

**Centro Universitário de Brasília (UNICEUB)
Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas- FATECS**

PATRÍCIA CAROLINE SOUZA DA ROCHA VIEIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL E ARQUITETÔNICA DAS PONTES DE ROBERT
MAILLART COM BASE NO SOFTWARE ANSYS**

Brasília
2016

PATRÍCIA CAROLINE SOUZA DA ROCHA VIEIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL E ARQUITETÔNICA DAS PONTES DE ROBERT
MAILLART COM BASE NO SOFTWARE ANSYS**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientador: Marcos Henrique Ritter de Gregorio, M.Sc.

Brasília
2016

PATRÍCIA CAROLINE SOUZA DA ROCHA VIEIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL E ARQUITETÔNICA DAS PONTES DE ROBERT
MAILLART COM BASE NO SOFTWARE ANSYS**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientador: Marcos Henrique Ritter de Gregório, M.Sc.

Brasília, 2016.

Banca Examinadora

Arquiteto: Marcos Henrique Ritter de Gregorio, M.Sc.
Orientador

Eng. Civil: Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, D.Sc

Eng. Civil: Márcio Augusto Roma Buzar D.Sc

Arquiteto: Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa, M.Sc.

RESUMO

A concepção de projetos de grande magnitude tais como pontes, viadutos, estádios, torres e aquedutos exigem especial atenção do projetista devido ao impacto que este pode gerar em seu entorno. Quando bem projetada, esta construção pode transcender seu propósito funcional original e atingir dimensões do campo da subjetividade, interferindo na beleza, harmonia e autoestima de uma cidade. Ao longo da história da humanidade, temos inúmeros exemplos de construções desta natureza que se tornaram emblemas de cidades, governantes ou períodos históricos. A Revolução Industrial, além de promover as conhecidas mudanças na sociedade, também desmembrou definitivamente a atuação profissional do engenheiro e do arquiteto. Percebe-se, que nos dias de hoje, é muito frequente a elaboração de projetos nos quais o diálogo entre arquitetura e estrutura são deficientes, gerando problemas de diversas naturezas. O conceito de Arte Estrutural, desenvolvido pelo PhD David Billington, da Universidade de Princeton, Estados Unidos, será abordado neste trabalho. Billington defende que construções desta natureza devem aliar eficiência estrutural, estética agradável e a consequente economia de recursos. O engenheiro suíço Robert Maillart desenvolveu, ao longo de sua carreira, a habilidade de conciliar as premissas estruturais e requisitos de design de modo a conferir formidável valor estético e de eficiência estrutural às pontes que projetou. É portanto um excelente exemplo de artista estrutural. Neste trabalho, será feita a análise computacional da estrutura simplificada de duas pontes de Robert Maillart, por meio do software Ansys que utiliza como método de análise o Método dos elementos finitos (MEF). Na ponte Zuoz (1901), verificaram-se patologias na parede do arco de concreto, cuja porção foi intuitivamente removida na ponte Tavanasa (1905). Objetiva-se simular os dois modelos, analisando as interações entre a estrutura e o design estético, e avaliar a eficiência proposta por Maillart ao modelo de Tavanasa.

Palavras-chave: Revolução Industrial, Arte Estrutural, Robert Maillart, Pontes, Zuoz, Tavanasa, MEF, Método dos elemento finitos, Ansys.

ABSTRACT

The large scale projects concepts such as bridges, viaducts, stadiums, towers and aqueducts requires special attention from the designer because of the impact that this can generate in your surroundings. When well designed, this construction can transcend its original functional purpose and reach of subjectivity field dimensions, affecting the beauty, harmony and self-esteem of a city. Throughout human history, we have many examples of buildings that have become cities, governors or historical periods emblems. The Industrial Revolution promotes some society changes and also definitely dismembered the engineer and the architect professional practice. Very often, at these days, the project development in which the dialogue between architecture and structure are deficient, causing many problems. The concept of structural art, developed by PhD David Billington, from Princeton University, USA, will be addressed in this work. Billington argues that buildings of this nature should combine structural efficiency, pleasing aesthetics and the consequent economic viability. The Swiss engineer Robert Maillart developed throughout his career the ability to reconcile the structural assumptions and design requirements in order to give great aesthetic value and structural efficiency to the bridges designed by him. It is therefore an excellent example of structural artist. This work will be the structure computational analysis of two Robert Maillart simplified bridges, through Ansys software that uses an analytical method: the finite element method (FEM). In Zuoz (1901) bridge, there were pathologies on the arch of the concrete wall, which portion was intuitively removed at Tavanasa bridge (1905). The objective is to simulate these both models, analyzing the interactions between the structure design and the aesthetic design and evaluate the efficiency proposed by Maillart to the model of Tavanasa.

Keywords: Industrial Revolution, Art Structural, Robert Maillart, Zuoz, Tavanasa, FEM, Finite Element Method Ansys.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	8
2.1	Objetivo geral.....	8
2.2	Objetivos específicos.....	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	Alguns pontos importantes da história das estruturas.....	9
3.1.1	<i>Como surgiu a necessidade de criar estruturas</i>	9
3.1.2	<i>Persas e Chineses</i>	12
3.1.3	<i>Gregos e Romanos</i>	12
3.1.4	<i>Revolução Industrial</i>	16
3.2	A Arte Estrutural.....	17
3.2.1	<i>Conceitos</i>	17
3.3	A relação arquitetura X engenharia à luz da Arte Estrutural.....	20
3.4	Engenheiros da Arte Estrutural.....	22
3.4.1	<i>Thomas Telford</i>	22
3.4.2	<i>Gustave Eiffel</i>	25
3.4.3	<i>Robert Maillart</i>	26
3.5	-Pontes.....	29
3.5.1	Tipos de pontes.....	31
3.6	Método dos Elementos Finitos (MEF):.....	41
3.6.1	<i>Ansys</i>	43
4	METODOLOGIA	44
4.1	Escolha do projeto.....	44
5	ESTUDO DE CASO.....	46
5.1	Descrição das pontes.....	46
5.1.1	<i>Dados das pontes:</i>	51
5.2	Carregamentos aplicados.....	55
5.3	Modelo Numérico.....	57
5.4	Análise dos resultados.....	62
6	CONCLUSÃO	68
7	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	69
	BIBLIOGRAFIA	70
	ANEXOS	73
	Anexo 1- Modelos utilizados para modelagem em AutoCad das ponte Zuoz e Tavanasa.....	73

1 INTRODUÇÃO

A história da engenharia mundial é marcada por diversos acontecimentos no decorrer da evolução da humanidade. Tudo se inicia com estruturas rudimentares e sem técnica, construídas apenas para atender às necessidades imediatas do homem. Com a evolução da engenharia, ambições surgem e com elas novas técnicas construtivas e estruturas mais elaboradas, deixando estas de serem algo temporário, para se tornarem impressionantes obras de arte.

A Revolução Industrial foi um período na história de grandes mudanças, marcado pelo desenvolvimento econômico e social, e também pelo surgimento de construções mais complexas, as pontes, telhados de grandes vãos, ferrovias, que necessitavam de cálculos mais elaborados. Desta forma há a desvinculação entre as profissões arquitetura e engenharia, que passam a ser trabalhos distintos que exercem funções diferenciadas.

