3. DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS DO TABULEIRO

Para o dimensionamento do tabuleiro deve-se calcular o momento máximo devido às cargas acidentais. Os efeitos do peso próprio podem ser desprezados por serem muito pequenos comparados aos efeitos do peso do veículo.

Como o tabuleiro é dividido em vários segmentos, foi calculado, utilizando a equação (1), o coeficiente de impacto para o menor vão, onde o coeficiente é maior e se tem a pior situação:

$$\varphi = 1 + \frac{20}{40 + 1} = 1,49$$

Para utilizar o programa ainda é necessário conhecer o módulo de elasticidade da madeira. Para obtê-lo, devemos calcular primeiro o coeficiente de modificação. De acordo com a NBR 7190:1997:

$k_{mod,1}$ – 0,90 para cargas de curta duração;

$k_{mod,2}$ – 0,80 para classes de umidade (3) e (4), admitindo pior caso;

$k_{mod,3}$ – 1,00 para madeiras de segunda categoria, admitindo uso de madeiras de qualidade no caso de pontes.

$$k_{mod} = 0,90 \cdot 0,80 \cdot 1,00 = 0,72$$

Sabendo que o módulo de elasticidade da madeira C40 das dicotiledôneas é 19.500 Mpa, conforme tabela 9, podemos calcular o módulo de elasticidade efetivo:

$$E_{M,ef} = 0,90 \cdot k_{mod} \cdot E_{c0,m} = 0,90 \cdot 0,72 \cdot 19500 = 12.636 \text{ Mpa}$$

Inserindo os dados acima no programa e considerando um trem de carga de 50 kN para cada roda, conforme tabela 1, tem-se a situação ilustrada na figura 24.

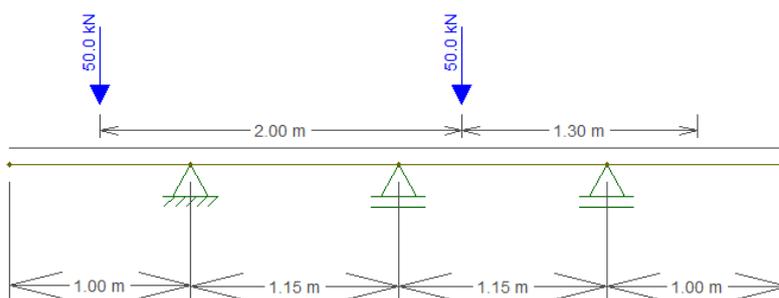


Figura 24 – Carregamento do veículo sobre o tabuleiro
 Fonte: Os Autores.

O momento fletor máximo positivo calculado pelo programa é ilustrado na figura 25.

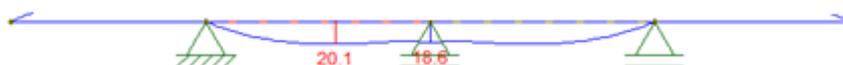


Figura 25 – Envoltória de momentos fletores da carga do veículo sobre o tabuleiro
 Fonte: Os Autores.

Conhecidos o momento fletor máximo e o coeficiente de impacto pode-se fazer a combinação de ação em limite de estado último utilizando a equação 6.

$$Md = 1,4 \cdot [20,10 + 0,75 \cdot (1,49 - 1) \cdot 20,10] = 38,48 \text{ kN.m}$$

Com o valor do momento no ELU pode-se dimensionar as peças, utilizando a equação 16.

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_c} = 0,72 \cdot \frac{40}{1,4} = 20,57 \text{ MPa}$$

Para seções circulares, o dimensionamento quanto a flexão pode ser feito da seguinte forma:

$$\sigma \geq \frac{M}{w}, \text{ onde } w = \frac{I}{y} = \frac{\pi D^4}{64} \cdot \frac{2}{D} = \frac{\pi D^3}{32} \quad (19)$$

Daí tem-se:

$$f_{c0,d} \geq \frac{M_{d,r}}{\frac{\pi \cdot D^3}{32}} \rightarrow D \geq \left(\frac{32 \cdot M_{d,r}}{\pi \cdot f_{c0,d}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

E com a equação desenvolvida pode-se achar o diâmetro mínimo das peças para seções circulares:

$$D \geq \left(\frac{32.38,48}{\pi \cdot 20,57 \cdot 10^3} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow D \geq 0,27m$$

Esse resultado indica que o diâmetro das peças deve ser de no mínimo 27 cm, então para o dimensionamento feito nesse trabalho será considerado que as peças terão um diâmetro médio de 30 cm.

