



SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA - SBM

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE - UFAC

MESTRADO PROFISSIONAL EM MATEMÁTICA - PROFMAT

FERNANDO DA SILVA SOUZA

A GEOMETRIA APLICADA À CONSTRUÇÃO DE UMA PONTE EM ARCO

RIO BRANCO - ACRE

2016

SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA - SBM
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE - UFAC
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATEMÁTICA - PROFMAT

FERNANDO DA SILVA SOUZA

A GEOMETRIA APLICADA À CONSTRUÇÃO DE UMA PONTE EM ARCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional – PROFMAT, pólo Rio Branco – AC, como requisito **para a obtenção do título de mestre em Matemática.**

Orientador: prof. Dr. José Ivan da Silva Ramos

RIO BRANCO - ACRE

2016

Esta dissertação foi julgada suficiente como um dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Matemática e aprovada em sua forma final pelo programa de mestrado profissional em Matemática em rede Nacional, vinculado à Universidade Federal do Acre.

Rio Branco, 15 de abril de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Ivan da Silva Ramos (UFAC - AC)
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Tomás Daniel Menéndez Rodríguez (UNIR - RO)
Membro Externo

Prof. Dr. Marcos Aurélio de Alcântara (UFAC - AC)
Membro

Prof. Me. Josean da Silva Alves (UFAC - AC)
Suplente

Dedico esta dissertação

À minha família, em especial a minha mãe Rozânia, à minha esposa Jamylena, ao meu irmão Rafael e ao meu orientador Dr. José Ivan.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, Todo-Poderoso, dono de toda a sabedoria e conhecimento, pela graça e realização do sonho de concluir o mestrado.

Agradeço a minha esposa Jamylena e principalmente a minha mãe Rozânia, que é também ao mesmo tempo pai, que tanto me ajudou a conquistar este sonho, com a sua dedicação, carinho e estímulo ao estudo, para a concretização de mais uma etapa da minha vida.

Agradecimento especial ao meu orientador, o Prof. Dr. José Ivan da Silva Ramos, sem o qual não teria conseguido a formação, pois com a sua atenção e carinho me deu apoio nos momentos difíceis, “puxou a orelha” quando precisava, e sempre me estimulava a estudar e a crescer como um grande profissional.

Agradeço a Universidade Federal do Acre – UFAC, pela oportunidade de realizar este curso de mestrado, aos funcionários, aos colegas de turma e principalmente aos professores que tanto contribuíram para a minha formação.

Agradeço aos Professores da Engenharia Florestal Tarcísio e Thiago que dispuseram em ajudar com a doação e a serragem da madeira junto à prefeitura do Campus. Agradeço à Reitoria e à administração do Parque Zoobotânico que contribuíram para a realização da dissertação.

Resumo

Na construção de pontes, diversos fatores são levados em consideração: finalidade política, econômica ou social, concepção, geometria, condições de contorno, propriedades dos materiais e análise estrutural. Neste Trabalho de Conclusão de Curso, utilizando conceitos geométricos já conhecidos no passado, elaboramos um projeto e, com ele, construímos uma ponte em arco, no Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre – UFAC, observando o funcionamento de sua estrutura, a carga máxima a ser suportada por ela e os custos da execução de seu projeto.

Palavras chave: Geometria, Arcos e Pontes.

Abstract

In at the construction of bridges, several factors are taken into consideration: political, economic or social purpose, design, geometry, boundary conditions, material properties and structural analysis. In this work of Completion of course, using geometric concepts already known in the past, we developed a project, and with it, build an arch bridge, the Zoo and Botanical Park of the Federal University of Acre - UFAC, observing the operation of its structure, the maximum load to be supported by it and the costs of running your project.

Keywords: Geometry, arches and bridges.

Lista de Siglas

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

PZ – Parque Zoobotânico

S.I. – Sistema Internacional de Unidades

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

UFAC – Universidade Federal do Acre

Lista de Símbolos

A : área

d : distância

F : Força

F_x : Força na direção x

F_y : Força na direção y

F_z : Força na direção z

f_c : Resistência a Compressão paralela às fibras

f_{cn} : Resistência a Compressão normal às fibras

f_d : Tensão resistente de projeto

f_k : Resistência característica

f_M : Resistência a Flexão

f_T : Resistência a Tração paralela às fibras

f_{Tn} : Resistência a Tração normal às fibras

f_U : Resistência a U % de Umidade

f_V : Resistência ao Cisalhamento

f_{12} : Resistência a 12 % de Umidade

k_{mod} : Coeficiente de modificação

M_0 : Momento de uma Força

M_x : Momento na direção x

M_y : Momento na direção y

M_z : Momento na direção z

MPa : Mega-Pascal ($10^6 Pa$)

N : Newton

m : metro

Pa : Pascal (N/m^2)

γ_w : Coeficiente de segurança

ρ : Densidade

ρ_{ap} : Densidade aparente

$\rho_{básica}$: Densidade básica

σ : Tensão

Sumário

1.0 Introdução	10
2.0 Revisão Bibliográfica.....	11
2.1 Breve Histórico sobre as Pontes.....	11
2.2 Classificações Gerais.....	16
2.3 Composição de uma Ponte	19
Capítulo 1 – Conceitos Preliminares e Fundamentações	25
1.1 Geometria dos Arcos	25
1.1.1 Definição.....	25
1.1.2 Classificação funcional.....	26
1.1.3 Classificação Formal	31
1.2 Teoria das Estruturas	35
1.2.1 Resistência dos Materiais	35
1.2.2 Estruturas	38
Capítulo 2 – Construção de uma Ponte em arco	42
2.1 Área objeto da construção	42
2.2 Características Técnicas adotadas na Concepção da Ponte	44
2.2.1 Definição do Arco.....	44
2.2.2 Definição da Estrutura	45
2.2.3 Definição do Material da Estrutura.....	45
2.2.4 Desenho do Projeto.....	47
2.3 A Construção Passo a Passo da Ponte.....	50
2.3.1 Execução dos blocos de apoio	50
2.3.2 Execução das Peças de Madeira	56
2.3.3 Execução do Projeto de Construção da Ponte – Instalação das Peças.....	62
2.3.4 Explicação matemática e de Engenharia na Construção da Ponte	68
2.3.5 Cálculo de carga máxima na Estrutura da Ponte	70
2.3.6 Custos na execução da Ponte construída.....	78
Considerações Finais.....	81
Referências Bibliográficas.....	83

1.0 Introdução

Desde os tempos antigos, o desafio do homem sempre foi ir mais além das limitações da capacidade, principalmente quando o assunto era transpor obstáculos. Para isso, o ser humano aprendeu a utilizar e empregar os materiais em construções. Dentre eles podemos citar os metais, a madeira e as rochas que foram as mais utilizadas pela excelente resistência e durabilidade. Construções como as pontes medievais, as Pirâmides do Egito e a Grande Muralha da China são excelentes exemplos de engenharia, realizadas por povos com técnicas primitivas quando comparadas a tecnologia atual.

A construção de pontes, em especial, é um dos principais desafios, principalmente quando se trata de vencer grandes distâncias (vãos), tem por objetivo interligar pontos inacessíveis e transpor obstáculos naturais ou artificiais sejam eles rios, vales, dentre outros. Relatos históricos apontam que as primeiras pontes surgiram de forma natural, com a queda de troncos de árvores sobre os rios, possibilitando travessias. Foi através desses incidentes que o homem começou a construir as primeiras pontes feitas com madeira e amarrações em cipó, pranchões e até mesmo rochas para que estas fossem duradouras e não caíssem facilmente. (PONTE, 2015)

É de se destacar que não é possível construir pontes sem o conhecimento pormenorizado dos tópicos de Geometria ensinados comumente nos ensinamentos básico e superior que envolvem diretamente a Geometria Espacial aplicada às Construções. A ideia desta dissertação é desenvolver um estudo dos Arcos utilizando as suas formas geométricas para construções de pontes, analisando suas particularidades e entendendo o funcionamento das estruturas que levam os seus formatos. Esse estudo, como mostram as bibliografias aqui indicadas, envolve muitas ferramentas matemáticas.

Inicialmente fizemos uma revisão bibliográfica que contextualiza o tema da pesquisa e faz uma abordagem sobre as características estruturais e geométricas de pontes existentes em várias partes no mundo.

No primeiro capítulo são apresentadas as fundamentações para a dissertação, abordando os conceitos básicos da Geometria dos arcos e das estruturas.

No segundo capítulo, apresentamos o passo a passo da construção de uma ponte em arco, realizada no sangradouro de um dos açudes do Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre.

Ao final, depois de tecermos as considerações finais acerca do estudo realizado, disponibilizamos as Referências bibliográficas que nortearam a pesquisa.

2.0 Revisão Bibliográfica

2.1 Breve Histórico sobre as Pontes

As pontes têm o seu papel fundamental na história, tanto no surgimento como nas conquistas dos povos antigos. Era comum a construção de pontes de caráter rudimentar, a utilizar materiais de fácil obtenção como madeira e cipós com poucas técnicas de beneficiamento. (NYSTROM, 1997)

Para se ter ideia de uma ponte rudimentar, podemos visualizar na Figura 1 uma ponte para peões sobre o rio kotmale no Sri Lanka.



Figura 1 – Ponte para peões sobre o rio kotmale no Sri Lanka
Fonte: <http://10mosttoday.com/10-scariest-rope-bridges-in-the-world>

Registros históricos apontam que as pontes em arco surgiram cerca de 4000 a.C., na Mesopotâmia e no Egito, mais tarde, cerca de 500 a.C., na Pérsia e Grécia. Foi nessa época, exatamente entre 550-486 a.C., que o rei Dário I da Pérsia mandou construir uma ponte para cruzar o estreito de Bósforo a fim de invadir a Grécia, uma passarela de novecentos metros para atravessar o mar. (BARSASABER, 2015)

A ponte de pedra em arco mais antiga, ainda sólida até os dias atuais, está situada no rio meles, na região da Esmirna, Turquia, datada do século IX a.C. (NYSTROM, 1997).

Mesmo que há milhares de anos a.C., os povos chineses, persas e gregos já construíssem pontes e passarelas em madeira, utilizando estruturas de cavaletes, foram

os romanos que alavancaram o progresso na construção de pontes, vencendo vãos com solidez, utilizando uma estrutura simples e esteticamente bela: o arco semicircular, e a admissão através da invenção do cimento, material amplamente utilizado até os dias atuais. (BARSASABER, 2015)

Os romanos descobriram que a mistura em altas temperaturas de rochas calcárias e cinzas vulcânicas produziam o Clínquer, a base do cimento, que após pulverizá-la era capaz de produzir argamassas e concreto para unir as pedras. Os romanos chamavam tal cimento primitivo de pozolana, já que procediam da região de Pozzuoli (Nápoles). Com o advento do cimento, os romanos foram capazes de construir estradas, pontes e aquedutos. (BARSASABER, 2015)

Quanto à estrutura, os romanos herdaram dos etruscos a arte de construir arcos e abóbodas. Partindo do arco semicircular chegaram a grandes espaços entre as vigas verticais, e sob as horizontais, extensos aquedutos. (BARSASABER, 2015)

A primeira ponte romana foi construída em 621 a.C. no Tibre, chamada de *Pons Sublicius* que quer dizer ponte das estacas, entretanto a passarela mais destacada foi construída sobre o rio Tibre em 134 d.C., ainda sólida nos dias atuais, é chamada de Ponte de Sant'Angelo (Figura 2), que mede 135 metros de comprimento e 7 metros de altura, realizada pelo imperador Adriano que queria convertê-la em entrada triunfal desde a cidade até o mausoléu. (BARSASABER, 2015)



Figura 2 – Ponte Sant'Angelo

Fonte: <http://www.euroclubschools.org/page26.htm>

A beleza da ponte Sant'Angelo está na construção simétrica dos cinco arcos semicirculares, somente utilizando rocha e cimento como aglutinador.

Outra ponte romana de destaque foi construída sobre o rio Tejo em 106 d.C., chamada de Ponte de Alcântara (Figura 3), localizada em Alcântara, na Espanha, realizada pelo imperador Trajano, com 194 metros de comprimento e aproximadamente 45 metros de altura. Com 6 arcos assimétricos assentados sobre cinco pilares com alturas distintas sobre o terreno. (BARSASABER, 2015)



Figura 3 – Ponte de Alcântara

Fonte: <http://olhares.uol.com.br/ponte-romana-alcantara-espanha-foto131598.html>

Não eram só os romanos que realizavam grandes feitos, durante toda a Idade Média o título de ponte mais longa do mundo foi dado a Ponte Alping, na China, construída em 1151 d.C. durante o reinado de Shaoxing, da dinastia Song, unindo as cidades de Anhai e Shuitou, com 2.223 metros de comprimento e 331 vãos em blocos de rochas de granito trazidas da Ilha Jinmen (atual Taiwan), apoiados por pilares de rochas em cada feixe pesando aproximadamente 25 toneladas. (BARSASABER, 2015)



Figura 4 – Ponte Alping

Fonte: <http://www.touristlink.com.br/Rep%C3%BAblica-Popular-da-China/anping-ponte/overview.html>

A queda do Império Romano diante dos bárbaros, no século V, trouxe uma perda significativa para a construção de obras públicas, haja visto que os segredos arquitetônicos e a utilização do cimento foram esquecidos por um bom tempo. Uma construção no período da Renascença, entre os séculos XIV e XV, que representa o resgate das construções romanas é a Ponte Vecchio (Figura 5), em Florença (Itália). Composta por dois pilares e três arcos, duas fileiras de lojas, uma em cada lado, uma praça central aberta para o rio e um corredor que atravessa, por cima, a ponte de um extremo a outro, a passarela constitui um dos grandes símbolos da cidade. (BARSASABER, 2015)



Figura 5 – Ponte Vecchio

Fonte: <http://www.hotelroomsearch.net/top-attractions/ponte-vecchio>

Uma outra construção que também representa o resgate arquitetônico é a Ponte de Rialto (Figura 6) em Veneza, Itália, construída em 1591 com 27 metros de comprimento em arco e uma altura máxima de 6,40 metros. (LUCKO, 1999)



Figura 6 – Ponte de Rialto

Fonte: <http://anaborralho.com/tag/ponte-do-rialto>

Nos meados do século XVIII, na Europa, começa a crescer a revolução industrial e o ferro fundido a competir com a pedra enquanto material de construção, surgindo as primeiras pontes metálicas. Em 1779 é construída a primeira ponte metálica, a Iron Bridge (Figura 7), na Inglaterra, em Coalbrookdale, com um vão de 30,5 metros. A passarela é composta por cinco arcos sobre os quais repousa uma plataforma central. (CALISTO, 2011)

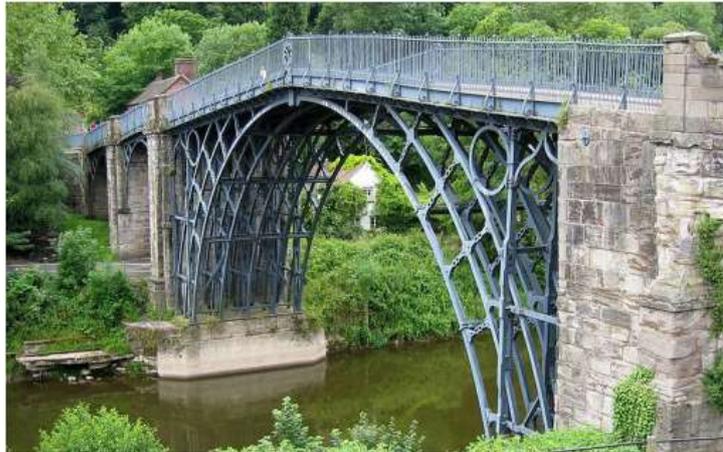


Figura 7 – Iron Bridge

Fonte: <http://www.ironbridgeguide.info>

Posteriormente, com o surgimento do aço, é utilizado primeiramente na Ponte Eads (Figura 8) em St. Louis, EUA, sobre o rio Mississipi, em 1874. A ponte é constituída por tubos de aço, formando 3 arcos de 158,5 metros de corda, sendo uma ponte rodoferroviária com dois tabuleiros com níveis diferentes. (CALISTO, 2011)



Figura 8 – Ponte Eads

Fonte: <http://www.touristlink.com.br/Estados-Unidos/eads-ponte/overview.html>

Nos finais do século XIX, Hennebique estende o uso do betão armado por todo o mundo e em 1911, constrói em Roma a Ponte del Risorgimento (Figura 9), com um arco de betão armado com mais de 100 metros de corda. Em 1930, na Suíça, Robert Maillart utilizando a ideia do engenheiro Freyssinet que inventou o uso do betão armado pré-

esfoçado, revolucionou o uso do betão, através das suas pontes, nomeadamente a ponte de Salginatobel (Figura 10), que possuía um arco triarticulado e com uma corda de 90 metros. (CALISTO, 2011)



Figura 9 – Ponte del Risorgimento
Fonte: <http://www.romacittaeterna.it/5.html>



Figura 10 – Ponte de Salginatobel
Fonte: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/salginatobel.htm>

Após realizar uma abordagem histórica sobre o surgimento e evolução das pontes, falaremos sobre as classificações gerais.