O novo contexto, e as novas estruturas de grande porte desenvolvidas durante a Revolução Industrial, inspiraram aos engenheiros a criarem projetos de estruturas que apresentassem três requisitos básicos: a economia, a eficiência estrutural e a estética, estes aplicados por David P. Billington, como requisitos intrínsecos à Arte estrutural, teoria a qual explica como estruturas como pontes, viadutos, aquedutos etc. deve ser projetada, levando em consideração a melhor forma arquitetônica que se molde a melhor forma estrutural.

As pontes como fonte de projetos grandiosos, geralmente têm seus projetos elegidos por meio de concursos, necessitando de maior análise do profissional com sua criação, o qual deve buscar em seu projeto o design mais eficaz, que produzirá o melhor resultado de estabilidade estrutural e que apresentará redução na utilização dos recursos materiais.

Antigamente as pontes construídas não apresentavam uma base adequada de cálculos para verificar a viabilidade da estrutura, deste modo as pontes apresentavam estruturas muito densas, para que pudessem suprir a esta falta. O desenvolvimento da ciência e a criação métodos de cálculo mais elaborados, principalmente durante a Revolução Industrial, no século XIX, permitiu a construção de estruturas mais esbeltas e econômicas que resultavam em pontes mais leves e funcionais.

O progresso da engenharia possibilitou os cálculos de estruturas mais complexas, e nos dias atuais pode-se contar com a ajuda de softwares que dispõem de métodos que propõem uma análise mais profunda e mais segura do elemento projetado em menor tempo, possibilitando formas estruturais mais eficientes.

Neste trabalho, será desenvolvida a análise de duas pontes do engenheiro suíço Robert Maillart, marcadamente reconhecido como artista estrutural. Na ponte Zuoz (1901), verificaram-se patologias na parede do arco de concreto, cuja porção foi intuitivamente removida na ponte Tavanasa (1905). Objetiva-se simular tensões em modelos simplificados das duas pontes utilizando o software Ansys. Inicialmente serão analisadas as tensões no modelo de Zuoz sem danos e em um segundo momento serão verificadas as tensões no modelo de Zuoz com danos e finalmente verificar as tensões e a eficiência da solução proposta por Maillart em Tavanasa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Avaliar o comportamento estrutural das pontes de Robert Maillart: Zuoz (1901) e Tavanasa (1905) devido a presença de patologias estruturais em Zuoz e uma alteração no sistema estrutural de Tavanasa.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as tensões na ponte Zuoz devido à carregamento permanente e móvel;
- Simular danos nas regiões próximas ao apoio da ponte Zuoz
- Avaliar o nível de tensões devido aos danos simulados;
- Avaliar as tensões na ponte Tavanasa considerando uma solução estrutural diferente da ponte Zuoz na região do apoio.

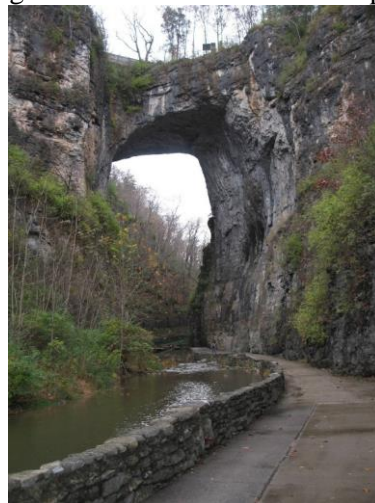
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alguns pontos importantes da história das estruturas

3.1.1. Como surgiu a necessidade de criar estruturas

O interesse por construir estruturas veio desde os primórdios da civilização, na pré-história, quando o homem para sua sobrevivência viu a necessidade de ir atrás de seu alimento. Desta forma, percebendo que não era uma tarefa fácil conseguir se alimentar, o homem pré-histórico começa a observar as formas da natureza, que em algum momento o ajudavam em sua busca. REBELLO (2000), afirma que as estruturas naturais, as quais se formavam acidentalmente ofereciam passagens feitas de cipó ou pedras, formando as primeiras pontes da história, como a Rockbridge country, existente até os tempos atuais. Nem sempre o homem podia contar com as facilidades que a natureza dispunha, desta forma ele passa a construir suas próprias estruturas, replicando as formas que via na natureza, como pontes de pedras empilhadas, de galhos que caíam das árvores dentre outros recursos que tinham a disposição.

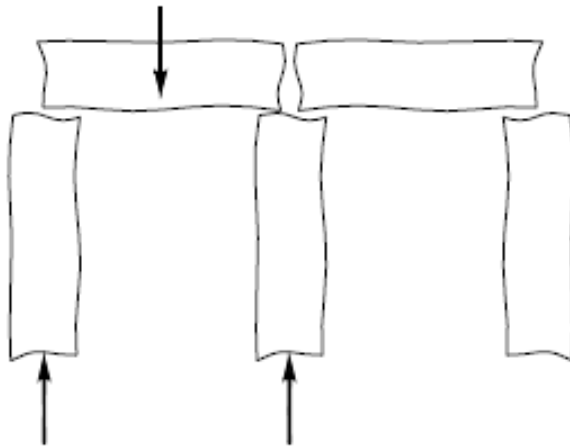
Figura 1- Rockbridge Count- Ponte desenvolvida pela própria natureza



Fonte: <http://stuffpoint.com/bridges-architectural-wonders-around-the-world/image/389286/natural-bridge-in-rockbridge-county-virginia-wallpaper/> acesso em 19/04/2016

Este foi um grande passo do homem pré-histórico para a evolução da humanidade, devido a nova forma de pensar ele percebe que é necessário evoluir mais suas habilidades e ao invés de ir atrás de seu alimento em locais muito distantes passa a produzi-lo próximo a si. Neste caso, ele necessita ter um lugar para se abrigar de forma permanente, então passa a construir lares, onde poderia abrigar-se e proteger-se.

Figura 2- Detalhe de estrutura de pedra da pré-história



Fonte Stucchi, 2006.

Figura 3- Ponte sobre o arroio (Inglaterra)

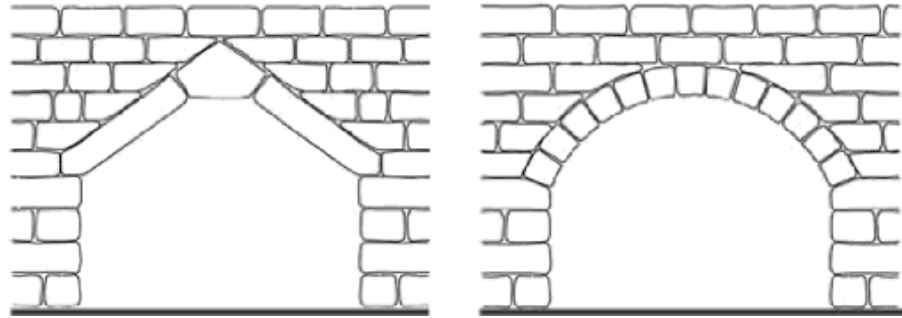


Fonte:

<http://www.itti.org.br/portal/oitti/equipe-tecnica/297-historia-das-pontes.html>

Os anseios do homem evoluíam e, por conseguinte, a busca por novas alternativas para atendê-los, uma delas é a criação da técnica do arco falso. Como diz REBELLO (2000), as antigas civilizações necessitavam vencer vãos e desta forma criaram algo parecido com um arco, considerado como um arco falso, denominados desta forma devido a não conseguirem atingir grandes vãos como o arco verdadeiro que surgiu nos anos 4000 AC.