4.4. DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS

4.4.1. ESTIMATIVA DA CARGA PERMANENTE:

I. Carga do rodeiro:

Admitindo que o rodeiro seja construído com tábuas de espessura de 4 cm e terá 1 metro de largura, sendo de acordo com a tabela 9 o peso específico aparente para madeiras de classe de resistência C40 950kg/m³, pode-se calcular sua carga:

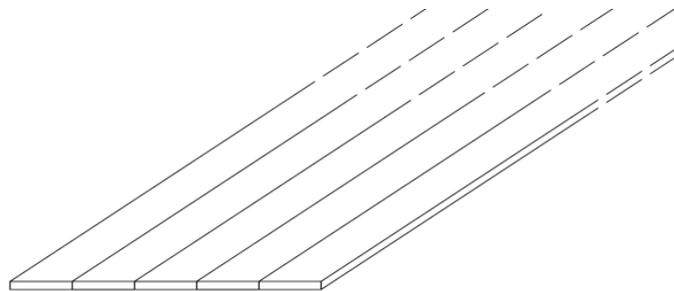


Figura 26 – Rodeiro
Fonte: Os Autores.

$$\text{Volume por metro} = 0,04 \cdot 1,00 \cdot 1,00 = 0,04 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso por metro} = 0,04 \cdot 950 = 38\text{kg}$$

$$\text{Carga do Rodeiro} = 38 \cdot 9,81 = 372,78\text{N} \cong 0,40\text{kN}$$

II. Carga do guarda corpo:

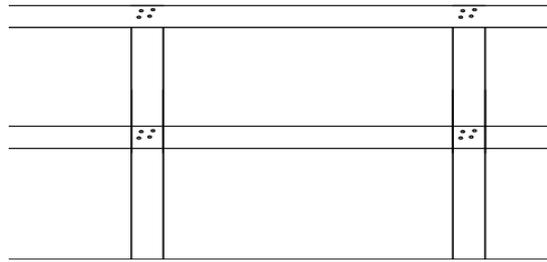


Figura 27 – Guarda-corpo
Fonte: Os Autores.

$$\text{Volume por metro} \cong 0,02\text{m}^3$$

$$\text{Peso por metro} = 0,02 \cdot 950 = 19\text{kg}$$

$$\text{Carga do guarda corpo por metro} = 19 \cdot 9,81 = 186,39 \text{ N} \cong 0,20\text{kN}$$

III. Carga do tabuleiro:

Admitindo que o diâmetro das peças encontrado no item 4.3 de 30 cm e que cada longarina irá suportar no máximo $1 + \frac{1,15}{2}$ metros de largura do tabuleiro temos:

$$\text{Volume por metro} = \pi \cdot \frac{0,30^2}{4} \cdot \frac{1}{0,30} \cdot \left(1 + \frac{1,15}{2}\right) = 0,37\text{m}^3$$

$$\text{Peso por metro} = 0,37 \cdot 950 = 351,50 \text{ kg}$$

$$\text{Carga do Tabuleiro} = 351,50 \cdot 9,81 = 3448,22\text{N} \cong 3,45\text{kN}$$

IV. Carga do peso próprio da longarina:

Sabendo que o módulo de elasticidade da madeira C60 das dicotiledôneas é 24.500 Mpa, conforme tabela 9, podemos calcular o módulo de elasticidade efetivo:

$$E_{M,ef} = 0,90 \cdot k_{mod} \cdot E_{c0,m} = 0,90 \cdot 0,72 \cdot 24500 = 15.876 \text{ MPa}$$

Admitindo uma suposição inicial que cada poste das longarinas terá diâmetro médio de 35cm e considerando 3% do peso dos anéis:

$$\text{Volume por metro} = \frac{0,35^2}{4} \cdot \pi \cdot 4 \cdot 1 = 0,38 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso por metro} = 0,38 \cdot 1000 \cdot 1,03 = 391,4 \text{ kg}$$

$$\text{Carga por metro} = 391,4 \cdot 9,81 = 3839,63 \text{ N} \cong 3,84 \text{ kN}$$

Carga permanente total

$$= \text{carga do rodeiro} + \text{carga do guarda corpo} + \text{carga do tabuleiro} \\ + \text{carga do peso próprio} = 0,40 + 0,20 + 3,45 + 3,84 = 7,89 \text{ kN/m}$$

4.4.2. POSICIONAMENTO TRANSVERSAL DO VEÍCULO-TIPO

Na figura 28 é ilustrada a linha de influência da distribuição transversal de cargas para efeitos do carregamento na longarina. Foi admitida uma linha de influência simplificada considerando apoios rígidos.