2.2 Classificações Gerais

Segundo o PFEIL (1983), as pontes apresentam características intrínsecas podendo ser classificadas das seguintes formas a seguir:

a) Quanto ao vão

Bueiro: $L \leq 2,50$ m;

Pontilhão: $2,50 \text{ m} \leq L \leq 10,00$ m;

Ponte: $L > 10,00$ m.

b) Quanto à finalidade

Rodoviária (veículos);

Ferrovária (trem);

Passarela (pedestre);

Canal (águas pluviais);

Aeroviária (aeronaves);

Utilitária (água, esgoto, gás, óleo, etc);

Mista (tráfego misto).

c) Quanto ao período de utilização

Provisória (madeira, metálica);

Permanente (madeira, metálica, alvenaria de pedra, concreto armado, concreto protendido).

d) Quanto ao material utilizado na Construção

Alvenaria de pedra (povos antigos);

Madeira (povos interioranos);

Concreto armado (vão de até 30,00 m);

Concreto protendido (vão superior a 30,00 m);

Metálica (grandes vãos);

e) Fatores a serem observados na escolha do material

Local (estética);

Custo da obra;

Custo de manutenção;

Disponibilidade de material no mercado;

Infraestrutura;

Mão de obra especializada;

f) Quanto à função estrutural

Hiperestática;

Isostática.

g) Quanto à posição do estrado

Superior (fig.1.1.1);

Intermediário (fig. 1.1.2);

Inferior (fig. 1.1.3).



(fig.1.1.1)



(fig.1.1.2)



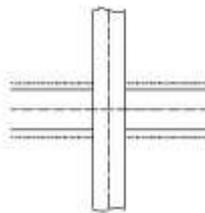
(fig.1.1.3)

h) Quanto à planimetria

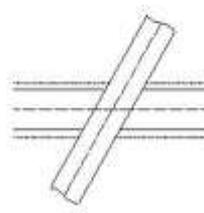
Retangular (fig.1.1.4);

Esconsa (fig. 1.1.5);

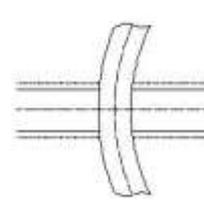
Curva (fig. 1.1.6).



(fig.1.1.4)



(fig.1.1.5)



(fig.1.1.6)

i) Quanto à altimetria

Mesmo nível (fig.1.1.7);

Níveis diferentes (fig. 1.1.8);



(fig.1.1.7)



(fig.1.1.8)

j) Quanto à estaticidade

Fixas (todos os casos vistos anteriormente);

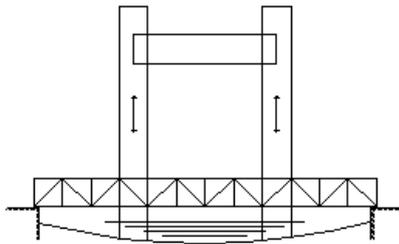
Móveis;

b.1) Levadiça (fig. 1.1.9);

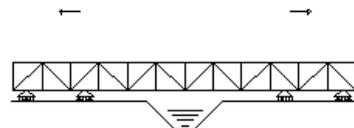
b.2) Corrediça (fig. 1.1.10);

b.3) Basculante (fig. 1.1.11);

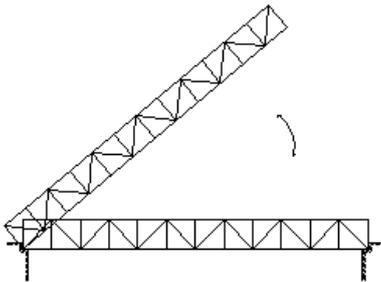
b.4) Giratória (fig. 1.1.12);



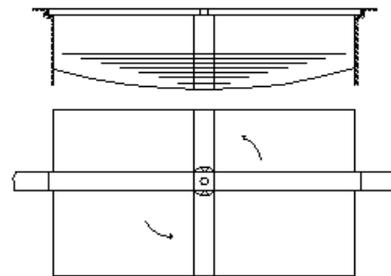
(fig.1.1.9)



(fig.1.1.10)



(fig.1.1.11)



(fig.1.1.12)

2.3 Composição de uma Ponte

Segundo PFEIL (1983), as pontes são divididas em três grandes partes: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura. Conforme podemos visualizar na Figura 11 a seguir:

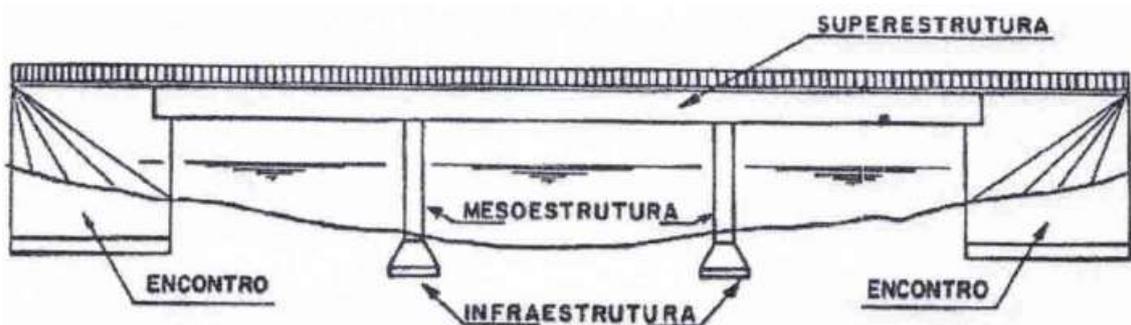


Figura 11 – Estrutura de uma Ponte

Superestrutura

A superestrutura é a parte responsável por receber o carregamento principal da ponte, carregamento este, constituído pelos elementos de transporte denominada de cargas móveis.

A superestrutura pode ser projetada em laje, viga reta de alma cheia, arco, treliça, quadro rígido, etc, com a finalidade de receber toda a carga útil e transmiti-la à meso ou infraestrutura. Também é constituída principalmente pelo Tabuleiro que é o conjunto de elementos responsáveis por receber diretamente as cargas móveis e a estrutura principal que é a parte da ponte responsável por vencer a distância entre dois apoios sucessivos (vãos).

O tabuleiro tem como elemento principal o Estrado que é constituído pela superfície de rolamento conforme podemos visualizar na Figura 12 a seguir.

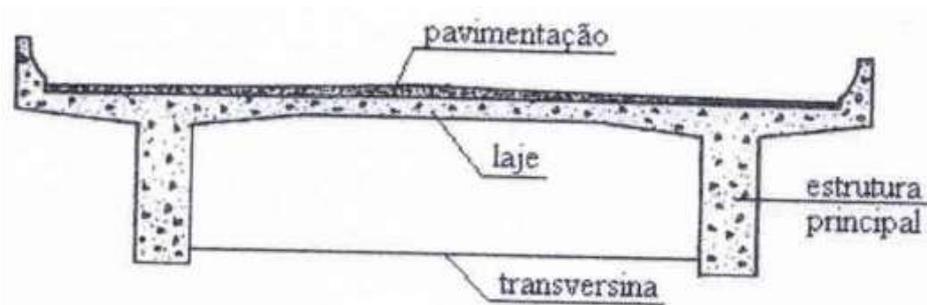


Figura 12 – Estrado de uma Ponte

A estrutura principal pode ser constituída por:

- ✓ Viga única em caixão unicelular ou multicelular (Fig. 13);
- ✓ Vigamento simples ou múltiplo (Fig. 14);
- ✓ Pórticos (Fig. 15);
- ✓ Arcos (Fig. 16);
- ✓ Suspensas – Pênseis ou estaiadas (Fig. 17 e 18).

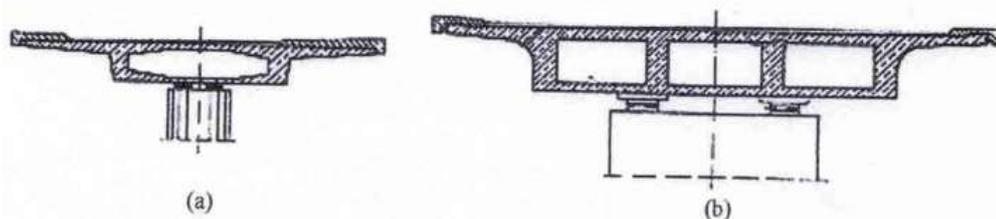


Figura 13 – Estrutura em viga única em caixão unicelular (a) ou multicelular (b)



Figura 14 - Estrutura em vigamento múltiplo

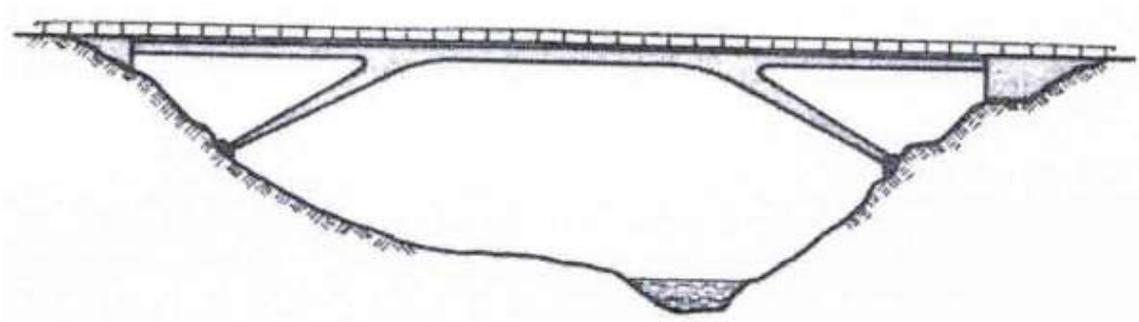


Figura 15 - Estrutura forma de Pórtico

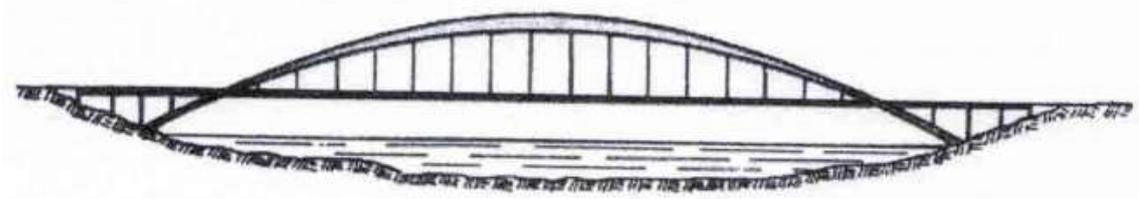


Figura 16 - Estrutura forma de Arco com Tabuleiro intermediário

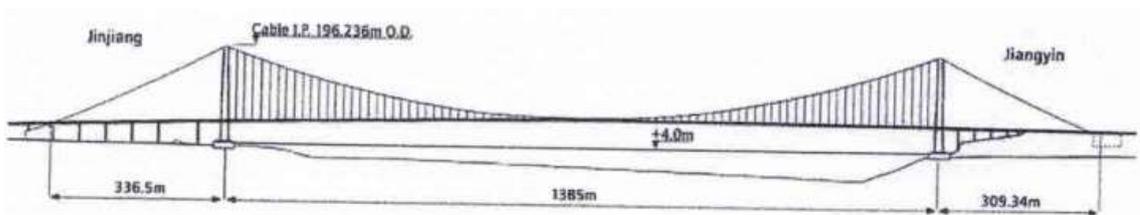


Figura 17 - Estrutura de Ponte Suspensa Pênsl

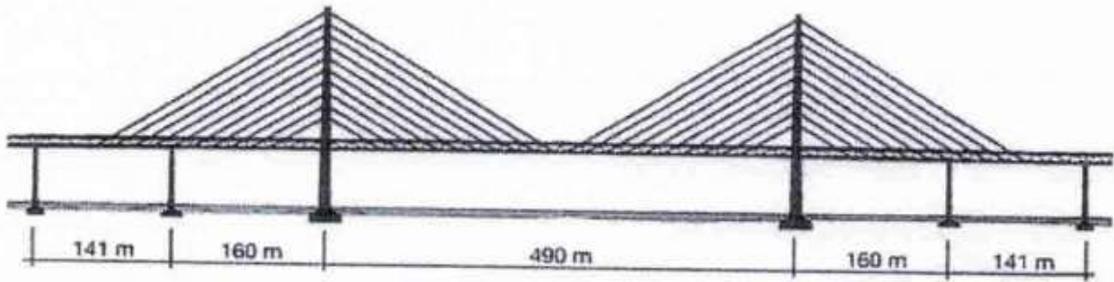


Figura 18 – Estrutura de Ponte Suspensa Estaiada

Mesoestrutura

A mesoestrutura é constituída pelos apoios, também chamados de Pilares, que são elementos estruturais que atuam de forma vertical ou inclinada que tem por função transmitir as cargas da superestrutura para os elementos das fundações (Infraestrutura). Podem ser classificadas em:

- ✓ Pilares-Parede (Fig. 19);
- ✓ Pórticos (Fig. 20);
- ✓ Paliçadas (Fig. 20);
- ✓ Pilares únicos ou apoios em T (Fig. 21);
- ✓ Torres (Fig. 22).