Figura 4-Representações de arco falso (à esquerda) e arco verdadeiro (à direita)



Fonte: Sales, José Jairo et. Al. (2015)

A evolução estrutural seguia e o povo Egípcio utilizando e aperfeiçoando as técnicas dos povos anteriores, se tornaram grandes construtores e destaques nas grandes obras de pirâmides e tumbas. Os egípcios apesar de conhecerem as técnicas dos arcos, utilizavam muito as técnicas construtivas de empilhamento de pedras e o sistema viga X pilar.

Figura 5- Detalhe da estrutura de pirâmide com empilhamento de pedras



Fonte: <http://www.megacurioso.com.br/misterios/40468-6-estruturas-antigas-que-a-ciencia-nao-consegue-explicar.htm> - acesso:18/04

O aperfeiçoamento estrutural não parava e construções em madeira surgiam como alternativas às novas obras. Uma região localizada na Suíça, que propunha esse modelo estrutural era residida pelos “habitantes dos lagos”, os quais moravam em pequenas casas de

madeira de estrutura tipo viga x pilar, sendo esta a primeira vez que viu-se a cravação de estacas ao solo, como forma de fundação e a criação de treliças para os telhados. (Rebello,2000)

3.1.2 Persas e Chineses

As pontes começam a ser exploradas como forma de alcançar novos territórios (REBELLO, 2000). Os Persas foram destaque na construção de pontes, as utilizando de forma estratégica de domínio de novos territórios, ou seja, construam as pontes e após sua passagem às destruíam, de forma a prevenir ataques inimigos. Além dos persas, os chineses foram grandes construtores de pontes, estas consideradas por eles como grandes trabalhos realizados que tinham caráter religioso e sigiloso, não sendo transmitida sua técnica a outros povos.

Figuras 6 a) e 6 b) -Ponte Shahreston (Persia) Construção entre séc III e V



Fonte:-<http://chadelimadapersia.blogspot.com.br/2014/04/as-pontes-historicas-de-isfahan.html>

3.1.3 Gregos e Romanos

A Grécia antiga é conhecida pela construção de estádios, teatros, ginásios, pontes e principalmente pelos seus grandes templos de pilares robustos, dentre eles o mais famoso, o Pathernon. Para as construções o sistema estrutural mais comum era o viga X pilar, embora conhecessem bem a técnica dos arcos preferiam as estruturas de vão menores, e deste modo não utilizavam muito a técnica.

Este novo conceito de edificações, mostra a evolução da sociedade grega que começa a produzir arquitetos, matemáticos, filósofos, artistas, dramaturgos de mais alta ordem assim como humoristas e satiristas, GLANCEY (2001). A criação de escolas científicas foi um grande marco, na evolução da ciência e da arte de edificar, ou seja, pessoas com grande conhecimento empírico, além de passarem seus conhecimentos, passam a dar maior atenção e a acompanhar as obras gregas, produzindo desta forma, edificações de maior qualidade.

Figura 7- Estrutura do Pathemon



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Partenon>- acesso em 19/04/2016

Os romanos produziam suas obras baseadas nas inspirações que observavam das estruturas etruscas¹ e gregas, mas eram, na verdade, bons construtores de cidades, o que os fez mudar sua vertente nas técnicas estruturais, pois suas cidades eram construídas cada vez mais distantes da capital, exigindo que as construções fossem mais simplificadas, e deste modo,

¹ Povos da Península central, onde hoje se encontra a Itália, grandes construtores de estradas, pontes, túneis, utilizando os métodos construtivos de abobadas e arcos

tiveram que criar normas de padronização de mão de obra e materiais para um controle mais eficaz (Rebello,2000).

Além de cidades, as obras monumentais eram de grande gosto dos romanos que tinham como objetivo atingir os grandes vãos, portanto se aperfeiçoaram nas técnicas de arcos, criando o arco verdadeiro, cúpulas e abobadas, e como consequência conseguiam maior dinâmica dos espaços, que permitiam maior liberdade de locomoção ao usuário da estrutura.

Um dos grandes feitos dos romanos eram as pontes em arcos, dentre elas as de arco semicircular e segmentar (arcos menores que um semicírculo), este último evitava que as pontes fossem derrubadas por inundações, por darem maior estabilidade a estrutura. Com este modelo estrutural eles conseguiam atingir grandes comprimentos com suas pontes, destaca-se a ponte Lymira, composta por 26 arcos segmentares resultando em 360 m de comprimento e o maior vão com 15 m. Os romanos também foram um dos pioneiros na construção de pontes utilizando o concreto de pozolana² antes da Revolução Industrial.

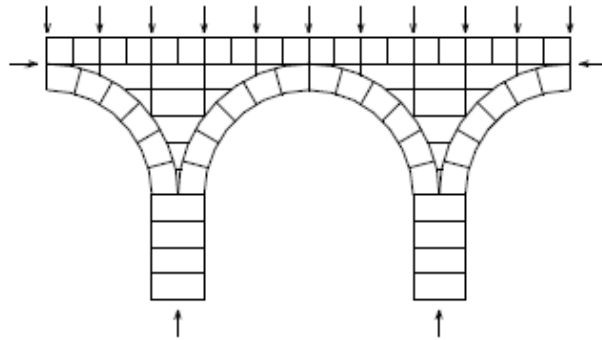
Figura 7 - Parte da ponte Lymira



Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte_di_Limira: Acesso em:20/05/2016

² Cinzas proveniente de rochas vulcânicas utilizada como componente do cimento para a preparação das argamassas pozolânicas.

Figura 8- Modelo aqueduto romano com arco verdadeiro em pedras



Fonte Stucchi,2006 texto 16

Figura 9- Pont Sant angelo-Roma utilizada a pozolana



Fonte- <http://www.itti.org.br/portal/oitti/equipe-tecnica/297-historia-das-pontes.html> Acesso em: 27/05/2016

3.1.4 Revolução Industrial

A Revolução Industrial inicia no final século XVIII e foi distinguida por um período de grandes mudanças e grande desenvolvimento na sociedade. O período é marcado pelo grande processo de industrialização, de crescimento urbano, evolução tecnológica e surgimento de novos produtos manufaturados que tornavam possíveis a concepção de estradas, ferrovias, pontes, grandes fábricas etc. para atender à nova demanda.