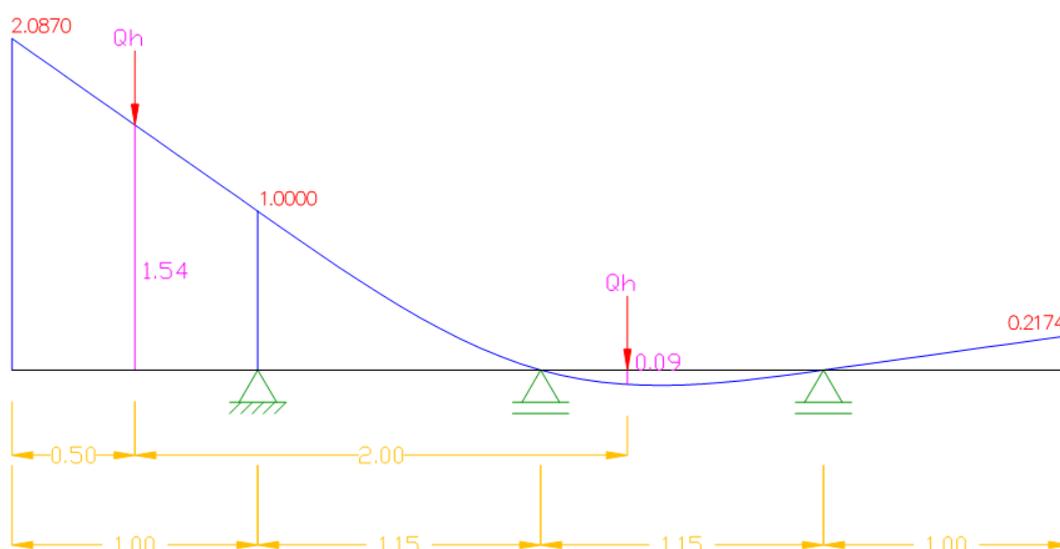


Figura 28 – Linha de influência das ações do veículo sobre o tabuleiro
Fonte: Os Autores.

Utilizando o gráfico de linha elástica na figura 28, podemos encontrar a carga homogeneizada para ação máxima na ponte:

Q_h – trem tipo homogeneizado

Utilizando os dados da tabela 7 para Classe 30 e a disposição do veículo ilustrado na figura 9 temos:

$$Q_h = \left(\frac{300 - 5 \cdot 3.6}{6} \right) = 35 \frac{\text{kN}}{\text{roda}}$$

A máxima ação ocorre quando:

$$\frac{Q_h}{\text{eixo}} = 35 \cdot (1,54 - 0,09) = 50,75 \text{ kN}$$

De acordo com tabela (1) a carga distribuída na ponte é a de $q=5 \text{ kN/m}^2$.

$$q \cong 5 \cdot \left(\frac{2,09 \cdot 2,15}{2} \right) \cong 11,23 \text{ kN/m}$$

4.4.3. CÁLCULO DOS ESFORÇOS MÁXIMOS

I. Reações de apoio

A figura 29 ilustra o carregamento devido às cargas permanentes e as reações de apoio calculadas pelo programa:

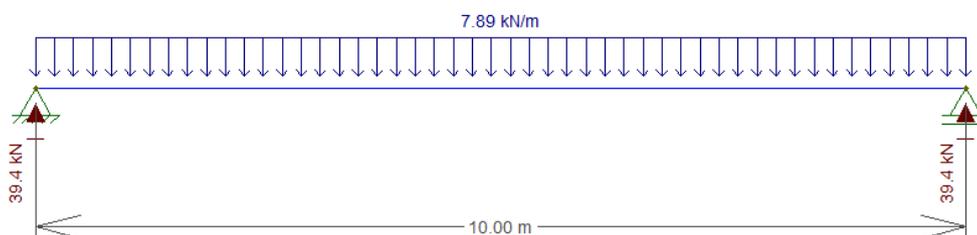


Figura 29 – Carregamento do peso próprio da longarina e reações de apoio
Fonte: Os Autores.

A figura 30 ilustra o carregamento devido às cargas acidentais e as reações de apoio calculadas pelo programa, conforme figura 11:

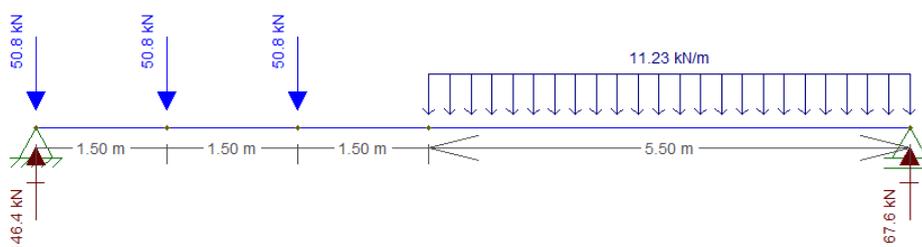


Figura 30 – Posicionamento das cargas acidentais para cálculo das reações de apoio
Fonte: Os Autores.