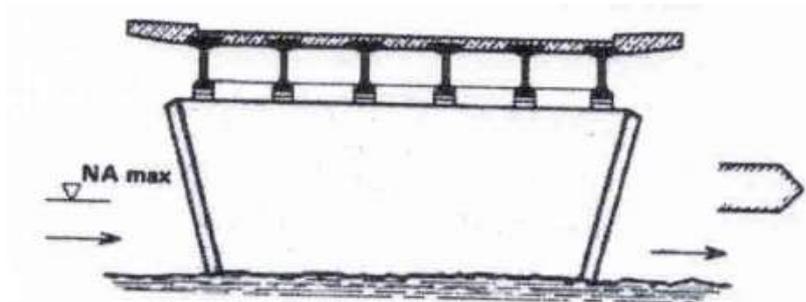


Figura 19 – Pilar-Parede

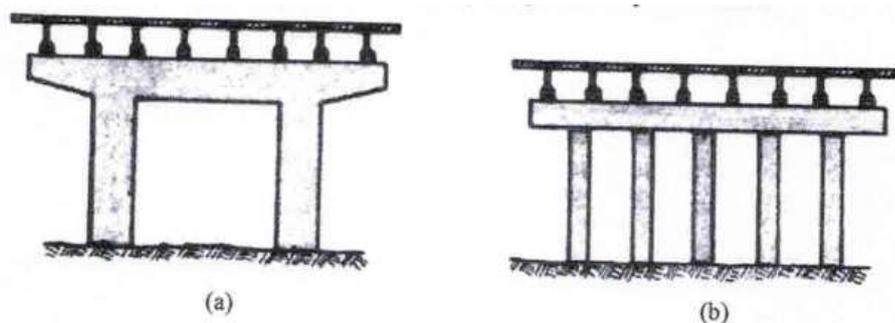


Figura 20 – Apoio de Pontes: (a) Pórticos e (b) Paliçadas

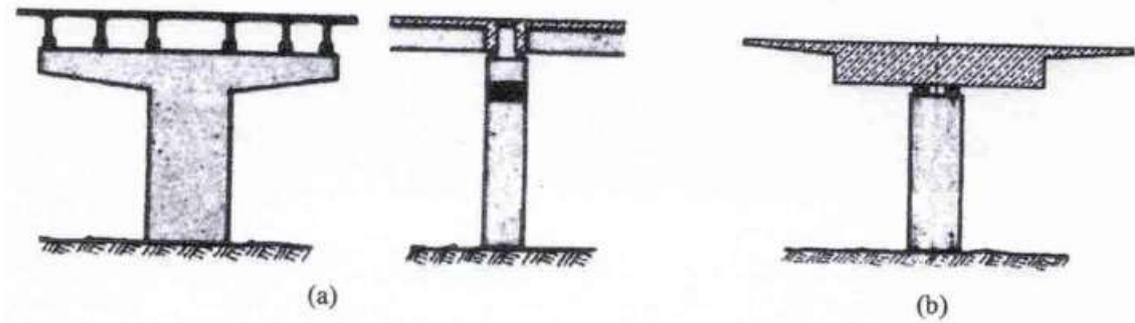


Figura 21 – Apoio de Pontes: (a) Apoio em T e (b) Pilar único

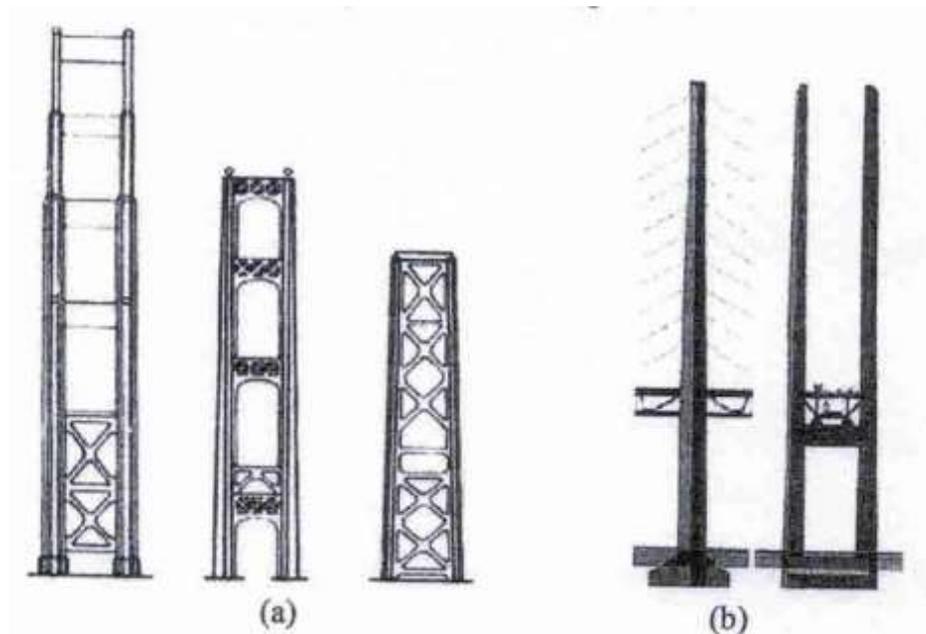


Figura 22 – Torres para grandes Pontes: (a) Pontes suspensas (b) Pontes estaiadas

Infraestrutura

Assim como a superestrutura, a infraestrutura é de importância fundamental para uma estabilidade satisfatória. Pois é responsável pela transmissão de esforços de toda a carga da estrutura da ponte para o terreno de fundação.

Elementos de fundações que podem ser:

- ✓ Fundações Diretas:
 - Sapatas (concreto armado);
 - Blocos (concreto não armado).
- ✓ Fundações indiretas:
 - Estacas de Madeira;

- Estacas pré-moldadas de concreto armado ou protendido;
 - Estacas de concreto moldado no local;
 - Estacas metálicas.
- ✓ Fundações profundas:
- Tubulões – a céu aberto ou sob ar comprimido;
 - Caixões.

Após realizar uma abordagem sobre as classificações gerais de pontes explicitando as particularidades e características intrínsecas de cada classificação, iniciaremos o Capítulo 1 tratando sobre os conceitos preliminares e fundamentações necessárias para a realização da construção da ponte em arco, entendendo a teoria aplicada ao estudo.

Capítulo 1 – Conceitos Preliminares e Fundamentações

Nosso primeiro capítulo trata essencialmente da Geometria dos arcos e das Estruturas de Engenharia. Aqui fazemos uma classificação dos arcos quanto a funcionalidade e a forma dos mesmos.

Com relação às estruturas, fazemos uma razoável descrição de resistência de materiais, destacando forças e distribuição de cargas.

1.1 Geometria dos Arcos

1.1.1 Definição: O termo **arco** é oriundo do latim *arcus* e designa um elemento construtivo em curva que emoldura a parte superior de um vão (abertura) suportando o peso vertical do muro em que se encontra. (BARISON, 2016)

Um arco pode ser utilizado em portas, janelas, pontes, aquedutos, elementos de composição de abóbodas e em barragens (onde a pressão ocorre horizontalmente). Também, segundo BARISON (2016), os componentes de um arco são:

1. CHAVE: Bloco superior ou aduela de topo que “fecha” ou trava a estrutura e pode ser decorada. Também designa o ponto de fecho de uma abóbada onde os arcos que a compõem se cruzam, geralmente em forma estilizada de flor.

2. ADUELA: Bloco em cunha que compõe a zona curva do arco e é colocada em sentido radial com a face côncava para o interior e a convexa para o exterior.

3. EXTRADORSO: Face exterior e convexa do arco.

4. IMPOSTA: Bloco superior do pilar que separa o pé-direito do bloco de onde começa a curva, a aduela de arranque. É sobre a imposta que assenta esta primeira aduela que tem pelo menos um dos lados (junta) horizontal.

5. INTRADORSO: Face interior e côncava do arco.

6. FLECHA: Dimensão que se prolonga desde a linha de arranque (delimitada pela imposta e pela aduela de arranque) até à face interior da chave. Esta área pode ser tapada dando lugar a um tímpano.

7. LUZ: Vão, largura do arco, geralmente maior que a sua profundidade. A relação entre a flecha e a luz é geralmente traduzida numa fração (ex: 1/2, 1/3, etc.)

8. CONTRAFORTE: Muro que suporta a impulsão do arco. Caso não exista uma parede esta impulsão pode ser recolhida por outro arco lateral e assim sucessivamente (arcada).

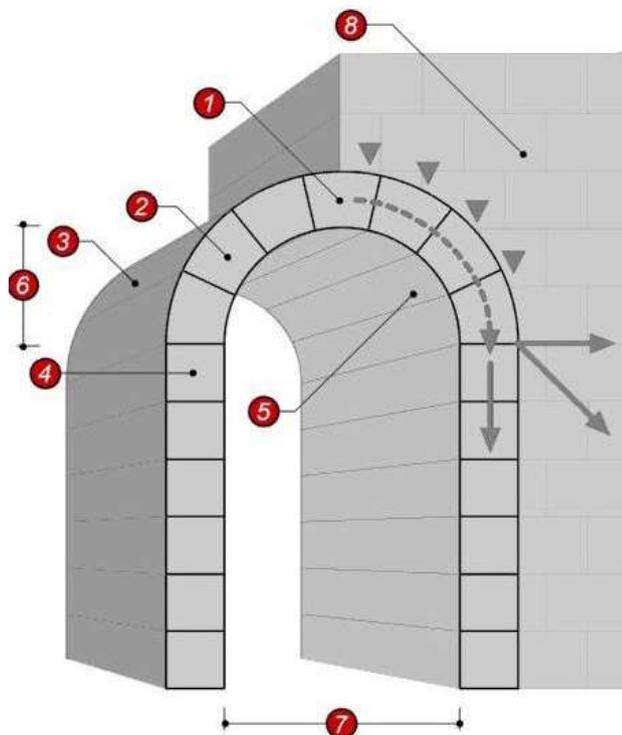


Figura 23 – Componentes de um Arco (BARISON, 2016)
 Fonte: http://www.uel.br/cce/mat/geometrica/php/dg/dg_8t.php

1.1.2 Classificação funcional

A seguir com apoio de ilustrações fazemos a classificação funcional dos arcos segundo BARISON (2016).

1. ARCO AVIAJADO: também chamado de arco botante, arco botaréu e arco esonso; é um arco que não tem os seus extremos ou pontos de nascença sobre a mesma linha horizontal. Encontra-se no exterior de uma construção e, geralmente, descarrega o impulso de uma abóbada situada no interior de uma catedral para o contraforte no exterior ao qual se encontra conjugado.



Figura 24 – Construções com Arcos Aviajados

Fonte: <http://www.trekearth.com/gallery/Europe/Portugal/North/Leiria/Obidos/photo889988.htm> e <http://diariodawikipedista.blogspot.com.br/2009/06/arco-botante-arcobotante-arco-botante.html>

2. ARCO CEGO: não ladeia uma passagem ou abertura, a sua área é tapada e geralmente surge como elemento de relevo numa parede.

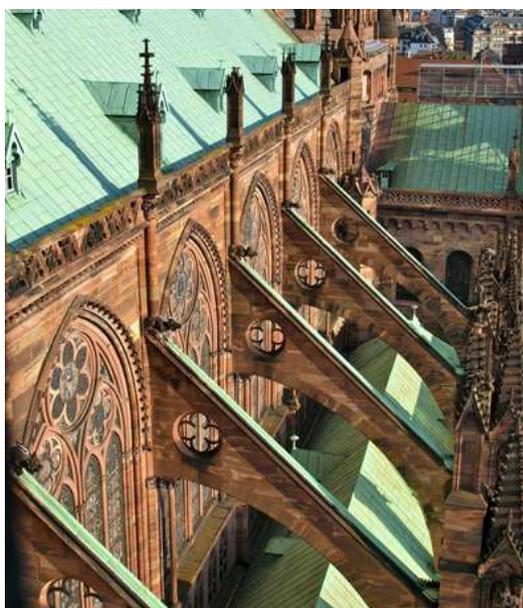


Figura 25 – Construção com Arco Cego

Fonte: <http://www.didatticarte.it/Blog/?p=2873>

3. ARCO DE CRUZEIRO: na igreja separa a nave da capela-mor ou do coro situando-se no cruzeiro. Pode ter uma trave a unir as aduelas de arranque.



Figura 26 – Construção com Arco de Cruzeiro
Fonte: <http://www.estilonacional.com.br/web/?p=642>

4. ARCOS DE DESCARGA: recebe e alivia o peso de uma parede e situa-se acima de uma platibanda.



Figura 27 – Construção com Arco de Descarga
Fonte: <http://www.arqhys.com/articulos/arco-descarga.html>

5. ARCO DE DIAFRAGMA: utilizado para separar áreas de uma igreja de modo a aliviar a carga das paredes laterais.

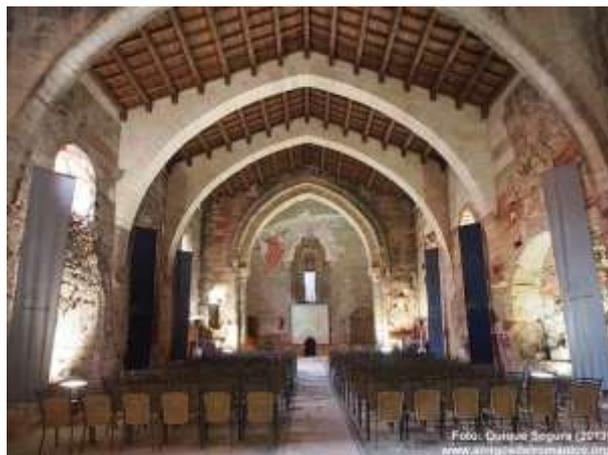


Figura 28 – Construção com Arco de Diafragma

Fonte: http://www.amigosdelrománico.org/inventario/fichas/espana/guadalajara/siguenza_santiago.html

6. ARCO DE ESCARNAÇÃO: serve de auxílio a outro arco que não tem capacidade para suportar o peso sobre si exercido.



Figura 29 – Construção com Arco de Escarnação

Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167853202010000_200009

7. ARCO DE PENETRAÇÃO: resultado da intersecção entre duas abóbadas de berço.



Figura 30 – Construção com Arco de Penetração e Arco de Ogiva

Fonte: <http://valiteratura.blogspot.com.br/2011/01/arte-gotica.html>

ARCOS DE ESTRUTURAÇÃO DE ABÓBADAS E OGIVAS

8. ARCO DE OGIVA: estrutura o esqueleto da abóbada cruzando-se com outro no centro (chave) distribuindo o peso até aos pilares de apoio.

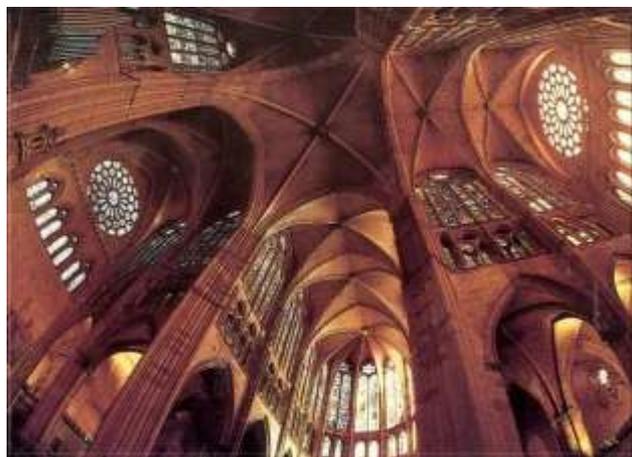


Figura 31 – Construção com Arco de Ogiva

Fonte: <http://docplayer.com.br/docs-images/25/4659035/images/12-0.jpg>

9. ARCO FORMEIRO: (formaleta, formalote): situa-se longitudinalmente em ambas as paredes laterais

10. ARCO TORAL: situa-se perpendicularmente às paredes laterais.

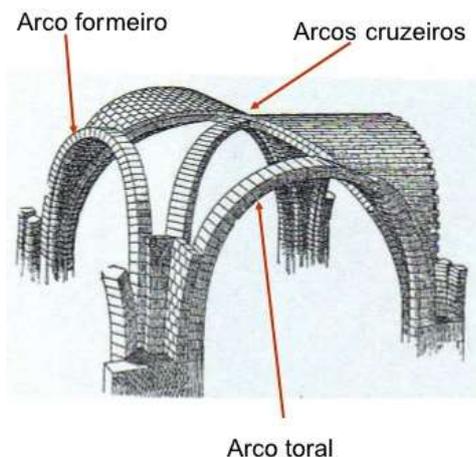


Figura 32 – Construção com Arco Formeiro e Arco Toral
 Fonte: <http://pt.slideshare.net/abaj/arquitetura-romnica>

1.1.3 Classificação Formal

Agora, também mediante a exemplos ilustrativos, fazemos a classificação formal dos arcos segundo BARISON (2016).