O grande desenvolvimento e crescimento urbano exigia edifícios mais altos, estações de trem mais longas e pontes mais eficientes, e desta forma, o período destaca-se pelo desmembramento definitivo das profissões arquitetura e engenharia. Com a necessidade de cálculos mais elaborados para as novas estruturas, o engenheiro direcionou-se, com mais afinco, para este fim. O arquiteto, por sua vez, tornou-se responsável pelo planejamento dos espaços. REBELLO (2000), destaca que a expansão industrial demandava profundos conhecimentos técnicos dos engenheiros, principalmente no transporte por estradas de ferro e nas pontes que passaram a ter maiores vãos e ao mesmo tempo com sua capacidade de cargas crescentes, exigindo de projetos com maior eficiência.

A Revolução Industrial é marcada por dois momentos. O primeiro é evidenciado por toda a transformação econômica e mudanças do processo de produção e avanços da tecnologia, o deslocamento da população rural para a zona urbana. A produção do ferro, que até então era uma técnica manual, passa a ser um processo de produção em larga escala com a criação de máquinas de vapor. Este novo ambiente estimula os profissionais a explorarem o novo material nas novas obras, porém o ferro ainda com custo elevado, obriga os profissionais de engenharia a criarem formas que como consequência trouxesse a redução dos gastos com a matéria prima. O segundo momento, no final do século XIX é destacado principalmente pela redução do preço do ferro e pela criação de um novo material: o concreto armado (concreto reforçado com aço). No segundo período BILLINGTON (1983), afirma que as estruturas passam a ser visualmente mais simplificadas, diferente do primeiro período da Revolução, onde as estruturas de ferro eram visualmente mais complexas.

Figura 10- Iron Bridge- primeira ponte em ferro fundido



Fonte:<http://www.english-heritage.org.uk/visit/places/iron-bridge/>Acesso em:25/05/2016

3.2 A Arte Estrutural

3.2.1 Conceitos

O Trecho citado de Eduardo Torroja apresenta aspectos que permitem introduzir o conceito de arte estrutural:

“Projetar, mais do que somente estruturas, e embora tenha muito de ciência e tecnologia envolvidos, tem muito mais de arte, do senso comum, de deleite no trabalho de imaginar o traçado, onde os cálculos somente irão adicionar os últimos toques, garantindo a resistência estática da estrutura” (TORROJA, 2011 Tradução nossa)

A arte estrutural foi um estudo desenvolvido pelo engenheiro civil David P. BILLINGTON³ publicado no ano de 1983 no *The Tower and The Bridge*. BILLINGTON, propõem que a Arte Estrutural não seja considerada como mais um movimento de arte moderna,

³ Engenheiro especialista em análise estrutural de estruturas de concreto, projeto de pontes, estruturas de casca, e história e estética de estruturas como forma de arte. Diretor do Programa de Arquitetura e Engenharia da Universidade de Princeton. Conhecido pelo projeto multidisciplinar na universidade de Princeton da engenharia com as áreas humanas, ciência, arte e política.

mas sim como uma arte democrática, a qual pode ser vista e apreciada por todos, e que tem por objetivo buscar o equilíbrio entre os campos da liberdade e da disciplina.

A arte estrutural tem uma proposta que vai mais além do caráter das dimensões e das formas que garantam as exigências de equilíbrio (FONSECA, 2007). Ou seja, para chegar ao âmbito de Arte Estrutural, o projetista deve levar em consideração três princípios: a eficiência, economia, ligadas ao campo da disciplina; e a estética, vinculada à liberdade.

“A utilização da menor quantidade possível de recursos naturais; a conservação de recursos públicos, economia como medida social; e, a consciente motivação estética. Portanto, busca-se o mínimo material, o mínimo custo e a máxima expressão estética.” (SÁNCHEZ et. al, 2010, p.4)

Figura 11-David P BILLINGTON



Fonte: https://www.princeton.edu/cee/people/display_person/?netid=billingt-David P. -acesso em 18/04/2016

Estes três princípios são base para as três dimensões estabelecidas por BILLINGTON, as quais definem as grandes estruturas da arte estrutural. Dentre as três dimensões estão:

- A dimensão Científica – esta dimensão está ligada ao campo da pesquisa que tem como objetivo criar as teorias para justificar os elementos já existentes na natureza. Levando em consideração a teoria da Arte Estrutural, as formulações criadas pela ciência servem como base para chegar a cálculos que justifiquem a eficiência estrutural do elemento a ser construído.
- A dimensão Social- A estrutura de grande porte é considerada um bem da sociedade, passando esta ter poder de intervenção nos novos projetos de estruturas desenvolvidos. Portanto o que se busca nesta dimensão é obter o melhor custo benefício das estruturas

e redução dos gastos, devendo o projetista se preocupar em otimizar suas estruturas, buscando a economia dos recursos materiais a serem utilizados;

- A dimensão Simbólica- Nesta dimensão o projetista deve propor em seu design a expressividade e elegância da estrutura, levando em consideração que as outras duas dimensões também devem ser atendidas respectivamente.

Os três conceitos são intrínsecos à Arte Estrutural. Pensar a estética sem pensar a estrutura e a economia de recursos é sinal de que a estrutura não será eficiente. A forma como essas características se complementam fazem com que os projetistas aflorem o lado da criatividade, deixem de lado o mecanicismo e almejem estruturas que possuam belas formas que se compatibilizam com estruturas eficientes e econômicas.

“A forma controla a força, e mais claramente o projetista pode visualizar as forças atuantes e mais segurança ele terá de sua forma.” –Tradução nossa (BILLINGTON,1983)

Para BILLINGTON (1983), o fato de a engenharia está ligada ao campo da tecnologia é o que permite a viabilidade da teoria proposta pela arte estrutural. O campo tecnológico se amplia ao campo da inovação, o que dá a liberdade aos projetistas de criar projetos diferenciados, que resultam em belas estruturas de arte estrutural. Os projetos por sua vez são justificados pela ciência por meio de suas fórmulas e adaptadas a cada novo projeto desenvolvido.

BILLINGTON (1983), apresenta as obras de arte estrutural como as de grande porte, como pontes, torres, aquedutos, telhados de grandes vãos, viadutos etc., conforme ele afirma, obras para engenheiros, por exigirem de grande conhecimento estrutural do profissional, porém este deve também aprofundar-se nos conceitos de estética e arte para que seu projeto seja considerado uma obra de arte da Arte estrutural. Aos arquitetos ficam as obras de pequeno porte como casas, escolas e hospitais, pois são estruturas que exigem cálculos mais simplificados e necessitam de uma distribuição dos espaços mais elaboradas, a qual os arquitetos possuem maior capacidade.

“É verdade que a engenharia estrutural é apenas uma parte do projeto de obras arquitetônicas como uma casa particular, uma escola ou um hospital; mas em torres, pontes, grandes vãos livres e muitos tipos de edifícios industriais, as considerações estéticas fornecem critérios importantes para o projeto do engenheiro. O melhor de tais obras de engenharia são exemplos de arte estrutural, e eles têm aparecido com frequência suficiente para justificar a identificação da arte estrutural como uma tradição madura, com um carácter único. ” (BILLINGTON, 1983- Tradução nossa)

A Arte Estrutural surge diante de um contexto de grandes mudanças da Revolução Industrial, dentre elas a revolução do ferro no século XIX, que incentivou os novos engenheiros a desenvolverem estruturas diferenciadas além de seu tempo, mais esbeltas, singelas e de muita beleza. O surgimento do concreto armado no século XX foi mais um incentivo a evolução da engenharia na Arte Estrutural, por ser o concreto armado um insumo que resiste bem à tração e à compressão, permite ao profissional ter maior liberdade no desenvolvimento de seu projeto e pensar em estruturas ainda mais eficientes, gastando o mínimo de recursos e que se encaixem perfeitamente a paisagem.