II. Momentos fletores máximos

O momento fletor máximo devido às cargas permanentes, ilustrado na figura 31, foi calculado com a mesma posição das cargas ilustrada na figura 29.



Figura 31 – Momento fletor máximo devido às cargas permanentes sobre a longarina
Fonte: Os Autores.

Para o cálculo do momento fletor máximo devido as cargas acidentais, as cargas foram posicionadas de acordo com figura 10, como pode ser visto na figura 32:

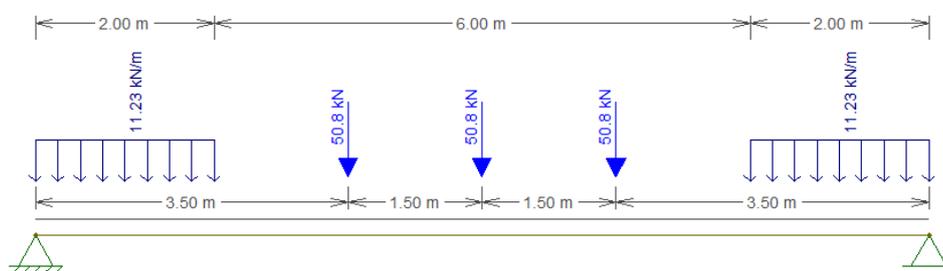


Figura 32 – Posicionamento do trem tipo para cálculo do momento fletor máximo
Fonte: Os Autores.

O resultado encontrado pelo programa pode ser visto na figura 33:



Figura 33 – Momento fletor máximo devido às cargas acidentais sobre a longarina
Fonte: Os Autores.

III. Esforços cortantes máximos

Os esforços cortantes máximos devido as cargas permanentes, ilustrado na figura 34, foi calculado com a mesma posição das cargas ilustrada na figura 29.

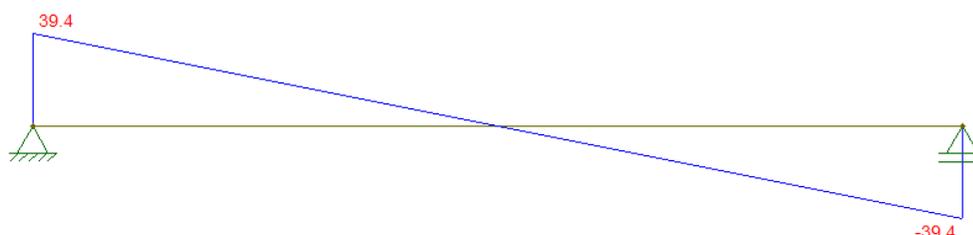


Figura 34 – Esforço cortante máximo devido às cargas permanentes sobre a longarina
Fonte: Os Autores.

Para o cálculo do esforço cortante máximo devido às cargas acidentais, as cargas foram posicionadas de acordo com figura 12, como pode ser visto na figura 35:

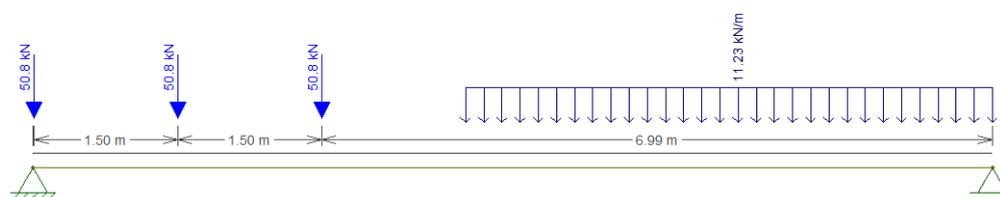


Figura 35 – Posicionamento do trem tipo para cálculo do esforços cortantes
Fonte: Os Autores.

O resultado encontrado pelo programa pode ser visto na figura 36:

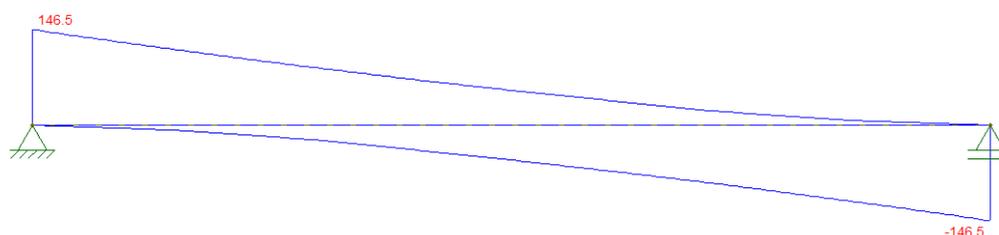


Figura 36 – Esforço cortante máximo devido às cargas acidentais sobre a longarina
Fonte: Os Autores.