Os arcos gótico e ogival foram muito empregados nas aberturas das catedrais góticas (portas e janelas). Os arcos tudor, otomano, mourisco e ferradura foram utilizados nos vãos da arquitetura mourisca (sarracena). O arco ferradura é característico da arquitetura árabe na Espanha. (Ver Figura 40)

Existem muitos outros arcos como: arco angular, truncado, poligonal, zig-zag, redondo, escarzano, elíptico, peraltado, apontado, carpanel, deprimido côncavo, deprimido convexo, georgiano, ogival quebrado, agudo, tudor espanhol, tudor inglês, flamígero, multilobado, angelado e florentino. (Ver Figura 37)

Nós relacionamos 8 (oito) desses arcos que foram citados aqui e, mostramos as suas formas através de ilustrações.

1. ARCO ABATIDO: também chamado de arco asa de cesto, arco asa de balaio e arco sarapanel.



Figura 33 – Construção com Arco Abatido

Fonte: <https://mocambique.wordpress.com/2007/10/06/maputo-interior-da-catedral-2/>

2. ARCO GÓTICO: também chamado de Talão, pela semelhança da moldura deste nome. É um arco ogival constituído pela concordância de quatro arcos de circunferência, portanto possui quatro centros.



Figura 34 – Construção com Arco Gótico

Fonte: http://www.mushero.com/trips/europe/paris_0804/notre_dame.html

3. ARCO MOURISCO: também chamado de arco árabe e arco ferradura; é o arco cuja altura é maior do que a metade do vão ou abertura.



Figura 35 – Construção com Arco Mourisco

Fonte: <http://umpouquinhodecadalugar.com/2011/04/02/sevilha-a-capital-da-andaluzia/>

4. ARCO PLENO-CINTRO: também chamado de arco romano; é o arco em que a altura, flecha ou raio é igual a metade do vão ou diâmetro.



Figura 36 – Construção com Arco Romano

Fonte: <http://www.correiodolago.com.br/coluna.php?id=1830>

5. ARCO TUDOR: também chamado de arco gótico inglês. Originou-se no reinado de Henrique VII (1485 - 1509), o primeiro rei da dinastia dos tudor. É um arco ogival constituído pela concordância de quatro arcos de circunferência: portanto possui quatro centros.

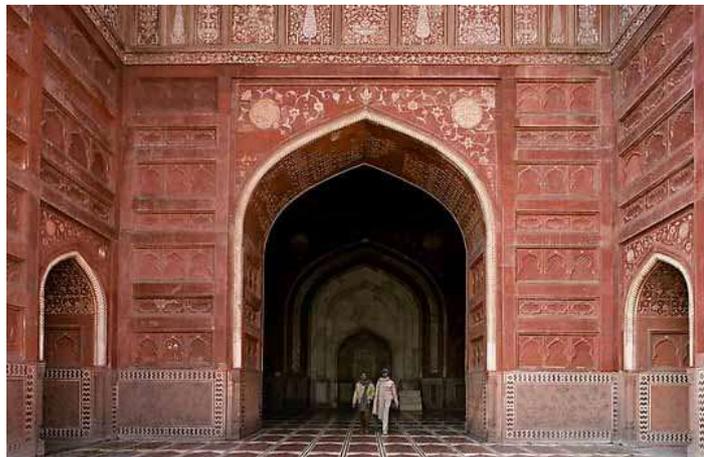


Figura 37 – Construção com Arco Tudor

Fonte: <http://jmora7.com/Arcos/geogebra/09tudor.html>

6. ARCOS GEMINADOS: arcos reunidos dois a dois por um outro arco maior ou por coluna, tendo um capitel comum.



Figura 38 – Construção com Arco Geminado

Fonte: <https://umbrasileironaespanha.files.wordpress.com/2013/02/pc170612.jpg>

7. ARCO TRILOBADO: 3 arcos compostos por circunferências secantes.



Figura 39 – Construção com Arco Trilobado

Fonte: <http://www.jf-odivelas.pt/default.aspx?id=11>

8. ARCO FERRADURA: Composto por dois arcos de círculo.



Figura 40 – Construção com Arco Ferradura

Fonte: <http://umpouquinhodecadalugar.com/2011/03/13/toledo-um-exemplo-medieval-de-tolerancia-religiosa/>

1.2 Teoria das Estruturas

Os conceitos que abordamos neste parágrafo estão relacionados com as principais teorias do estudo das estruturas de pontes.

1.2.1 Resistência dos Materiais

De acordo com o HIBBELER (2004), a resistência dos materiais é um ramo da mecânica que estuda as relações entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que atuam dentro do corpo. Assim, quando falamos de cargas externas, estamos nos referindo às forças que atuam nesse corpo, que são as grandezas vetoriais que apresentam intensidade, direção e sentido.

A intensidade de uma **Força** é representada por um vetor conforme podemos visualizar na Figura 41 a seguir e apresenta a unidade dimensional em Newton (N), no Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

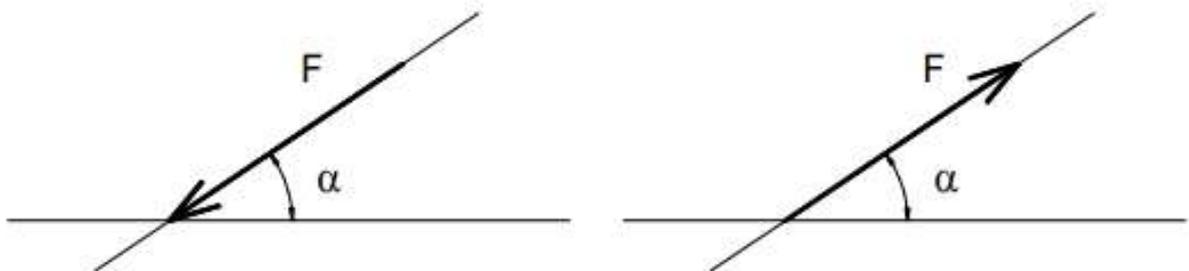


Figura 41 – Representação da Força na forma Vetorial

A **Força Normal** é a componente que age no sentido longitudinal, enquanto que a **Força Cortante**, também chamada de Força Tangencial, age no sentido perpendicular de uma peça, conforme podemos visualizar na figura a seguir.

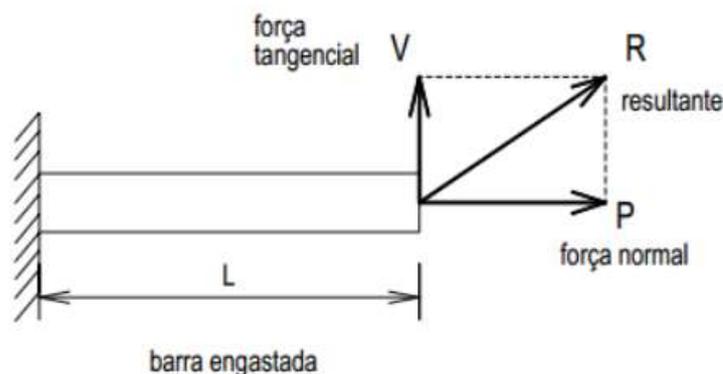


Figura 42 – Representação da Força Normal e Tangencial

A **Força Normal** provoca, na estrutura da peça, a **Tração**, quando o sentido da força está dirigido para fora do corpo, ocasionando o alongamento das partículas do material. E provoca **Compressão**, quando o sentido da força está dirigido para dentro do corpo, ocasionando o encurtamento das partículas do material.

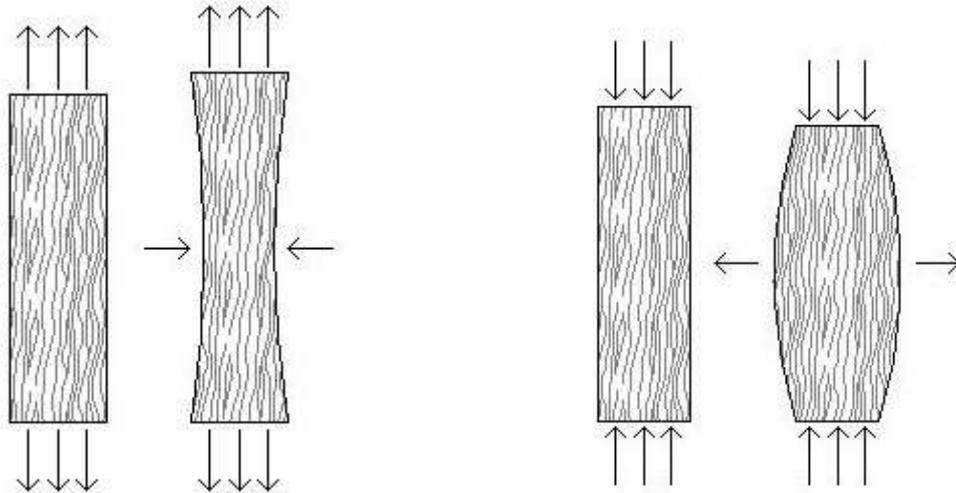


Figura 43 – Representação da Tração (esquerda) e Compressão (direita)

A **Força Cortante** provoca deslizamento da seção ocasionando o corte da peça, conforme podemos visualizar na figura a seguir.

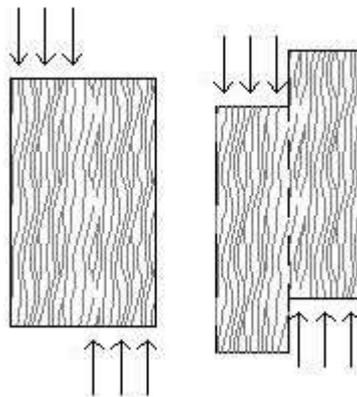


Figura 44 – Representação do cisalhamento

A **Flexão** é a ocorrência de uma solicitação na peça da estrutura, resultando no aparecimento de tensões de compressão, na face que recebe a força, e tensões de tração, na face oposta, conforme podemos visualizar na figura a seguir.

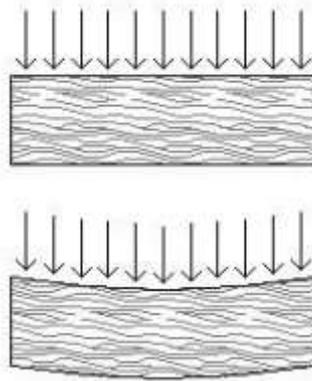


Figura 45 – Representação da Flexão

O momento de uma força ocorre quando há tendência de uma força F fazer um corpo rígido girar em torno de um eixo fixo, conforme podemos visualizar na figura a seguir.

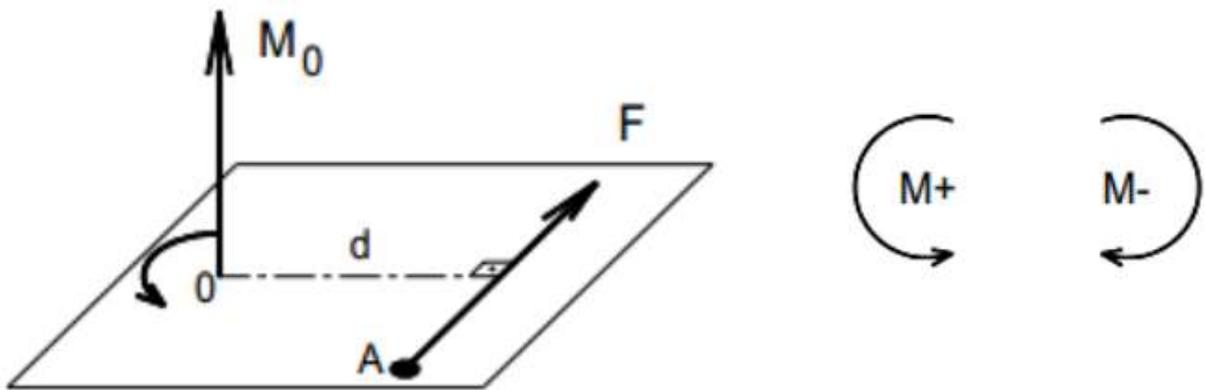


Figura 46 – Representação do Momento de uma Força

Representado pelos componentes: F (força), d (distância), M_0 (Momento de uma força), $M +$ (momento positivo) e $M -$ (momento negativo).

Matematicamente é determinado pela fórmula $M_0 = F \cdot d$, onde F é a força representada pelo vetor que define seu módulo, direção e sentido e d é a distância perpendicular do ponto fixo O em relação à linha de ação da força F . Apresenta a unidade dimensional em Newton x metro ($N \times m$) no Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Na existência da Flexão aparece, na estrutura, o **Momento Fletor**, quando as forças tendem a dobrar, fletir ou mudar a curvatura de uma peça estrutural. O momento fletor age no eixo longitudinal da peça estrutural, ou seja, perpendicular à seção transversal.

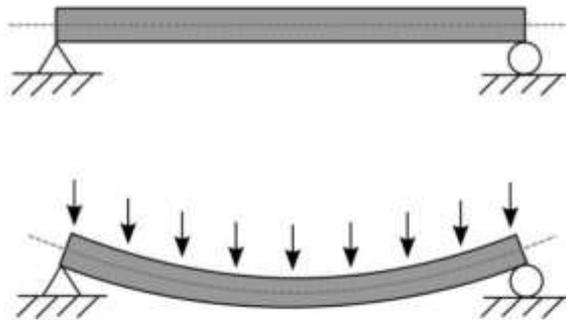
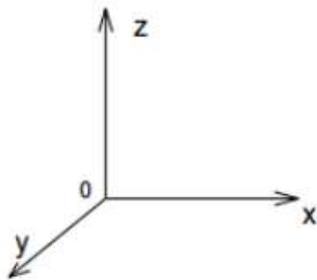


Figura 47 – Representação do Momento Fletor em uma Peça
 Fonte: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-momento-fletor.html>

1.2.2 Estruturas

É fundamental que na estrutura de um corpo rígido, o conjunto em si, esteja em **equilíbrio**. Matematicamente e fisicamente, um corpo rígido está em equilíbrio quando todas as forças externas que atuam sobre ele formam um sistema de forças e momentos equivalentes a zero, ou seja,

$$\Sigma F = 0 \quad \Sigma M = 0$$



$$\begin{array}{lll} \Sigma F_x = 0 & \Sigma F_y = 0 & \Sigma F_z = 0 \\ \Sigma M_x = 0 & \Sigma M_y = 0 & \Sigma M_z = 0 \end{array}$$

Figura 48 – Equilíbrio em Corpos Rígidos

Representado pelos componentes: F (Força), F_x (Força na direção x), F_y (Força na direção y), F_z (Força na direção z), M (Momento), M_x (Momento na direção x), M_y (Momento na direção y) e M_z (Momento na direção z).