Billington em sua pesquisa expõem alguns principais engenheiros que desenvolveram seus projetos no âmbito da Arte Estrutural, dentre eles estão Thomas Telford, Gustave Eiffel, Robert Maillart, dentre outros.

O conceito da Arte Estrutural é amplamente discutido na disciplina “Evolução da forma estrutural” do Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (PPG-FAU/UnB) ministrada pelo professor José Manoel Morales Sanchez e a sua inserção neste trabalho se deu por sugestão do orientador do mesmo.

3.3- A relação arquitetura X engenharia à luz da Arte Estrutural

A Arte Estrutural sendo classificada por BILLINGTON como um trabalho de engenheiros, leva estes a terem que deixar o lado mais técnico de avaliar apenas a estabilidade estrutural de um elemento, e aprofundar-se em outros conceitos que envolvem a forma da estrutura. Deste modo, vale discutir mais profundamente a respeito da relação arquitetura e engenharia. Áreas que deveriam complementar-se, porém afastaram-se com o decorrer da história deixando uma lacuna nas relações entre a estrutura e a estética.

No contexto atual a arquitetura se envolve mais na parte dos projetos sem se preocupar muito com a estrutura, já a engenharia atenta-se em deixar o sistema estrutural estável, mas não o compatibiliza com projeto de arquitetura. Este espaço gerado entre as profissões e a causa deste afastamento se deve desde a universidade, cada área direcionar-se para linhas de conhecimento distintas, gerando os conflitos entre os profissionais.

As escolas de Engenharia e de Arquitetura em sua maioria formam os profissionais com base em currículos cuja organização dificulta a integração entre as diversas disciplinas. O estudante tem dificuldades para ver a relação prática entre elas no desenvolvimento de um projeto ou execução de um determinado empreendimento. Isto sem mencionar os aspectos didáticos que consideram muito mais a questão do como ensinar do que o como aprender que acabam por agravar a aprendizagem, devido a metodologias de ensino. (Arsenic, et. Al., 2011)

Em uma pesquisa realizada no Distrito Federal por CASTRO JUNIOR (2014), é visto que nas universidades apenas 8,21%, são as disciplinas que envolvem engenharia no curso de arquitetura valor maior ainda que as disciplinas de arquitetura no curso de engenharia, que são apenas de 4,39%, o que limita e dificulta a forma de pensar do futuro profissional.

É possível perceber que com o afastamento das profissões arquitetura e engenharia, a estrutura e a estética, tomam rumos diferentes e acabam não se complementando, ou seja, os elementos estruturais tendem a ser escondidos, por serem considerados apenas elementos de sustentação e que prejudicam a estética. Nota-se o desinteresse em pensar os elementos estruturais como parte do projeto arquitetônico, o que de fato mostra a dificuldade de integração entre estrutura e a estética, ficando claro nas palavras de Charleson:

Em grande parte de nosso ambiente construído, a estrutura é escondida ou indistinta. Painéis de fachada opacos ou painéis de vidro espelhado escondem estruturas localizadas no perímetro dos edifícios. Dentro deles, forros suspensos ocultam vigas e elementos estruturais verticais, como quando pilares, contraventamentos ou paredes portantes são fechados por divisórias ou paredes internas ou não são visualmente indistintos (CHARLESON, 2009).

CHARLESON (2009), destaca que a estrutura não é apenas o uso da tecnologia, para gerar sustentação do empreendimento, mas sim um elemento que complementa a arquitetura.

Diz também que além da estrutura fazer o trabalho de sustento também pode trazer riqueza estética e funcional aos projetos, aumentando o interesse dos usuários em observar as edificações, gerando desta forma, emoções aos mesmos.

Vale ressaltar que quanto mais consciência o profissional tem de seu projeto mais próximo da eficiência estará sua estrutura, ou seja, ela ao mesmo tempo em que será bela e funcional, também será econômica, pois evitará os desperdícios que não foram previstos em projeto e estruturalmente eficiente, devido ao melhor aproveitamento dos elementos estruturais, pensados em conjunto com os elementos estéticos, passando a estrutura a compor a arquitetura.

A arte estrutural, portanto reúne os conceitos aprendidos em arquitetura e engenharia e os concilia em um modelo estrutural de grande porte, gerando um resultado mais harmonioso, que além da análise de cálculos da estrutura, terá a verificação dos recursos materiais disponíveis que melhor se adaptam ao projeto e a apreciação da melhor forma estética que se compatibilizará com a estrutura. Portanto, quando o profissional pensa a estética e a estrutura como um único modelo o resultado é uma construção de maior eficiência e de custos reduzidos, devido a esta multidisciplinaridade de conceitos.

Esta forma de pensar foi o que deu destaque a grandes engenheiros pioneiros da arte estrutural, que impressionavam com estruturas exuberantes e arrojadas para sua época.

3.4 Engenheiros da Arte Estrutural

3.4.1 *Thomas Telford*

Figura 12-Thomas Telford



Fonte -https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Telford- Acesso em 19/04/2016

Nascido em, Glendinning, na Escócia em 1757, inicialmente trabalhou como pedreiro, até o ano de 1782, quando deixou a Escócia e foi para Londres para encontrar novas

possibilidades e aperfeiçoar suas habilidades. Em Londres trabalhou como projetista em um escritório de arquitetura.

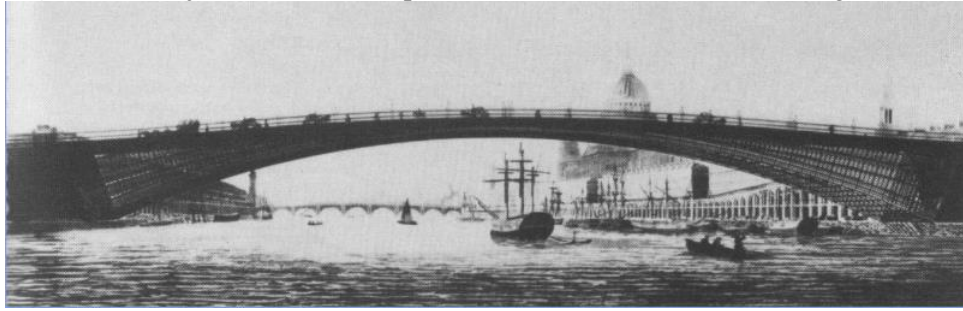
Telford foi um grande incentivador da Arte Estrutural, desenvolveu seu primeiro projeto de obras de grande escala reconhecido no ano de 1792, projetando uma ponte de arco em pedra com três vãos. Com este projeto, ganhou destaque e foi convidado a assumir o cargo de engenheiro, neste instante começa a projetar obras de grandes dimensões, destacando-se nas obras de pontes. Este momento da decisão de Telford é marcado pela desvinculação da arquitetura e engenharia, ou seja, BILLINGTON (1983) declara que, esta reação pode ser chamada como a primeira declaração autoconsciente da nova engenharia, totalmente desconectada da arquitetura, intimamente relacionada com a revolução industrial.