4.4.4. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

I. Estados limites últimos

Utilizando as equações 6, 7 e 8 e os valores encontrados pelo programa, podem ser calculados os valores de projeto para o momento máximo, cortante máxima e reação de apoio máxima:

$$M_d = 1,4.98,6 + 1,4. [327,20 + 0,75. (1,4 - 1). 327,20] = 733,54 \text{ kN.m}$$

$$Q_d = 1,4.39,4 + 1,4. [146,5 + 0,75. (1,4 - 1). 146,5] = 321,79 \text{ kN}$$

$$R_d = 1,4.39,40 + 1,4.146,4 = 260,12 \text{ kN}$$

II. Estado limite de serviço

Utilizando a equação 9 podemos verificar qual será o valor do deslocamento vertical máximo admitido:

$$\delta_k \leq \frac{L}{360} \rightarrow \delta_k \leq \frac{10}{360} \rightarrow \delta_k \leq 0,03\text{m}$$

4.4.5. DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS

I. Tensões Normais

Para seções circulares, o dimensionamento quanto a flexão pode ser feito utilizando a equação 20:

$$\sigma \geq \frac{M}{w}, \text{ onde } w = \frac{I}{y} = \frac{\frac{20.\pi.D^4}{64}}{D} = \frac{20.\pi.D^3}{64} \quad (20)$$

Daí tem-se:

$$f_{c0,d} \geq \frac{M_{d,r}}{\frac{20.\pi.D^3}{64}} \rightarrow D \geq \left(\frac{64.M_{d,r}}{20.\pi.f_{c0,d}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

E com a equação desenvolvida pode-se calcular o diâmetro mínimo das peças para seções circulares:

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_c} = 0,72 \cdot \frac{60}{1,4} = 30,86 \text{ MPa}$$

$$D \geq \left(\frac{64.733,54}{20.\pi.30,86.10^3} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow D \geq 0,29 \text{ m}$$

Esse resultado indica que o diâmetro mínimo dos postes da longarina deve ser de no mínimo 29 cm para suportar a flexão devido aos carregamentos.

II. Tensões Tangenciais

Para encontrar a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, quando não se conhece a espécie da madeira, usa-se a equação 16:

$$f_{v0,d} = 0,10 \cdot f_{c0,d}$$

Nesse caso onde a classe resistência já está definida pode-se calcular a resistência ao cisalhamento, utilizando:

$$f_{v0,d} = 0,72 \cdot \frac{8}{1,8} = 3,2 \text{ MPa}$$

Os resultados tem uma diferença menor que 10% do valor final. Para este dimensionamento será utilizada a primeira opção, como se não fosse conhecida a espécie da madeira.

Com o valor da resistência da madeira e admitindo o uso de anéis de 9 polegadas pode-se calcular a resistência do anel, utilizando a equação 21:

$$R_{anel} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{v0,d} = \frac{\pi \cdot (0,23)^2}{4} \cdot 30,86 \cdot 10^2 = 128,22 \text{ kN}$$

Como os anéis metálicos irão resistir às tensões de cisalhamento na viga, o diâmetro das peças deve ser calculado levando em consideração a resistência dos anéis e o espaçamento entre eles. Para esse cálculo pode-se considerar a equação 22, levando em consideração que na nossa seção são dois anéis que resistem as forças:

$$e \geq \frac{2 \cdot R_{anel} \cdot I}{Q_d \cdot M_s} \quad (21)$$

Substituindo o momento de inércia e o momento estático correspondente à viga calculada, pode-se isolar o diâmetro dos postes que compõe a viga:

$$e \leq \frac{2 \cdot R_{anel} \cdot \frac{20 \cdot \pi \cdot D^4}{64}}{Q_d \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{4}} \rightarrow D \geq \frac{8 \cdot Q_d \cdot e}{20 \cdot R_{anel}}$$

Admitindo o menor espaçamento entre os anéis, próximo ao apoio das longarinas, seja de 30 cm, ou uma vez e meia o diâmetro do anel, como exigido pela NBR 7190:1997 :

$$D \geq \frac{8 \cdot 321,79 \cdot 0,35}{20 \cdot 128,22} \rightarrow D \geq 0,35m$$

Esse resultado indica que o diâmetro mínimo dos postes da longarina deve ser de no mínimo 35 cm para suportar ao cisalhamento máximo nas vigas.