Os **apoios** são vínculos que restringem os movimentos das estruturas e recebem a seguinte classificação:

Apoio Móvel

- ✓ Impede movimento na direção normal (perpendicular) ao plano de apoio;
- ✓ Permite movimento na direção paralela ao plano de apoio;
- ✓ Permite rotação

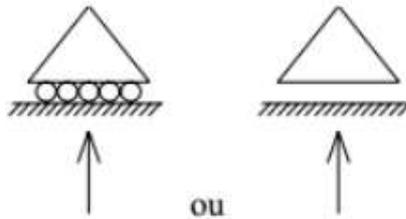


Figura 49 – Representação de Apoio Móvel

Apoio Fixo

- ✓ Impede movimento na direção normal (perpendicular) ao plano de apoio;
- ✓ Impede movimento na direção paralela ao plano de apoio;
- ✓ Permite rotação

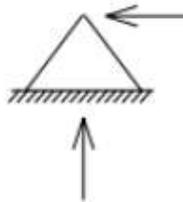


Figura 50 – Representação de Apoio Fixo

Apoio Engastamento

- ✓ Impede movimento na direção normal (perpendicular) ao plano de apoio;
- ✓ Impede movimento na direção paralela ao plano de apoio;
- ✓ Impede rotação

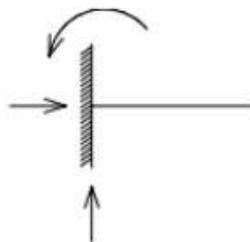


Figura 51 – Representação de Apoio Engastamento

Os tipos de **cargas** são classificados em relação a área em que são aplicadas, sendo de dois tipos: as **cargas concentradas** e as **cargas distribuídas**.

Cargas concentradas são aquelas em que a área de aplicação da força é desprezível em relação a área do corpo.

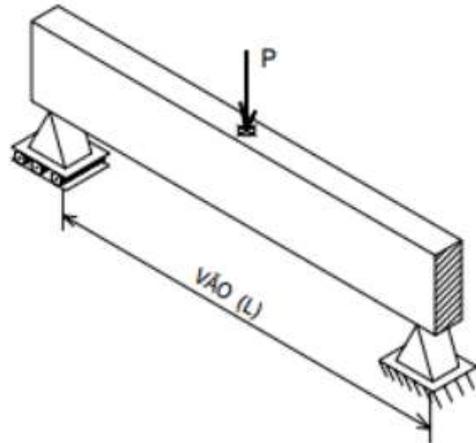


Figura 52 – Representação de Carga concentrada

Carga distribuída são aquelas aplicadas ao longo do comprimento ou sobre uma superfície, podendo ser uniforme ou não.

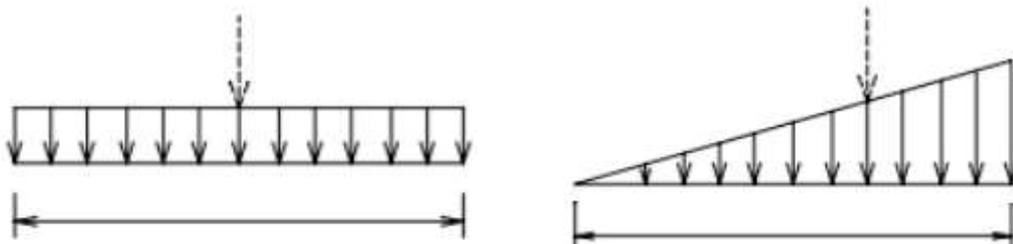


Figura 53 – Representação de Carga distribuída

As estruturas são classificadas em função do número de reações de apoio ou vínculos que possuem. Cada reação constitui uma incógnita a ser determinada. Para as estruturas planas, a Estática fornece três equações fundamentais:

$$\Sigma F_x = 0, \quad \Sigma F_y = 0 \quad e \quad \Sigma M_o = 0$$

Representado pelas componentes: F_x (Força na direção x), F_y (Força na direção y) e M_o (Momento em um ponto fixo).

Estruturas Hipostáticas

Estruturas hipostáticas são aquelas cujo número de reações de apoio ou vínculos é inferior ao número de equações fornecidas pelas condições de equilíbrio da Estática.

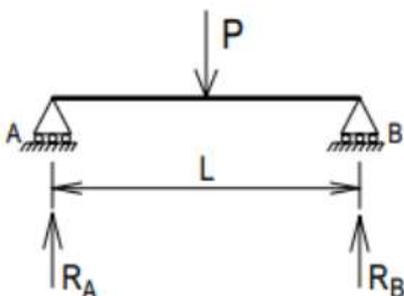


Figura 54 – Representação de Estrutura Hipostática

Estruturas Isostáticas

Estruturas isostáticas são aquelas cujo número de reações de apoio ou vínculos é igual ao número de equações fornecidas pelas condições de equilíbrio da Estática.

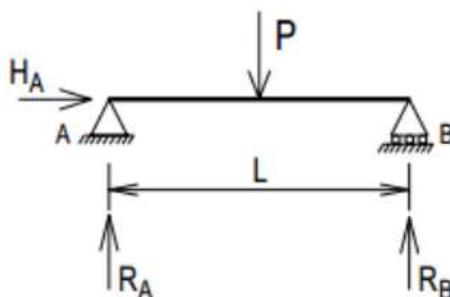


Figura 55 – Representação de Estrutura Isostática

Estruturas Hiperestáticas

Estruturas hiperestáticas são aquelas cujo número de reações de apoio ou vínculos é superior ao número de equações fornecidas pelas condições de equilíbrio da Estática.

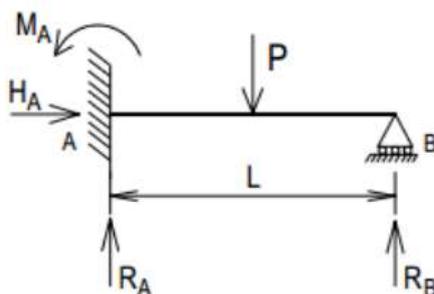


Figura 56 – Representação de Estrutura Hiperestática

Capítulo 2 – Construção de uma Ponte em arco

Neste capítulo fazemos uma narrativa que começa com a localização do espaço em que a construção da ponte foi realizada. Além de apresentarmos o desenho do seu projeto, descrevemos, o passo a passo da sua construção relacionando os materiais utilizados, a montagem da estrutura, o dimensionamento da carga suportável e os gastos na execução desse projeto, mediante uma planilha detalhada de custos.

2.1 Área objeto da construção

Tendo em vista a concepção da construção da Ponte em Arco foi realizado uma visita no Parque Zoobotânico - PZ da Universidade Federal do Acre em busca de um local apropriado para a implantação da estrutura da Ponte.

O Parque Zoobotânico fica localizado no Campus Universitário – BR 364, Km 04 – Distrito Industrial – Rio Branco – Acre. Na imagem a seguir disponibilizada pelo Google Earth podemos visualizar o Parque Zoobotânico e o imenso verde da floresta.

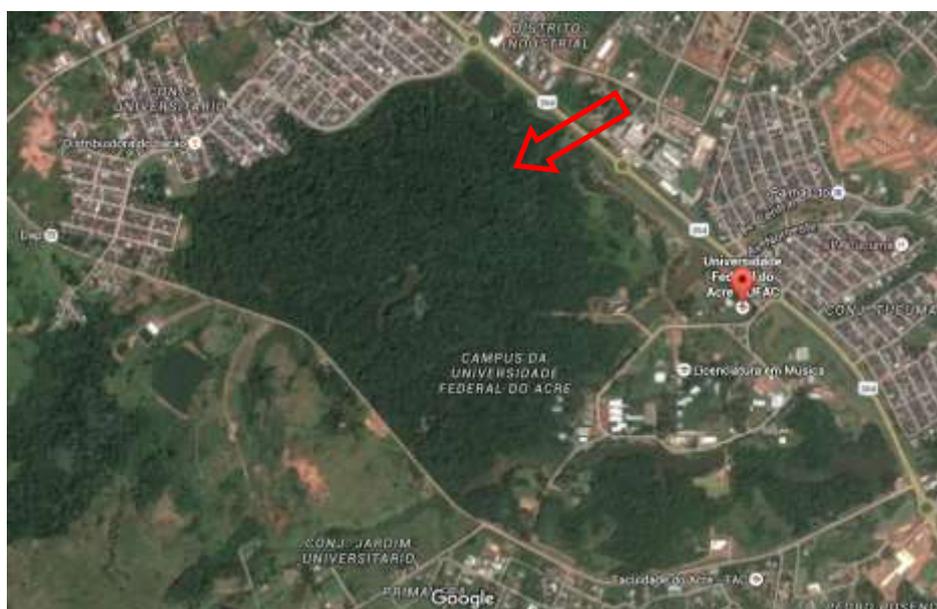


Figura 57 – Parque Zoobotânico

Fonte: <https://www.google.com.br/maps/place/Universidade+Federal+do+Acre>

Na ilustração a seguir vemos o Portal de entrada ao Parque.



Figura 58 – Portal de Entrada no Parque Zoobotânico

Acompanhado dessa visita com o Orientador Prof. Dr. José Ivan da Silva Ramos e o aluno de iniciação científica Felipe Nobre Sousa decidimos implantar a estrutura da ponte no canal de um “sangrador” do primeiro açude presente, perpendicular à trilha principal do parque. A trilha principal do PZ é responsável diretamente pela passagem de pesquisadores, professores e alunos.



Figura 59 – Trilha Principal do PZ e Parte do Canal do Açude



Figura 60 – Primeiro açude da trilha do PZ



Figura 61 – Início do “sangrador” do açude



Figura 62 – Canal do “sangrador” do açude e Área de implantação da Estrutura da Ponte

2.2 Características Técnicas adotadas na Concepção da Ponte

Após termos definido o local a ser implantado a estrutura da ponte fizemos a adoção das características técnicas de sua construção.

2.2.1 Definição do Arco

O arco escolhido para o desenho da ponte foi o Arco Abatido, por favorecer maior conforto aos usuários durante a passagem, em relação a geometria dos demais arcos.

2.2.2 Definição da Estrutura

A idealização do Arco Abatido foi concretizada pela união e travamento de peças isoladas estando justapostas de maneira apropriada, sem nenhuma utilização de ligações sejam por cola, pino, parafuso ou prego.

Para a estrutura da ponte foi adotado uma estrutura biapoiada do tipo Hiperestática com dois apoios fixos nas extremidades com vão de 2,04 metros.

As cargas aplicadas na estrutura principal serão cargas concentradas haja vista que será considerado apenas a passagem de pessoas como pesquisadores, professores e alunos.

2.2.3 Definição do Material da Estrutura

O material escolhido para a estrutura principal da ponte foi a madeira, devido a possibilidade e a facilidade de realização das lapidações necessárias para a implantação do arco.

A madeira utilizada na construção foi doada pela Universidade Federal do Acre por intermédio dos professores da Engenharia Florestal Dr. Tarcísio José Gualberto Fernandes e Dr. Thiago Augusto da Cunha. Na figura a seguir podemos visualizar o pátio das Toras da madeira disponibilizada.



Figura 63 – Pátio das Toras

A espécie madeireira nos fornecida foi a Cumaru Cetim, a qual, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2016), apresenta as seguintes características:

PROPRIEDADES FÍSICAS

Densidade de massa (ρ):

- ✓ Aparente a 15% de umidade ($\rho_{ap, 15}$): 1090 kg/m³

- ✓ Básica ($\rho_{básica}$): 908 kg/m³

Contração:

- ✓ Radial: 5,3 %
- ✓ Tangencial: 8,2 %
- ✓ Volumétrica: 13,6 %

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Flexão:

- ✓ Resistência (f_M):
 Madeira verde a 35 % de Umidade: 123,8 MPa
 Madeira a 15% de umidade: 178,3 MPa
- ✓ Limite de proporcionalidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 83,8 MPa
- ✓ Módulo de elasticidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 18547 MPa

Compressão paralela às fibras:

- ✓ Resistência (f_c):
 Madeira verde a 35 % de Umidade: 59,3 MPa
 Madeira a 15% de umidade: 94,2 MPa
- ✓ Limite de proporcionalidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 44,5 MPa
- ✓ Módulo de elasticidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 19306 MPa

Outras propriedades:

- ✓ Cisalhamento - Madeira verde a 35 % de Umidade: 14,2 MPa
- ✓ Dureza janka - Madeira verde a 35 % de Umidade: 9787 N
- ✓ Tração normal às fibras - Madeira verde a 35 % de Umidade: 7,5 MPa
- ✓ Fendilhamento - Madeira verde a 35 % de Umidade: 1,1 MPa

Para a estrutura de base que irá receber e distribuir a carga para o solo foi adotado o concreto armado que é uma mistura devidamente dosada de cimento, areia, brita e água combinado com a utilização do aço para combater os esforços da tração.

2.2.4 Desenho do Projeto

Utilizando o programa AutoCad 2016 foi realizado o desenho da estrutura da Ponte. Primeiro projetamos a base de concreto, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.

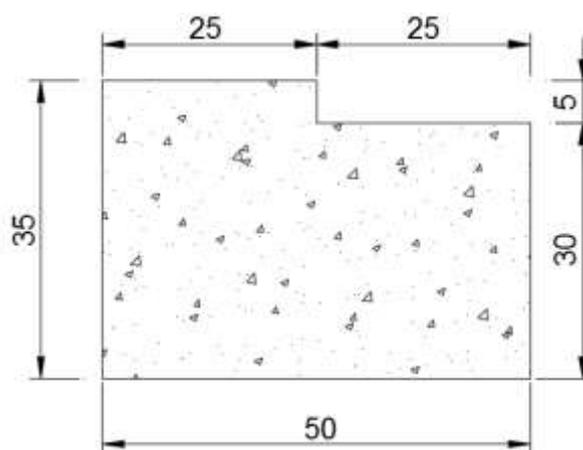


Figura 64 – Base de concreto em Corte (Dimensões em cm)

A base tem uma pisada de 25 cm (no desenho canto superior esquerdo) que permite acesso a ponte, um rebaixo de 5 cm na altura por 25 cm na largura que permite apoiar e acomodar a primeira peça em madeira e, por fim, a altura total do bloco é de 35 cm por conta dos níveis de oscilação da calha máxima de água do “sangrador” do açude. O comprimento do bloco é 1,50 metros.

Na imagem a seguir vemos as duas bases de concreto dispostas no vão de 2,54 m e pela parte externa dos blocos, vão de 1,54 m pela parte interna e vão de 2,04 m pelas extremidades de apoio das peças de madeira.