Neste momento Telford estimula os outros profissionais da nova engenharia, a pensarem as novas estruturas de grande escala. Devido ao novo material, desenvolvido durante a Revolução Industrial, o ferro fundido, ter maior capacidade de resistência a tração, Telford propõem novos projetos de estruturas com arcos mais abatidos, que reduzem os efeitos de compressão do arco e passam a trabalhar também a tração, melhorando a eficiência do ferro nas estruturas.

O peso próprio da estrutura era até então a carga mais significativa, mas, com o advento das locomotivas, surgia então a carga acidental e dinâmica, e a estrutura não poderia mais ser em arco de ferro fundido, que, como a pedra a alvenaria resistem muito bem apenas a compressão, era necessária uma nova forma que correspondesse diretamente a essa nova função dinâmica. (FONSECA,2007)

Já como engenheiro, Telford desenvolveu o projeto da ponte London Bridge, o qual representava uma grandiosa estrutura em arco de aproximadamente 183 m, que apresentava a leveza e força do ferro, capaz de atender as necessidades exigidas pelo parlamento, como a de haver a possibilidade transporte pelo rio abaixo da ponte. A ponte não foi construída, porém seu projeto foi repercutido e utilizado com base para os projetos de Arte Estrutural posteriores como a torre Eiffel e a ponte Roebling. Telford foi um grande desenvolvedor de Arte Estrutural buscando eficiência em seus projetos.

Figura 13- Projeto desenvolvido por Thomas Telford da London Bridge.



Fonte: <http://thames.me.uk/s00049c.htm#top>- acesso em 29/04/2016

Figura 14-Craigellachie Bridge-Projeto de Thomas Telford (1814)



Fonte: <https://randyplunkett.wordpress.com/scotland-may-2012/dufftown/>- acesso em 29/04/2016.

3.4.2 *Gustave Eiffel*

Figura 15-Gustave Eiffel



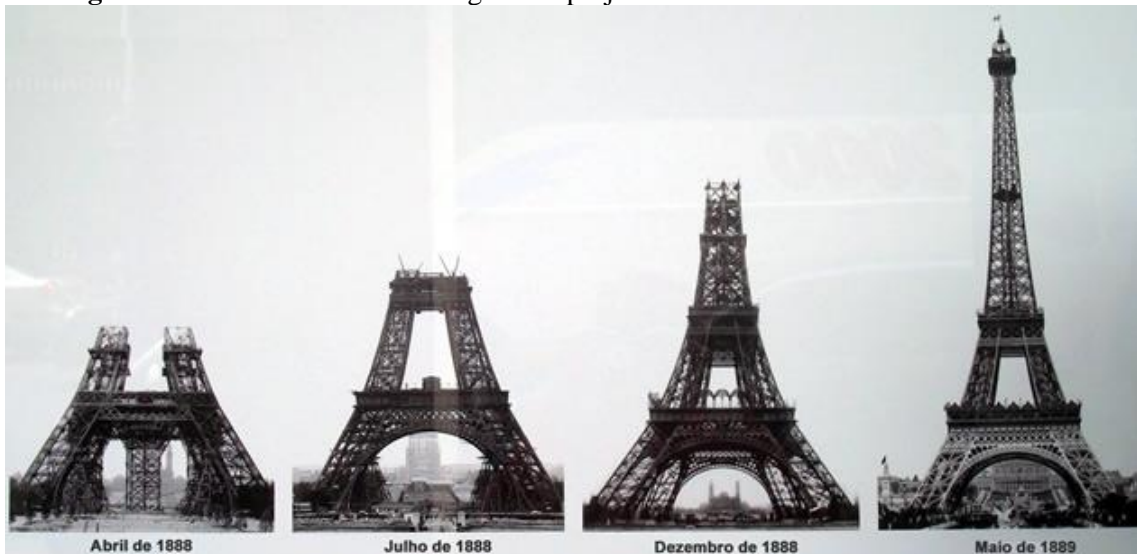
Fonte 1:https://en.wikipedia.org/wiki/Gustave_Eiffel- acesso em: 29/04/2016

Nasceu em Dijon em 15 de dezembro de 1832, se graduou em engenharia química pela Ecole Centrale des Arts et Manufactures no ano de 1855. Nesta época a França, assim como a Inglaterra, encontrava-se em uma nova fase, onde a produção de ferro estava em ascensão. Eiffel, neste período, conseguiu emprego em uma grande empresa que projetava e produzia equipamentos ferroviários. Durante o período que passou na empresa, Eiffel, realizou e projetou uma ponte em Bordeaux, no ano de 1858, de aproximadamente 500m. Neste projeto conforme discorre BILLINGTON (1983), Eiffel buscou apresentar cálculos cuidadosos combinados a um sistema de construção inventiva, permitindo a ponte ficar pronta até a data prevista no ano de 1860.

No ano de 1867, Eiffel, decide seguir com seu próprio negócio, projetando e construindo estruturas na França e em outros lugares do mundo, como pontes, fábricas, estações ferroviárias e dentre outras, o que o tornou um engenheiro de grande prestígio na França. Em suas obras, a preocupação com a estética era fundamental, assim como BILLINGTON (1983), cita palavras de Le Corbusier⁴, os cálculos de Eiffel sempre foram inspirados por um instinto admirável pela proporção, tendo como objetivo apresentar a elegância da estrutura.

⁴ Arquiteto e urbanista, escultor e pintor suíço, naturalizado Francês.

Figura 16- A Torre Eiffel um dos grandes projetos em arte estrutural de Gustave Eiffel



Fonte :<http://guiadoestrangeiro.com/a-historia-da-torre-eiffel/>- Acesso em 29/04/2016

3.4.3 Robert Maillart

Figura 17-Robert Maillart



Fonte-<https://www.library.ethz.ch/Ressourcen/Digitale-Bibliothek/Kurzportraits/Robert-Maillart-1872-bis-1940-> acesso em 29/04/2016

Nascido na Suíça, na cidade de Berna no ano de 1872, formado em engenharia pelo Instituto Federal de Zuric no ano de 1894. Maillart é lembrado principalmente pelas obras inovadoras de pontes que envolviam o material concreto armado. Em seus projetos Robert

Maillart usava como base vigas em forma de caixão ou arcos de concreto. Além de pontes ele foi pioneiro na utilização das lajes em forma cogumelo⁵.

Maillart além de conhecimento de estática se preocupava em saber como iria ocorrer a interação de sua obra com o meio ambiente REBELLO (2008). As suas intenções com a estrutura o destacou na discussão de BILLINGTON a respeito da arte estrutural. Para BILLINGTON (1983), Robert Maillart foi um revolucionário no que se diz a Arte Estrutural. Durante a Revolução Industrial, ele é destaque por desenvolver estruturas de concreto armado com muita eficiência tanto estruturalmente quanto esteticamente.