III. Deslocamento vertical máximo

Sabendo que o deslocamento vertical máximo verificado no estado limite de utilização é dado pela equação 16, e que os deslocamentos verticais devido às cargas permanentes e acidentais são dados pelas equações 4 e 5, tem-se:

$$\delta_k = \delta_{g,k} + \delta_{q,k} \quad (22)$$

$$\frac{L}{360} \geq \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_{M,ef} \cdot I} + \frac{P}{48 \cdot E_{M,ef} \cdot I} \cdot [L^3 + 2 \cdot b \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot b^2)] \quad (23)$$

Substituindo o momento de inércia da seção, $I = \frac{20.\pi.D^4}{64}$, podemos isolar o diâmetro:

$$D \geq \sqrt[4]{\frac{1152}{L.\pi} \cdot \left(\frac{5.g.L^4}{384.E_{M,ef}} + \frac{P}{48.E_{M,ef}} \cdot (L^3 + 2.b.(3.L^2 - 4.b^2)) \right)}$$

E substituindo os valores da ponte dimensionada neste trabalho temos:

$$D \geq \sqrt[4]{\frac{1152}{10.\pi} \cdot \left(\frac{5.7,89.10^4}{384.15876.10^3} + \frac{50,75}{48.15876.10^3} \cdot (10^3 + 2.3,5.(3.10^2 - 4.3,5^2)) \right)}$$

$$D \geq 0,31m$$

Esse resultado indica que o diâmetro dos elementos da longarina deve ser de no mínimo 31 cm para que não haja deslocamentos verticais superiores aos previstos em norma.

IV. Conferência do peso próprio

Como o diâmetro dimensionado é igual ao diâmetro suposto inicialmente, de 35 cm, não é necessária uma conferência, pois o peso já está corretamente considerado.

4.5. RECOMENDAÇÕES PARA LIGAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS

4.5.1. POSICIONAMENTO DOS ANÉIS DE LIGAÇÃO NAS LONGARINAS

Os anéis a serem utilizados e considerados no dimensionamento devem ser de 9" e estar de acordo com a ABNT NBR 8800.

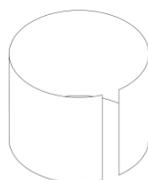


Figura 37 – Anel metálico
Fonte: Os Autores.

Na ligação das peças circulares componentes devem ser utilizados parafusos tipo barra rosca ($\varnothing = 1/2$ " , mais porcas e arruelas) para apenas manter as peças solidarizadas entre si e permitir o pleno desenvolvimento dos efeitos dos anéis. Não foi considerada a influencia da rigidez do parafuso na transmissão de esforços.

Deve-se tratar e impermeabilizar cuidadosamente a madeira onde forem feitos os buracos para os parafusos e os entalhes para encaixe dos anéis, pois nesses locais a água irá se infiltrar facilmente.

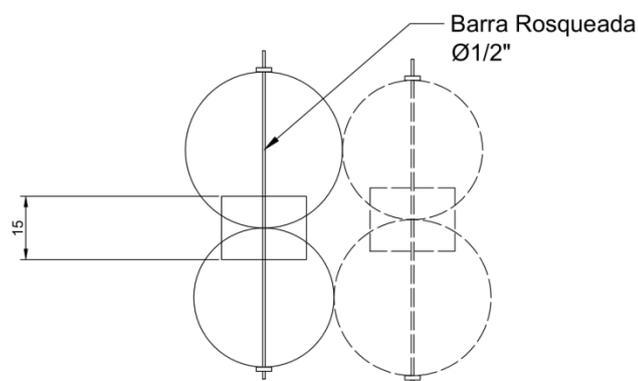


Figura 38 – Esquema de ligação dos anéis metálicos
Fonte: Os Autores.

Para posicionamento dos anéis devem ser respeitados os critérios do item 2.4.5, que também foram considerados no dimensionamento.

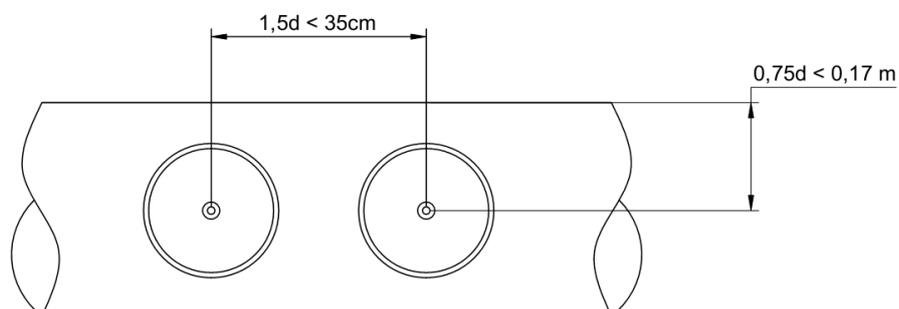


Figura 39 – Verificação dos critérios de distanciamento dos anéis metálicos
Fonte: Os Autores.