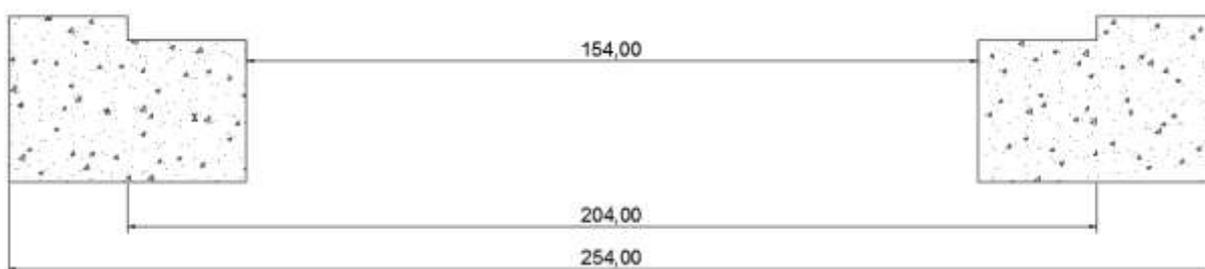


Figura 65 – Disposição das bases de concreto (Dimensões em cm)

Tomando como dado um vão útil de 2,04 metros foi verificado a melhor forma de traçar o Arco Abatido, utilizando 39 (trinta e nove) peças de madeira serrada, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.

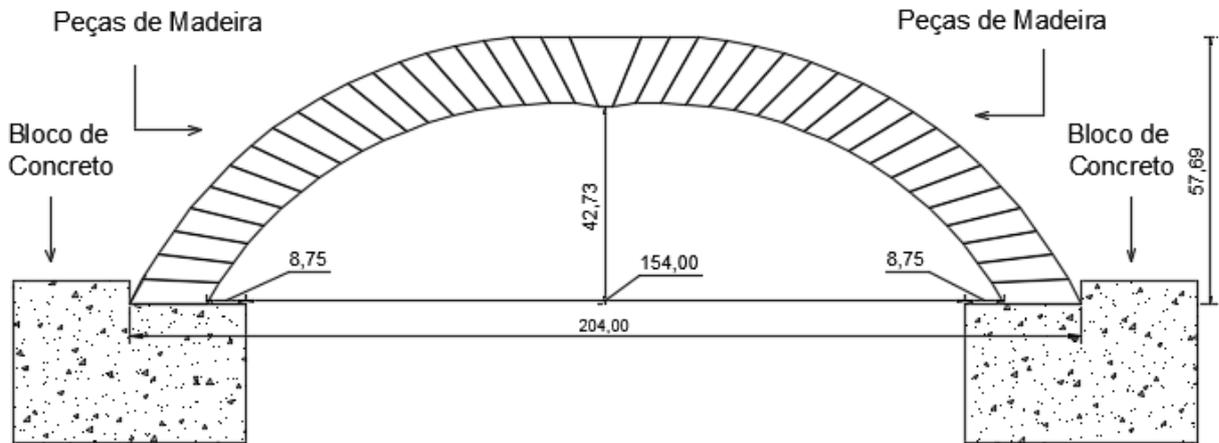


Figura 66 – Disposição das Peças de Madeira no Bloco (Dimensões em cm)

Vale ressaltar que a altura inferior em relação à linha de apoio, na base, é de 42,73 cm e a altura superior é de 57,69 cm. No apoio, o afastamento da peça em relação à extremidade é de 8,75 cm. Observa-se pela figura 66 que são necessárias 38 peças (19 em cada lado) até se encontrar com a peça central chamada de chave que será responsável pelo fechamento do arco.

Matematicamente, a geometria do arco abatido na face superior e inferior das peças apresentam, respectivamente: raio de 119 e 107,38 cm, comprimento de 245,03 e 198,59 cm e abertura angular de $117^{\circ}58'50''$ e $105^{\circ}57'29''$.

Vimos que as 38 peças de madeira são iguais e apresentam um formato trapezoidal com base maior de 6,16 cm, base menor de 5,27 cm e dois lados iguais a 16,25 cm, conforme podemos visualizar no detalhe a seguir.

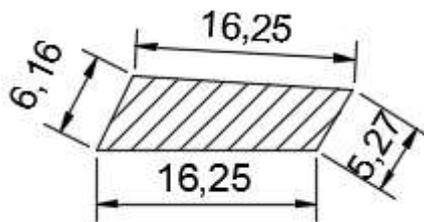


Figura 67 – Detalhe das peças de madeira (Dimensões em cm)

A confecção das peças foi possível realizando um plano de corte a partir de uma peça de formato retangular de dimensões de 5,5 cm por 19 cm, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.

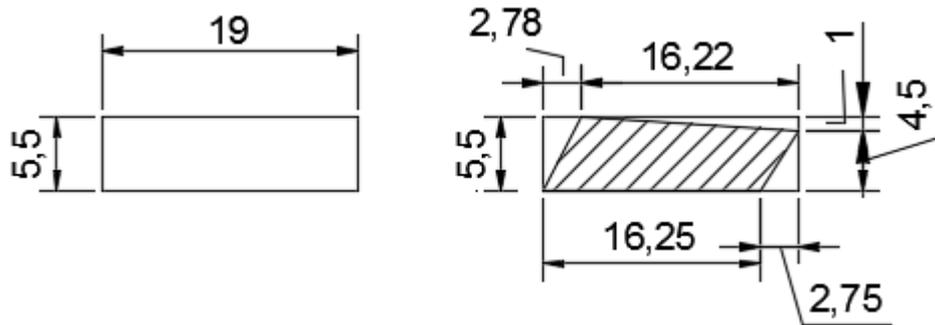


Figura 68 – Plano de Corte (Dimensões em cm)

A peça chave também apresenta um formato trapezoidal com base maior de 15,44 cm, base menor de 2,75 cm e dois lados iguais a 16,25 cm, conforme podemos visualizar no detalhe a seguir.

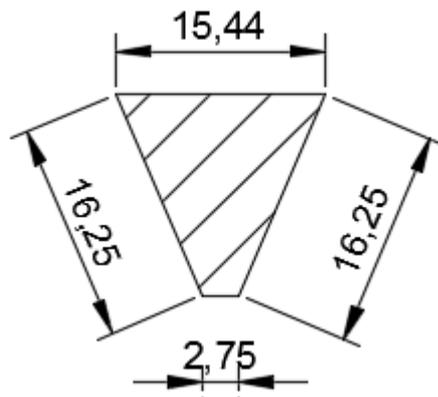


Figura 69 – Detalhe da peça chave de madeira

Tal chave foi obtida realizando um plano de corte a partir de uma peça de formato retangular de dimensões de 15,44 cm por 14,96 cm, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.

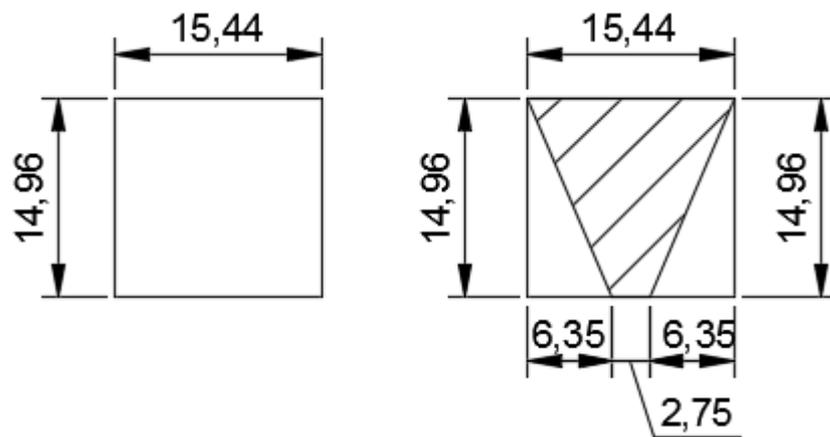


Figura 70 – Plano de Corte (Dimensões em cm)

Todas as peças de madeira foram dimensionadas para o comprimento de 1,10 metros.

2.3 A Construção Passo a Passo da Ponte

2.3.1 Execução dos blocos de apoio

Para a construção dos blocos foi realizado o transporte dos materiais e das ferramentas necessárias para o local de implantação.

Na primeira ação foi iniciado os trabalhos com a limpeza manual do terreno, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.



Figura 71 – Início com a limpeza manual do terreno

Em seguida foram cravados tocos para auxiliar no alinhamento entre os dois blocos.



Figura 72 – Cravação de tocos para auxiliar no alinhamento

A conferência do alinhamento foi auxiliada pelo esquadro em L.



Figura 73 – Uso do Esquadro em L

Em seguida foi realizado o acerto manual do terreno.



Figura 74 – Acerto manual do terreno

Após, temos a utilização do nível de mangueira para marcação do nível e nivelamento entre os dois blocos.



Figura 75 – Marcação do nível



Figura 76 – Marcação do nível

O próximo passo foi a instalação do sistema de fôrmas para a realização da concretagem dos blocos.



Figura 77 – Instalação de Fôrmas



Figura 78 – Instalação das Fôrmas

Ao fundo foi lançado um concreto magro de baixa resistência e instalação da malha de aço.



Figura 79 – Concreto magro e Malha de aço

Foi realizado a mistura de cimento, areia, brita e água em traço de $250 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ para o lançamento na fôrma do primeiro bloco.



Figura 80 – Mistura na preparação do concreto



Figura 81 – Concreto pronto para lançamento



Figura 82 – Lançamento do concreto na Fôrma do primeiro bloco



Figura 83 – Concreto na Fôrma do primeiro bloco



Figura 84 – Acabamento com colher de pedreiro



Figura 85 – Primeiro Bloco pós concretagem

Foi necessário ainda a instalação de fôrmas para quatro brocas, duas em cada bloco, para conter um possível tombamento do bloco de apoio e em seguida foi feita a concretagem juntamente com o segundo bloco.



Figura 86 – Fôrmas para quatro brocas



Figura 87 – Fôrma e concretagem do segundo bloco

Depois de dois dias foram retiradas as fôrmas e por fim os blocos de apoio estavam concluídos conforme podemos visualizar nas imagens a seguir.



Figura 88 – Visão Frontal dos Blocos de concreto



Figura 89 – Visão Lateral dos Blocos de Concreto

2.3.2 Execução das Peças de Madeira

No Pátio onde estavam as Toras foi montada a serraria portátil LUCAS MILL pelos professores da Engenharia Florestal Dr. Tarcísio José Gualberto Fernandes e Dr. Thiago Augusto da Cunha, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.



Figura 90 – Serraria Portátil e a Tora de madeira



Figura 91 – Serra de disco

Em seguida foi realizada a demarcação da dimensão da peça em 6 cm x 20 cm e a serragem.



Figura 92 – Demarcação da Peça



Figura 93 – Serragem da Peça



Figura 94 – Retirada da Peça serrada



Figura 95 – Primeira peça serrada

Em seguida, foi dada continuidade na serragem das demais peças.



Figura 96 – Serragem da Peça

Por fim, temos as peças serradas e os resíduos gerados pela tora.



Figura 97 – Peças serradas e os resíduos

Após o término da serragem, as peças foram transportadas para uma marcenaria, na cidade de Rio Branco, para os acabamentos necessários a fim de manter o desenho trapezoidal.

Na marcenaria as peças foram colocadas para secar ao ar por 30 dias, afim de evitar deformações por problemas de secagem.

Os primeiros trabalhos realizados em marcenaria foi a confecção da fôrma que apoiará as peças no formato do arco. Na imagem a seguir, podemos visualizar o corte em arco da chapa de compensado, em madeira com espessura de 10 mm, utilizado na sustentação provisória da estrutura da ponte até o travamento do arco desejado.



Figura 98 – Corte em arco da chapa de compensado de madeira



Figura 99 – Estruturação da Fôrma

Observamos a estruturação da fôrma na Figura 99 com objetivo de não apresentar aberturas ou deformações inadequadas durante a montagem das peças.

Após a secagem as peças foram nomeadas e demarcadas afim de serem lapidadas no formato projetado, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.



Figura 100 – Demarcação nas peças de madeira

Nas imagens a seguir podemos ver as peças lapidadas conforme o arco abatido e a montagem preliminar em fôrma.

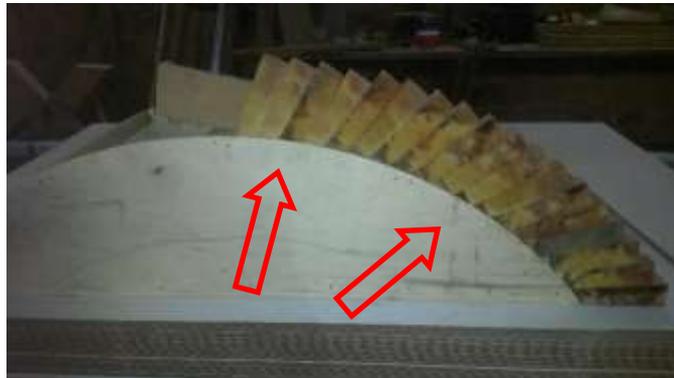


Figura 101 – Peças Lapidadas e não lapidadas em Fôrma



Figura 102 – Peças lapidadas apoiadas em fôrma de madeira



Figura 103 – Visualização da Peça chave na Estrutura



Figura 104 – Vista Superior da estrutura do arco

Após os serviços de estruturação e lapidação das peças de madeira na marcenaria, as mesmas foram transportadas para o Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre.

2.3.3 Execução do Projeto de Construção da Ponte – Instalação das Peças

As peças foram transportadas até o local de implantação utilizando uma trilha ecológica dentro do Parque Zoobotânico.



Figura 105 – Peças no local de implantação

Em seguida, foi colocada a fôrma de apoio estruturada no bloco de base de concreto, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.



Figura 106 – Fôrma apoiada na base de concreto

No próximo passo, com ajuda de um marceneiro, iniciamos as montagens das peças de madeira, uma a uma, em cada um dos lados, à direita e à esquerda, até chegar na última peça chave, conforme podemos visualizar nas imagens a seguir.



Figura 107 – Montagem das peças na fôrma



Figura 108 – Montagem das peças na fôrma



Figura 109 – Montagem das Peças na fôrma



Figura 110 – Montagem das Peças na fôrma



Figura 111 – Montagem das Peças na fôrma

Na Figura 111 vemos a montagem das peças obedecendo a geometria do arco esperando apenas a colocação da peça que amarrará a estrutura da ponte. Na colocação da última peça, nos deparamos com um problema: as peças de madeira escorregavam-se uma sobre as outras, subindo em determinados pontos conforme podemos visualizar na imagem a seguir. A explicação de tal problema será dada na seção 2.3.4 a seguir.



Figura 112 – Elevação das Peças

Para a resolução da situação anteriormente citada, adotamos a utilização de dois parafusos nas peças com o objetivo de apenas impedir o escorregamento e o

levantamento das peças, conforme podemos visualizar na imagem a seguir. É importante ressaltar que os parafusos não exercem função de suporte de carga vertical na estrutura, servem apenas para evitar a deslocabilidade e o destravamento da estrutura por falta de atrito entre as peças.



Figura 113 – Colocação de dois Parafusos nas Peças

Após a resolução do problema foi possível montar toda a estrutura da ponte sem a elevação das peças de madeira, conforme podemos visualizar na imagem a seguir.



Figura 114 – Montagem completa da Ponte

Após a montagem completa da ponte foi necessário dar o tratamento impermeabilizante para as peças de madeira, utilizando-se selador e verniz. Tal tratamento têm a função de aumentar a durabilidade da madeira, evitando perda de resistência mecânica devido a umidade e o apodrecimento devido ao ataque fungicida e dos insetos xilófagos.