Maillart é lembrado pelas estruturas e tecnologias inovadoras (como arcos triarticulados e vigas caixão arqueadas) além de seu tempo, um de seus maiores feitos que até os dias atuais impressiona é a ponte Salginatobel, na Suíça (1930).

A ponte apresenta os pilares aparentes que transferem ao arco toda carga da estrutura, desta forma o arco é composto por uma estrutura bem pesada, porém que é compensado pela região da laje e pelas colunas transversais que apresentavam grande leveza. Como complemento da estrutura foi construído um parapeito que dava a aparência de rigidez que a estrutura não apresentava.

A respeito da ponte Saginatobel destaca-se sua incontestável leveza, que não agride em momento algum a paisagem. A forma da ponte se compatibiliza com o comportamento estrutural da mesma, sendo a estrutura principal formada por um arco triarticulado. Um tabuleiro apoiado no centro diretamente no arco e nas extremidades por meio de pilares. Nas extremidades do vão a altura dos pilares é aumentada para suportar as cargas variáveis provenientes dos veículos. Conclui-se que Maillart, a partir da necessidade estrutural extraiu a beleza da ponte. (Rebello,2008)

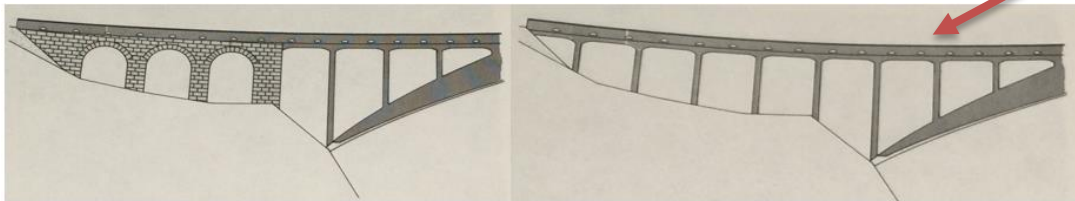
⁵ Laje apoiada diretamente nos pilares, sem existência de vigas.

Figura 18- A ponte Salginatobel



Fonte –Billington, 1979

Figura 19- representação de dois modelos desenvolvidos para o concurso da ponte Salginatobel- escolhido o modelo a direita devido ao menor custo.



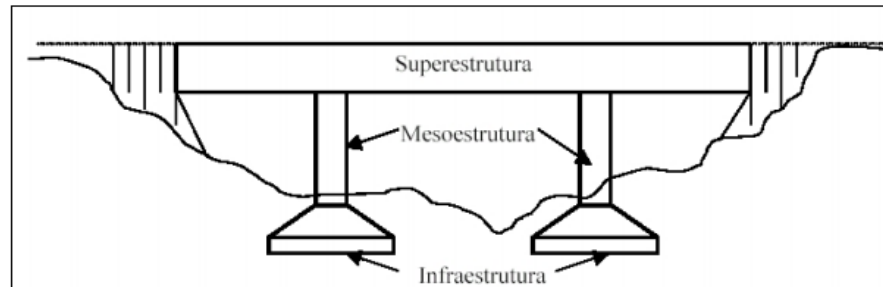
Fonte -<http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html#4>. Acesso em:27/05/2016.

3.5 -Pontes

MARCHETTI (2008), define ponte como obra destinada a transposição de obstáculos, à continuidade de uma via de comunicação qualquer. Os obstáculos considerados são todos constituídos por água, como os rios, lagos, mares, vales profundos etc., caso não exista água, a estrutura será considerada um viaduto.

A estrutura de uma ponte divide-se em três partes principais denominadas, infraestrutura, a região das fundações responsáveis por transmitir as cargas ao solo, a mesoestrutura, compostas pelos pilares e aparelhos apoios, que ficam entre a infraestrutura e superestrutura, e encontros, os quais ficam nas extremidades entre o arrimo e a ponte, é responsável por receber os esforços das lajes e vigas e transferir às fundações; a superestrutura, composta pela laje (tabuleiro) e vigas primárias e secundárias.

Figura 20- Representação de estrutura de ponte



Fonte 2- ALMEIDA, 2000

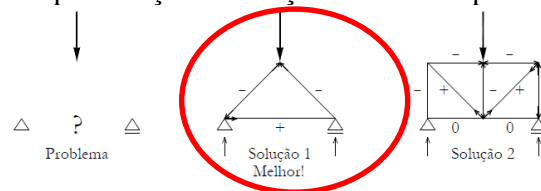
As pontes são elementos que desde os primórdios da civilização ocupam um espaço importante na história. No início as pontes eram criações naturais que eram replicadas pelo homem, para poder atingir seus objetivos de atravessar obstáculos.

Diante do desenvolvimento da engenharia, as pontes passaram a ter mais complexidade e exigiam mais de seus construtores, que necessitavam pensar em diminuir a quantidade de materiais utilizados em busca da melhor eficiência estrutural.

Assim como coloca FONSECA (2007), o desenho da ponte é determinado a partir do modo que deseja vencer o obstáculo, podendo ser de duas maneiras, pela força ou pela forma.

Portanto criar uma ponte baseada na força, seria como no início das construções de pontes, acumular materiais até que atinjam a resistência necessária, sem se preocupar em analisar como ocorrem a transferência de forças e os carregamentos. Já nos casos onde se dá ênfase à forma da ponte, os casos atuais, há uma preocupação e análise dos carregamentos que serão dispostos na estrutura, desta forma, é necessário um profissional qualificado para projetá-la adequadamente, buscando a melhor forma que traga eficiência estrutural e como consequência gere uma estrutura mais econômica.

Figura 21 Representação de soluções estruturais para um problema.



Fonte: Stucchi,2006.

Desenvolver o projeto de uma ponte é o resultado de um processo que envolve uma sequência de alternativas, de maneira a encontrar a melhor solução da estrutura a ser criada. O engenheiro de pontes deve, portanto, ser conhecedor das novas tecnologias e dos novos materiais, dominar bem as técnicas construtivas e atender os seguintes requisitos:

- A funcionalidade- a ponte deve satisfazer às necessidades para as quais foi projetada;
- A segurança- as tensões provocadas nos materiais, selecionados para a execução da ponte, devem ser menores que as tensões que possam causar a ruptura;
- A estética- A ponte deve estar harmonizada com o espaço onde será projetada;
- A economia- analisar em vários modelos aquele que trará a maior economia e maior benefício nos outros requisitos a serem analisados;
- A durabilidade- Ser apropriada ao uso até o período previsto de vida útil dos materiais.

Além dos requisitos o estudo de pontes também apresenta princípios, de acordo com STUCCHI (2006), para que os projetistas de pontes se atentem e procurem a melhor eficiência para seus projetos.