Como quanto mais próximos dos apoios maiores são os esforços cisalhantes, o distanciamento dos anéis pode ser maior no centro da viga:

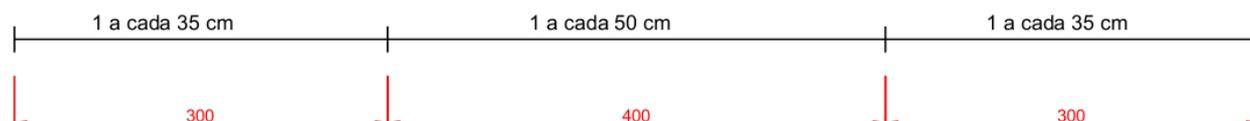


Figura 40 – Distanciamento dos anéis metálicos
Fonte: Os Autores.

4.5.2. FIXAÇÃO DO TABULEIRO SOBRE AS LONGARINAS

Como sugerido no item 2.4.4 deste trabalho é ilustrado na figura 41 uma sugestão para fixação do tabuleiro sobre as longarinas.

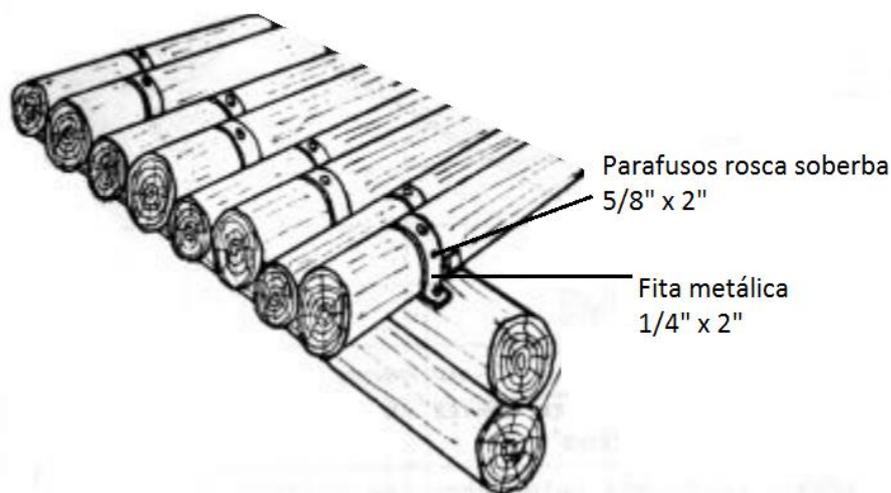


Figura 41 – Solidarização dos postes do tabuleiro na viga por cintamento
Fonte: Os Autores.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No dimensionamento da ponte, primeiramente foi considerado utilizar a classe C40 das dicotiledôneas para formação das longarinas. Entretanto, na verificação quanto ao cisalhamento foi observado que seria necessárias peças com um diâmetro muito elevado e, por isso, o dimensionamento foi feito para peças da classe C60.

A tabela 41 apresenta um comparativo entre o projeto de AAD (1998) e os resultados encontrados nesse trabalho.

Tabela 10 - Comparativo do dimensionamento feito nesse trabalho e do projeto de AAD (1998).

AAD (1998) – PONTE CLASSE 12	ESTE TRABALHO - PONTE CLASSE 30
Critérios da NBR 7190 de 1982	Critérios da NBR 7190 de 1997
Vão de 10 metros	Vão de 10 metros
Tabuleiro com diâmetro das peças de 20cm	Tabuleiro com diâmetro das peças de 30cm
Duas longarinas ou vigas principais	Três longarinas ou vigas principais
Diâmetro das peças de 35 cm	Diâmetro das peças de 35 cm
Anéis metálicos de 8 polegadas	Anéis metálicos de 9 polegadas
Considerada ponte classe 12 – veículo tipo de 120kN	Considerada ponte classe 30 – veículo tipo de 300kN

Fonte: Os Autores.

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões desse trabalho são:

- O modelo de ponte sugerido é o de ponte em viga, que são as mais práticas e mais encontradas para pontes de madeira. As vigas utilizadas serão na forma de vão único, ou seja, vigas bi-apoiadas. Para o tabuleiro e para as longarinas, serão utilizadas vigas roliças.
- Para a construção da ponte, a madeira utilizada deve ser de classe de resistência C40 das dicotiledôneas para as peças do tabuleiro e C60 para os postes da longarina. Como exemplo de espécies, podem ser citadas itaúba, jatobá, cumaru, maçaranduba e o eucalipto citriodora. O eucalipto citriodora é uma espécie fácil de ser encontrada na região sul e sudeste, muito utilizada para construção de pontes e chega facilmente à classe de resistência C60.
- De acordo com os dimensionamentos feitos, foi verificado que a principal alteração na atualização da norma para estruturas de madeira, NBR 7190, foi quanto à mudança de tensões admissíveis para estados limites de verificação. Essa mudança implica na fase de determinação dos esforços de projeto, enquanto os cálculos de dimensionamento continuam os mesmos no caso de pontes. Dessa forma o projeto de AAD (1998), dimensionado conforme a norma de 1982, foi de grande utilidade, tanto para estabelecimento de uma metodologia, quanto para comparação e utilização de geometrias e resultados de cálculo.