Figura 115 – Aplicação de selador



Figura 116 – Vista superior após aplicação de selador



Figura 117 – Vista Superior após aplicação de Verniz

Após a pintura impermeabilizante foram plantadas 8 (oito) mudas de açaí, duas em cada lado dos blocos, na esquerda e direita, com o objetivo de direcionar o fluxo para passagem da comunidade acadêmica da nossa Universidade. Assim, a construção da Ponte foi concretizada e liberada para o uso.



Figura 118 – Ponte em arco concretizada



Figura 119 – Ponte em arco concretizada



Figura 120 – Ponte em Arco e as Mudas de Açai

2.3.4 Explicação matemática e de Engenharia na Construção da Ponte

Para entendermos o que ocorre na estrutura de uma ponte, exemplificamos a figura a seguir, a passagem de um veículo e a ilustração das forças representadas pelas setas sendo direcionadas de bloco em bloco até a completa dissipação pela fundação.

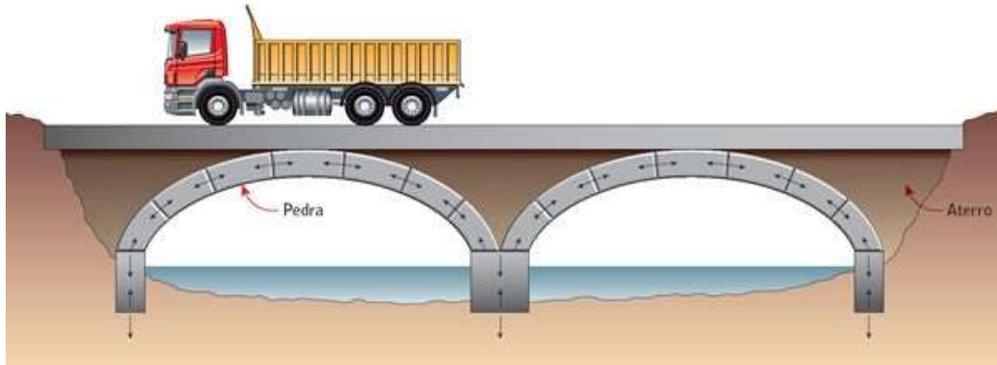


Figura 121 – Ilustração da Forças no arco da Ponte

Na construção da ponte em arco de madeira, no Parque Zoobotânico, iniciamos a montagem com a colocação das peças em cada lado do bloco, seguindo uma ordem até a colocação da última peça (chave) do sistema. A explicação do funcionamento da estrutura, construída pelos romanos desde os tempos mais remotos, está quando colocamos a última peça chave, a qual, por **compressão**, vai empurrando e comprimindo as demais de cada lado e assim, sucessivamente, até travar todo o sistema.

A geometria do arco favorece a estrutura, pois quando ocorre uma carga concentrada pela passagem de pessoas, a força é repassada de peça em peça até chegar na base da fundação sendo dissipada pelo solo.

A idealização do Arco Abatido foi concretizada pela união e travamento de peças isoladas estando justapostas de maneira apropriada, sem nenhuma utilização de ligações sejam por cola, pino, parafuso ou prego.

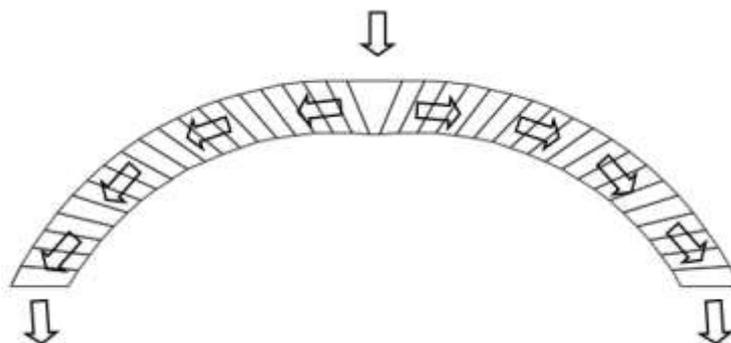


Figura 122 – Ilustração da dissipação da carga nas peças

Na engenharia, tal fenômeno consiste na tensão de compressão que ocorre quando forças tendem a comprimir ou encurtar a peça. Neste caso, a compressão que age nas peças é a normal às fibras, agindo no sentido perpendicular ao sentido da direção das fibras.

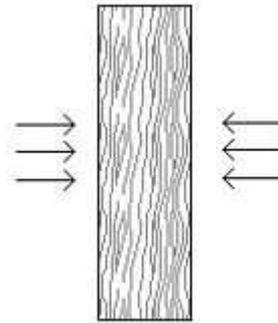


Figura 123 – Compressão normal às Fibras

Percebemos, ainda, que a geometria de cada peça é de fundamental importância, pois a impressão que temos é que a peça em contato com a outra pode escorregar e descer derrubando todo o sistema, mas quando olhamos a peça detalhadamente (Figura 124) vemos, no formato trapezoidal chanfrado, que a dimensão superior é maior que a inferior ou seja não há como um lado de maior seção passar por um de menor seção, impedindo assim o escorregamento e ainda permitindo o travamento com a peça ao lado.

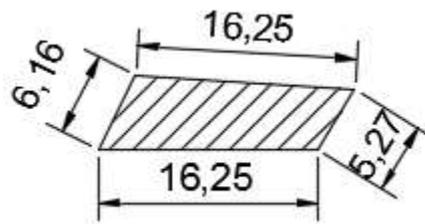


Figura 124 – Detalhe da peça (Dimensões em cm)

Vimos na montagem da Ponte que na colocação da última peça, as demais peças de madeira escorregavam-se uma sobre as outras, subindo em determinados pontos. Tais fatos ocorreram devido à falta de atrito entre uma peça e outra, não evitando o deslizamento.

Uma possível solução para aumentar o atrito entre as peças seria a utilização de pó de brita colada em cada uma das faces, aumentando a rugosidade. No entanto, a

solução econômica adotada foi a utilização de dois parafusos nas peças com o objetivo de apenas impedir o escorregamento e o levantamento das peças.

2.3.5 Cálculo de carga máxima na Estrutura da Ponte

Com base nos dados da propriedade mecânica da espécie madeireira Cumaru Cetim, especificados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2016), mostrados a seguir, podemos calcular a carga máxima na estrutura da ponte.

a) Propriedades Mecânicas – Cumaru Cetim

Flexão:

✓ Resistência (f_M):

Madeira verde a 35 % de Umidade: 123,8 MPa

Madeira a 15 % de umidade: 178,3 MPa

✓ Limite de proporcionalidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 83,8 MPa

✓ Módulo de elasticidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 18547 MPa

Compressão paralela às fibras:

✓ Resistência (f_c):

Madeira verde a 35 % de Umidade: 59,3 MPa

Madeira a 15% de umidade: 94,2 MPa

✓ Limite de proporcionalidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 44,5 MPa

✓ Módulo de elasticidade - Madeira verde a 35 % de Umidade: 19306 MPa

Outras propriedades:

✓ Cisalhamento - Madeira verde a 35 % de umidade: 14,2 MPa

✓ Dureza janka - Madeira verde a 35 % de Umidade: 9787 N

✓ Tração normal às fibras - Madeira verde a 35 % de Umidade: 7,5 MPa

Fendilhamento - Madeira verde a 35 % de Umidade: 1,1 MPa

b) Cálculo de Resistência de Projeto – R_d pela NBR 7190

Na Norma Brasileira NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, a **Tensão Resistente de Projeto** (f_d) de uma peça de madeira é calculada pela equação da **Resistência de Cálculo ou Projeto**, escrita em termos de tensão:

$$f_d = K_{mod} \left(\frac{f_K}{\gamma_W} \right)$$

Onde:

K_{mod} é o coeficiente que ajusta os valores da resistência característica em função da influência de diversos fatores na resistência da madeira, apresenta unidade adimensional;

f_K é a Resistência Característica de acordo com o esforço, apresenta unidade Pa (Pascal) no S.I.;

γ_W é o coeficiente de segurança, apresenta unidade adimensional.

No quadro 1 a seguir temos a relação entre as Resistências e os esforços.

Esforço (Pa)	f_K / f_m	γ_W
Compressão paralela às fibras	0,70	1,4
Compressão normal às fibras	0,70	1,4
Tração paralela às fibras	0,70	1,8
Cisalhamento paralelo às fibras	0,54	1,8

Quadro 1 - Relação entre as Resistências Característica (f_K) e Média (f_m) e o Valor do Coeficiente γ_W

O coeficiente K_{mod} é determinado pela seguinte expressão:

$$K_{mod} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot K_{mod3} ;$$

onde:

K_{mod1} = leva em conta o tipo de produto de madeira empregado e o tempo de duração da carga.

K_{mod2} = considera o efeito da umidade.

K_{mod3} = leva em conta a classificação estrutural da madeira.

Para considerar o efeito do tempo de duração da carga sobre a resistência, são definidas **classes de carregamento**, de acordo com o Quadro 2.

Classe de carregamento	Período acumulado de tempo de atuação da carga variável de base de uma combinação de ações.
Permanente	Vida útil da construção
Longa duração	Mais de 6 meses
Média duração	Uma semana a 6 meses
Curta duração	Menos de uma semana
Duração instantânea	Muito curta

Quadro 2 - Classes de Carregamento

O fator K_{mod1} é definido de acordo com a classe de carregamento da combinação de ações para o qual se está dimensionando a estrutura e conforme o tipo de produto de madeira utilizado, de acordo com o Quadro 3.

Tipo de Produto de Madeira		
Classe de carregamento da combinação de ações	Madeira Serrada Madeira Laminada Colada Madeira Compensada	Madeira Recompоста
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Quadro 3 - Valores do Coeficiente K_{mod1}

Para considerar o efeito do grau de umidade nas propriedades de resistência da madeira, são definidas **classes de umidade**, conforme o Quadro 4.

Classe de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente (U_{amb})	Grau de Umidade da Madeira (equilíbrio com o ambiente)
1 (padrão)	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$	$\geq 25\%$

Quadro 4 - Classes de Umidade

Valores atribuídos pela **NBR 7190** ao coeficiente K_{mod2} , em função do produto de madeira utilizado e da classe de umidade, estão indicados no Quadro 5.

Tipo de Produto de Madeira		
Classe de Umidade	Madeira Serrada Madeira Laminada Colada Madeira Compensada	Madeira Recompоста
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

Quadro 5 - Valores do Coeficiente K_{mod2}

Como os valores de resistência característica são obtidos em ensaios em corpos-de-prova sem defeitos é preciso ajustá-los, através do coeficiente K_{mod3} , em função da **categoria estrutural da madeira** utilizada, obtido pelo quadro 6.

Produto de Madeira	Tipo de Madeira	Categoria	K_{mod3}
Serrada	Dicotiledôneas	1ª	1,0
		2ª	0,8
	Coníferas	1ª ou 2ª	0,8
Laminada ou Colada*	Qualquer	1ª ou 2ª – peça curva	$1,0 - 2000(r/t)^2$
		1ª ou 2ª – peça reta	1,0
*Laminada com espessura t e colada com raio de curvatura r (mínimo)			

Quadro 6 - Valores do Coeficiente K_{mod3}

c) Cálculo de carga máxima na estrutura da Ponte

c.1) Determinação do K_{mod}

No quadro 2 temos a classe de carregamento **permanente** levando em consideração a vida útil da construção.

No quadro 3 temos o valor do K_{mod1} , através da classe de carregamento **permanente** e o Produto de madeira Serrada levando ao coeficiente $K_{mod1} = 0,60$.

No quadro 4 temos a Umidade ambiente maior que 85 % pela característica de floresta densa, nos levando a **classe de umidade igual a 4**.

No quadro 5 através da classe de umidade 4 e o produto de madeira serrada temos o coeficiente $K_{mod2} = 0,80$.

No quadro 6 temos o produto de madeira serrada e a espécie Cumaru Cetim, sendo Dicotiledônea de 1ª Categoria, nos leva ao coeficiente $K_{mod3} = 1,00$.

Logo, temos $K_{mod1} = 0,60$, $K_{mod2} = 0,80$ e $K_{mod3} = 1,00$ calculando K_{mod} :

$$K_{mod} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot K_{mod3}$$

$$K_{mod} = 0,60 \cdot 0,80 \cdot 1,00$$

$$K_{mod} = 0,54$$

c.2) Determinação dos valores característicos de Tensão

O Cumaru Cetim apresenta as resistências em resumo:

- ✓ A Compressão Paralela às Fibras a 15% de umidade de 94,2 MPa;
- ✓ A Tração paralela às Fibras que é aproximadamente igual a Flexão de Madeira a 15% de umidade de 178,3 MPa;
- ✓ A Tração normal às fibras - Madeira verde a 35% de Umidade: 7,5 MPa ;
- ✓ Ao Cisalhamento - Madeira verde a 35% de Umidade: 14,2 MPa.

Assim, realizando a correção das Resistências a 12 % de umidade que é a Umidade Padrão definida pela NBR 7190 através fórmula abaixo, temos:

$$f_{12} = f_u \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (U - 12) \right] \right\}$$

Onde:

f_{12} é a resistência a 12 % de umidade;

f_u é a resistência a U % de umidade;

U é a Umidade em %.

Para a Compressão Paralela às Fibras a 15% de umidade de 94,2 MPa, temos:

$$f_{12} = 94,2 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (15 - 12) \right] \right\}$$

$$f_{12} = 94,2 \cdot 1,09$$

$$f_{12} = 102,68 \text{ MPa}$$

Para a Compressão Normal às Fibras a NBR 7190 especifica que:

$$f_{cn} = 0,25 \cdot f_c$$

Logo a 12 % de Umidade temos:

$$f_{cn} = 0,25 \cdot 102,68 = 25,67 \text{ MPa}$$

Para a Tração paralela às Fibras que é aproximadamente igual a Flexão de Madeira a 15% de umidade de 178,3 MPa, temos:

$$f_{12} = 178,3 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (15 - 12) \right] \right\}$$

$$f_{12} = 178,3 \cdot 1,09$$

$$f_{12} = 194,35 \text{ MPa}$$

Para a Tração normal às fibras - Madeira verde a 35 % de Umidade de 7,5 MPa, temos:

$$f_{12} = 7,5 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (35 - 12) \right] \right\}$$

$$f_{12} = 7,5 \cdot 1,69$$

$$f_{12} = 12,68 \text{ MPa}$$

Para o Cisalhamento - Madeira verde a 35 % de Umidade de 14,2 MPa, temos:

$$f_{12} = 14,2 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (35 - 12) \right] \right\}$$

$$f_{12} = 14,2 \cdot 1,69$$

$$f_{12} = 24 \text{ MPa}$$

Assim, as resistências corrigidas a 12 % de Umidade são:

- ✓ A Compressão Paralela às Fibras: 102,68 MPa;
- ✓ A Compressão Normal às Fibras: 25,67 MPa;
- ✓ A Tração paralela às Fibras: 194,35 MPa;
- ✓ A Tração normal às fibras: 12,68 MPa ;
- ✓ Ao Cisalhamento: 24 MPa.

Pelo quadro 1 temos:

Compressão paralela às Fibras

$$f_{k,c}/f_c = 0,70$$

$$\Leftrightarrow f_{k,c} = 0,70 \cdot f_c = 0,70 \cdot 102,68 = 71,88 \text{ MPa}$$

Compressão Normal às Fibras

$$f_{k,cn}/f_{cn} = 0,70$$

$$\Leftrightarrow f_{k,cn} = 0,70 \cdot f_{cn} = 0,70 \cdot 25,67 = 17,97 \text{ MPa}$$

Tração paralela às Fibras

$$f_{k,T}/f_T = 0,70$$

$$\Leftrightarrow f_{k,T} = 0,70 \cdot f_T = 0,70 \cdot 194,35 = 136,05 \text{ MPa}$$

Tração normal às Fibras

$$f_{k,Tn}/f_{Tn} = 0,70$$

$$\Leftrightarrow f_{k,Tn} = 0,70 \cdot f_{Tn} = 0,70 \cdot 12,68 = 8,88 \text{ MPa}$$

Cisalhamento paralelo às fibras

$$f_{k,v}/f_v = 0,54 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{k,v} = 0,54 \cdot f_v = 0,54 \cdot 24 = 12,96 \text{ MPa}$$

Logo, as resistências características são:

- ✓ A Compressão Paralela às Fibras: 71,88 MPa;
- ✓ A Compressão Normal às Fibras: 17,97 MPa;
- ✓ A Tração paralela às Fibras: 136,05 MPa;
- ✓ A Tração normal às fibras: 8,88 MPa ;
- ✓ Ao Cisalhamento: 12,96 MPa.

c.3) Determinação das Tensões Resistentes de Projeto

No quadro 1 encontramos o coeficiente de segurança γ_w de acordo com o esforço:

$\gamma_{w,c} = 1,4$ Coeficiente de Segurança à Compressão paralela às Fibras;

$\gamma_{w,cn} = 1,4$ Coeficiente de Segurança à Compressão normal às Fibras;

$\gamma_{w,T} = 1,8$ Coeficiente de Segurança à Tração paralela às Fibras;

$\gamma_{w,Tn} = 1,8$ Coeficiente de Segurança à Tração normal às Fibras;

$\gamma_{w,V} = 1,8$ Coeficiente de Segurança ao Cisalhamento;

Pela fórmula já vista anteriormente podemos calcular as tensões resistentes de Projeto:

$$f_d = K_{mod} \left(\frac{f_K}{\gamma_w} \right)$$

Compressão paralela às Fibras

$$\begin{aligned} f_{d,c} &= K_{mod} \left(\frac{f_{K,c}}{\gamma_{w,c}} \right) \\ &= 0,54 \cdot \left(\frac{71,88}{1,4} \right) \\ &= 0,54 \cdot 51,34 \\ &= \mathbf{27,73 MPa} \end{aligned}$$

Compressão Normal às Fibras

$$\begin{aligned} f_{d,cn} &= K_{mod} \left(\frac{f_{K,cn}}{\gamma_{w,cn}} \right) \\ &= 0,54 \cdot \left(\frac{17,97}{1,4} \right) \\ &= 0,54 \cdot 12,84 \\ &= \mathbf{6,93 MPa} \end{aligned}$$

Tração paralela às Fibras

$$\begin{aligned} f_{d,T} &= K_{mod} \left(\frac{f_{K,T}}{\gamma_{w,T}} \right) \\ &= 0,54 \cdot \left(\frac{136,05}{1,8} \right) \\ &= 0,54 \cdot 75,58 \\ &= \mathbf{40,82 MPa} \end{aligned}$$

Tração normal às Fibras

$$\begin{aligned} f_{d,Tn} &= K_{mod} \left(\frac{f_{K,Tn}}{\gamma_{w,Tn}} \right) \\ &= 0,54 \cdot \left(\frac{8,88}{1,8} \right) \\ &= 0,54 \cdot 4,93 \\ &= \mathbf{2,66 MPa} \end{aligned}$$

Cisalhamento paralelo às fibras

$$\begin{aligned} f_{d,v} &= K_{mod} \left(\frac{f_{k,v}}{\gamma_{w,v}} \right) \\ &= 0,54 \cdot \left(\frac{12,96}{1,8} \right) \\ &= 0,54 \cdot 7,2 \\ &= \mathbf{3,89 MPa} \end{aligned}$$

Logo as tensões resistentes de projeto são:

- ✓ A Compressão Paralela às Fibras: 27,73 MPa;
- ✓ A Compressão Normal às Fibras: 6,93 MPa;
- ✓ A Tração paralela às Fibras: 40,82 MPa;
- ✓ A Tração normal às fibras: 2,66 MPa ;
- ✓ Ao Cisalhamento: 3,89 MPa.

Analisando as tensões resistentes calculadas percebemos que a madeira apresenta a melhor e a pior resistência na tração paralela às fibras e na tração normal às fibras, respectivamente.

Na ponte em arco, o principal esforço exercido é a compressão normal às Fibras e o esforço secundário é o Cisalhamento.

c.4) Determinação da Carga máxima

Para a determinação da Carga máxima recorreremos à fórmula da tensão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = \sigma \cdot A$$

onde:

σ é a Tensão medida no S.I. em Pascal (Pa)

F é a Força medida no S.I. em Newton(N)

A é área medida no S.I. em m².

No caso da Ponte, a área de transmissão da força será definida pela área lateral das peças de madeira, determinadas em projeto com largura inclinada de 16,25 cm por 110 cm de comprimento. Sendo assim,

$$A = 0,1625 \cdot 1,10 = 0,18 \text{ m}^2$$

E assim analisando a pior situação de resistência para a Ponte em Arco projetada temos:

Compressão normal às Fibras

$$\begin{aligned} F &= \sigma \cdot A \\ &= 6,93 \cdot 10^6 \cdot 0,18 = 1247400 \text{ N} \\ &= 124740 \text{ Kgf} = 124,74 \text{ tf} \end{aligned}$$

Cisalhamento

$$\begin{aligned} F &= \sigma \cdot A \\ &= 3,89 \cdot 10^6 \cdot 0,18 = 700200 \text{ N} \\ &= 70020 \text{ Kgf} = 70,02 \text{ tf} \end{aligned}$$

Logo a máxima carga que poderá ser aplicada na estrutura da ponte é de 70,02 toneladas.

2.3.6 Custos na execução da Ponte construída

No levantamento de custos, na execução da Ponte construída, no Parque Zoobotânico, levaremos em consideração, no cálculo, os materiais e os serviços empregados na produção.

Dentre os materiais empregados, foram utilizados:

- ✓ 0,52 m³ de concreto 25 MPa utilizados na Confeção dos blocos de fundação;
- ✓ 0,50 m³ de madeira Serrada de 1ª Categoria;
- ✓ 78 Parafusos de 9 mm para evitar o levantamento das peças;
- ✓ 2 l de Selador;
- ✓ 3,6 l de Verniz.

Dentre os serviços utilizados temos:

- ✓ Carpinteiro na execução de fôrmas para concreto;
- ✓ Pedreiro e Auxiliar na execução do acerto manual do terreno, Nivelamento, Alinhamento, preparo do concreto e concretagem;
- ✓ Marceneiro para lapidação das peças e montagem da estrutura do arco;
- ✓ Pintor para impermeabilização da madeira.

Identificados os insumos e serviços, tomaremos como base de cálculo o SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil disponibilizado pela Caixa Econômica Federal com a data base de referência de Preços em 02/2016 (fevereiro de 2016).

Assim, temos o seguinte orçamento:

Nº	CÓDIGO SINAPI	ESPECIFICAÇÕES DOS SERVIÇOS	UND	QUANT.	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL	TOTAL DO ITEM
1.0		SERVIÇOS GERAIS DE FUNDAÇÃO					475,31
		SERVIÇOS PRELIMINARES					
	79517/001	ESCAVACAO MANUAL EM SOLO-PROF. ATE 1,50 M	M3	0,12	21,61	2,49	
	79483	APILOAMENTO MANUAL DE FUNDO DE VALA C/ MAÇO DE 30KG	M2	1,50	16,20	24,30	
	6042	CONCRETO NÃO ESTRUTURAL, PREPARO C/ BETONEIRA CONSUMO CIMENTO=210KG/M3 PARA LASTROS, CONTRAPISOS, CALÇADAS, ETC...	M2	0,08	441,13	33,08	
	73964/006	REATERRO DE VALA COM COMPACTAÇÃO MANUAL	M3	0,05	32,41	1,62	
		CONCRETO ARMADO C/ BETONEIRA FCK 25MPA C/ BRITA - SAPATAS E VIGAS BALDRAME					
	5651	FORMA DE MADEIRA COMUM PARA FUNDACOES - REAPROVEITAMENTO 5X	M2	2,24	31,82	71,28	
	85662	ARMAÇAO EM TELA DE ACO SOLDADA NERVURADA Q-92, ACO CA-60, 4,2MM, MALHA 15X15 CM	M2	2,10	9,48	19,91	
	73972/001	CONCRETO C/ BETONEIRA FCK 25 MPA C/ BRITA	M3	0,52	545,76	283,80	
	74157/004	LANÇAMENTO E ADENSAMENTO DE CONCRETO EM FUNDAÇÕES	M3	0,52	74,67	38,83	
2.0		SERVIÇOS EM MADEIRA					1.533,54
		SERVIÇO DE SERRAGEM DAS PEÇAS E MONTAGEM					
	12868	MARCENEIRO	H	79,62	10,78	858,27	
	248	AJUDANTE DE OPERAÇÃO EM GERAL	H	79,62	8,06	641,73	
	4332	PARAFUSO ZINCADO, SEXTAVADO, COM ROSCA INTEIRA, DIAMETRO 3/8", COMPRIMENTO 2"	UN	78,00	0,43	33,54	
3.0		SERVIÇOS DE PINTURA					95,19
		IMPERMEABILIZAÇÃO					
	88485	APLICAÇÃO DE FUNDO SELADOR ACRÍLICO UMA DEMÃO.	M2	6,73	2,50	16,83	
	6082	PINTURA EM VERNIZ SINTETICO BRILHANTE EM MADEIRA, TRES DEMAOS	M2	6,73	11,64	78,36	
	Rio Branco – Acre		Total Geral S/ BDI (R\$) >>>			2.104,04	
	BDI (21,65 %) (R\$) >>>					455,52	
	Total Geral (R\$) >>>					2.559,56	
	Custo por M2 em projeção da Ponte (R\$) >>>					1.140,62	
	Custo por M (comprimento) da Ponte (R\$) >>>					1.254,69	

Para a construção da Ponte de Madeira em arco, no Parque Zoobotânico, foram gastos R\$ 2.559,56 (dois mil quinhentos e cinquenta e nove reais e cinquenta e seis centavos), já contabilizando todas as despesas diretas e indiretas.

O custo por metro quadrado de projeção da Ponte é de R\$ 1.140,62 (mil cento e quarenta reais e sessenta e dois centavos) e o custo por metro (comprimento) da Ponte é de R\$ 1.254,69 (mil duzentos e cinquenta e quatro reais e sessenta e nove centavos).

Considerações Finais

Após concluir as disciplinas ligadas ao Programa do PROFMAT, iniciamos com o processo de escolha do Tema para elaboração do trabalho de conclusão de curso. Interessados em realizar um trabalho com matemática aplicada, foram pensadas junto ao orientador prof.^o Dr. José Ivan da Silva Ramos, ideias e propostas para a concepção da dissertação. E assim, após o amadurecimento de ideias, chegamos a definir como proposta, a geometria aplicada na estrutura de pontes.

Com base na disciplina de Geometria vista em sala e ainda ao olharmos as construções ao nosso redor, percebemos a notoriedade da presença dos arcos, sejam em estruturas metálicas ou até mesmo em construções de Pontes. Destacamos a importância da geometria para a concepção e a idealização de um projeto, apresentando várias formas geométricas definidas nas construções.

Este trabalho de dissertação realizou a construção de uma ponte em arco tal qual os romanos realizavam os feitos desde os tempos mais remotos, mostrando assim que é possível construir a estrutura de uma ponte em arco sem nenhum tipo de ligação e atender a funcionalidade de todo o sistema pretendido que é a passagem ou a transposição de obstáculos.

Para isso, escolhemos, em visita, um local para implantação, definido o Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre, fizemos o passo a passo na construção da ponte no Parque Zoobotânico, através da escolha e concepção do projeto, execução dos blocos de concreto da fundação, serragem das peças de madeira, montagem da estrutura da ponte, aplicação de pintura impermeabilizante e arborização.

Vimos ainda as relações geométricas aplicadas no funcionamento da estrutura da Ponte entendendo as relações de engenharia de estruturas relacionada à geometria dos arcos, a avaliação da carga máxima de suporte que após cálculo de literatura chegamos ao resultado de 70,02 toneladas, e por fim calculamos o custo na execução da Ponte de Madeira em arco para possíveis projetos futuros, no total gastos de R\$ 2.559,56 (dois mil quinhentos e cinquenta e nove reais e cinquenta e seis centavos), já contabilizando todas as despesas diretas e indiretas, relacionando ainda o custo por metro quadrado de projeção da Ponte de R\$ 1.140,62 (mil cento e quarenta reais e sessenta e dois centavos) e o custo por metro (comprimento) da Ponte de R\$ 1.254,69 (mil duzentos e cinquenta e quatro reais e sessenta e nove centavos).

Como experiência no Programa de Mestrado do PROFMAT, aprendi ferramentas matemáticas importantes que levarei para o ensino em sala de aula, os exercícios, bem como as aprendizagens juntos aos professores. Ao realizar o trabalho de conclusão de curso, tivemos a percepção da importância da disciplina de geometria e as suas aplicações para as situações cotidianas, desde as práticas mais simples até as mais complexas. A execução do projeto, desde a ideia até a execução, apresentou grandes desafios, que foram vencidos com muita dedicação e paciência, mostrando que o aprendizado aqui obtido nos levam a uma sólida formação.

Referências Bibliográficas

BARISON, Maria Bernadete. **Arcos**. Disponível em: < http://www.uel.br/cce/mat/geometrica/php/dg/dg_8t.php> Acesso em: 11 de janeiro de 2016.

BARSASABER. **As pontes na história**. Disponível em: < <http://brasil.planetasaber.com/theworld/monographics/seccions/cards/default.asp?pk=2124&art=39> > Acesso em: 10 de Agosto de 2015.

CALISTO, Pedro Miguel da Silva. **Projeto de uma ponte em arco entre as ribeiras do Porto e Gaia**. Dissertação de Mestrado. 211 p. 2011. Universidade do Porto, Porto, Portugal. Disponível em: < <http://biblioteca.versila.com/2702315/projeto-de-uma-ponte-em-arco-entre-as-ribeiras-do-porto-e-gaia> > Acessado em: 13 de Agosto de 2015

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 5ª Edição. Ed. Pearson Prentice Hall. 674 p. São Paulo. 2004

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: < http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/10.htm > Acesso em: 12 de janeiro de 2016.

LUCKO, Gunnar. **Means and Methods Analysis of a Cast-In-Place Balanced Cantilever Segmental Bridge: The Wilson Creek Bridge Case Study**. Dissertação de Mestrado, 1999, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 292 p. Disponível em: <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-120199-224950/>> Acessado em: 12 de Agosto de 2015.

NYSTROM, Lynn. **O livro de Barker olha para a história de pontes da estrada**. Spectrum (Virginia Tech). Volume 20. 1997. Disponível em: < <http://scholar.lib.vt.edu/vtpubs/spectrum/sp971002/2b.html> > Acesso em: 20 de Janeiro de 2016

PFEIL, Walter. **Pontes em Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1983. 443 p.

PONTE. In Britannica Escola Online. **Enciclopédia Escolar Britannica**, 2015. Web, 2015. Disponível em: <<http://escola.britannica.com.br/article/480845/ponte>>. Acesso em: 05 de agosto de 2015.