Finalmente, conclui-se que para a construção da ponte o diâmetro médio das peças do tabuleiro deve ser de 30 centímetros. Na ponte, de classe 30, devem ser utilizadas três longarinas, diferentemente do projeto de AAD (1998), que era uma ponte classe 12 e precisava de apenas duas. Cada longarina deve ser composta de quatro postes e o diâmetro médio necessário para os postes para o vão de 10 metros é de 35 centímetros.

7. RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMOS ESTUDOS

- Analisar o quanto impactante são as ações do vento e longitudinais, de aceleração e frenagem, em uma ponte como a dimensionada neste trabalho.
- Analisar o quanto pode ser reduzida a seção transversal da longarina central da ponte, que neste trabalho foi considerada igual às longarinas laterais;
- Fazer uma tabela relacionando diferentes vãos com o diâmetro necessário dos postes para formação da longarina;
- Analisar as diferenças entre esta ponte e uma ponte composta apenas de longarinas roliças simples, com maior quantidade de vigas;
- Analisar os efeitos da mudança do tabuleiro e a colocação de transversinas;
- Analisar os efeitos da construção ser feita com balanço nas longarinas.

REFERÊNCIAS

AAD, Projetos Consultoria e Engenharia. **Projeto de Ponte em Estrutura de Madeira sobre o Rio Itaquí**: na Interseção com a Rua Deusulina Pozer Moisés - São José dos Pinhais, Paraná, 03/05/1998.

ABDALLA, Anna Cristina Pacheco Ballassini. **Utilização de madeira de Eucalyptus em estruturas de pontes**. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2002.

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

CALIL JUNIOR, Carlito *et al.* **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006.

CALIL JUNIOR, Carlito. BRITO, Leandro Dussarrat. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos: Suprema, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de projetos de obras-de-arte especiais**. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma 121**: Pontes e Viadutos Rodoviários – Fundações. Rio de Janeiro, 2009.

FLORIAN, Alexandre. Métodos de tratamento de madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, edição nº129, nov. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1566&subject=Preserva%E7%E3o&title=M%E9todos%20de%20tratamento%20de%20madeira>. Acesso em 31 mar. 2013.

FRANCISCHINELLI, Antônio. Postes de eucalipto tratado. **Revista da Madeira**, Curitiba, edição nº97, jun. 2006. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=918&subject=Emais&title=Postes_de_eucalipto_tratado>. Acesso em 31 mar. 2013.

FUSCO, Péricles Brasiliense *et al.* Norma de Projeto de Estruturas de Madeira. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo: EPUSP, 1996.

MORAIS, André. Produtos para tratar madeira previnem perdas. **Revista da Madeira**, Curitiba, edição nº117, nov. 2008. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1332&subject=Preservantes&title=Produtos%20para%20tratar%20madeira%20previnem%20perdas>. Acesso em 31 mar. 2013.

MORESCHI, João Carlos *et al.* Propriedades tecnológicas da madeira. Joinville, 2009. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlando/materiais/Tecnologiamadeira.pdf>>. Acesso em 05 set. 2013.

NÉRI, Antônio C.; GONÇALVES, Raquel; HERNANDEZ, Roger E. Forças de corte ortogonal em madeira de eucalipto. **Revista da Madeira**, Curitiba, edição nº115, jul.

2008. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1295&subject=E>. Acesso em 31 mar. 2013.

OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva. **Secagem e tratamento de madeira na fazenda**. Belo Horizonte: CPT, 2009.

PFEIL, Walter. **Estruturas de Madeira**. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, Editora S.A., 1982

PFEIL, Walter. **Estruturas de Madeira**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, Editora S.A., 2003

SILVA, Paulo H. Muller da. Tratamentos prolongam uso da Madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, edição nº100, nov. 2006. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revista_damadeira_materia.php?num=984&subject=Preservantes>. Acesso em 31 mar. 2013.

TERNI, Antonio Wanderley; OLIVEIRA, Luiz Eduardo; FERREIRA, José Bento. **O Impacto da Norma 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira na disciplina “Estruturas de Madeira”**. São Paulo, 2001.