- O primeiro princípio considera com fundamental verificar as cargas a partir de sua aplicação até o final, em suas fundações;
- O segundo princípio: as fundações preferencialmente devem estar abaixo das cargas aplicadas, preferencialmente com os centros de gravidade coincidindo com as cargas, para evitar excentricidades;
- O terceiro princípio: a estrutura mais eficiente é a que faz as cargas percorrerem um caminho mais curto;
- O quarto princípio: o caminho que as cargas irão percorrer nas estruturas isostática (cargas em equilíbrio) será diferente das estruturas hiperestáticas, devido a rigidez influenciar no caminho das cargas, as quais seguem pelo caminho mais rígido;
- O quinto princípio: Para uma estrutura mais eficiente as cargas concentradas devem ser evitadas, evitando carregamentos excessivos;
- O sexto princípio: a eficácia da estrutura é influenciada pela forma que ela será solicitada, deste modo deverá ser analisado e escolhido o material que melhor atender a resistência à solicitação aplicada na estrutura.

3.5.1 Tipos de pontes

Conforme coloca, MARCHETTI (2008), as pontes podem ser classificadas de diversas formas. Dentre as classificações estão:

- O tipo de tráfego
 - Ponte Rodoviária,
 - Ponte para pedestres,
 - Pontes aquedutos
 - Pontes ferroviárias
 - Pontes aeroviárias
 - Pontes canal.
- O comprimento do vão classificado da seguinte forma:
 - Bueiros para vão de até 2 m
 - Pontilhões para vão acima de 2 m e até 10 m,
 - Pontes para vão maior ou igual a 10 m.

Figura 22- Exemplo de bueiro



Fonte:
<http://www.der.pr.gov.br> - Acesso em 11/05/2016

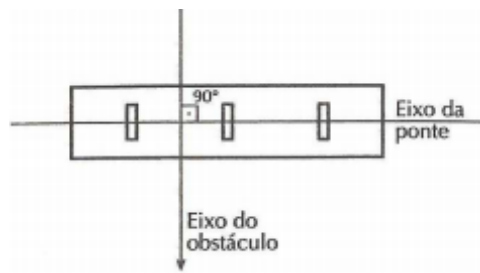
Figura 23- Exemplo de Pontilhão



Fonte:<http://www.portalregional.net.br/noticias/?id=47328>- acesso em: 11/05/2016

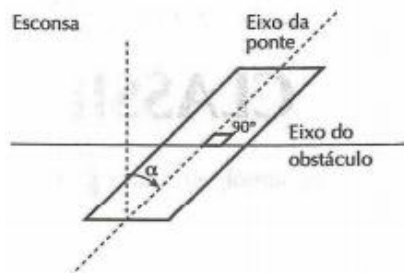
- O desenvolvimento Planialtimétrico:
 - Eixo da ponte reto ortogonal;
 - Eixo da ponte reto inclinado;
 - Eixo da ponte curvo.

Figura 24 A e B -Ponte Horizontal reta de eixo ortogonal



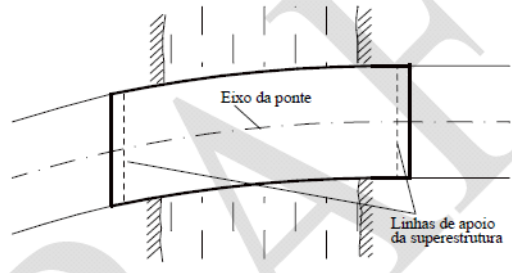
Fonte: Marchetti,2008

- **Figura 25-** Ponte horizontal reta de eixo inclinado



Fonte: Marchetti,2008

- **Figura 26 A e B-** Ponte de eixo curvo



Fonte: Marchetti,2008

Fonte:<http://infraestruturaurbana.pini.com.br> - acesso em: 22/04/2016

- O desenvolvimento altimétrico:
 - Tabuleiros retos horizontais;
 - Tabuleiros em rampa;
 - Tabuleiros curvos côncavos ou convexos.

Figura 27- Representação de Ponte em rampa



Fonte: <http://blogaecweb.com.br/blog/ponte-ou-montanha-russa/> acesso em: 29/04/2016

Figura 28-Ponte de La Barra Leonel Vieira- Detalhe para tabuleiro côncavo e convexo- Uruguai



Fonte: <http://prazernosnegocios.com/artigos/ponte>. Acesso em: 22/04/2016

- O tipo construtivo:
 - Balanços sucessivos
 - Pré-moldado;
 - Moldada no local;
 - Aduelas.

- A estática da superestrutura:
 - Isostática;
 - Hiperestática.

Figura 29- Estrutura isostática



Fonte -http://iseibfacige.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2013/05/Estruturas_Hiperest%C3%A1ticas.pdf- acesso em 11/05/2016

Figura 30-Estrutura hiperestática



Fonte: http://iseibfacige.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2013/05/Estruturas_Hiperest%C3%A1ticas.pdf- acesso em 11/05/2016

- A posição do tabuleiro:

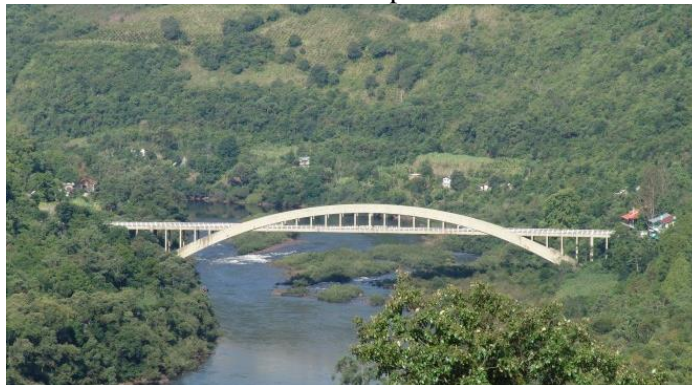
- Inferior;
- Intermediário;
- Superior.

Figura 31- Ponte Dom Luis- Porto,Portugal- Possui tabuleiro superior (indicado pela seta vermelha) para transporte ferroviários e inferior para automóveis e pedestres (indicado pela seta amarela)



fonte -<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2012/08/ponte-dom-luis-porto.html>- acesso em 11/05/2016

Figura 32- Ponte Ernesto Dorneles- Apresenta Tabuleiro intermediário



Fonte - <http://www.serragaucha.com/pt/informacoes-turisticas/atrativos-turisticos/ponte-ernesto-dornelles/> acesso em 11/05/2016

- O tipo de sistema estrutural da superestrutura
 - Atirantada;
 - Pênsil;
 - Pórtico;
 - Vigas;
 - Arco.

3.5.1.1. Pontes em vigas

Dentro das pontes em viga existem três tipos as vigas de alma cheia, vigas em caixão e as vigas mistas.

a) As vigas de alma cheia

São estrutura mais simples de custos mais baixos na fabricação devido a forma simples das vigas, na maioria das vezes tem o tabuleiro (laje) diretamente ligado à parte superior mesa da viga principal (longarina), para que as duas estruturas trabalhem como se fossem uma única. A mesa das vigas geralmente é mais larga e fina e a alma mais esbelta com presença de enrijecedores, chamados de transversinas, com o objetivo de evitar a flambagem.

Figura 33- Viga de alma cheia



Fonte:<http://metalenge.com.br/produtos/1/estruturas-metlicas.html>- Acesso em 04/05/2016

b) As vigas em caixão

Consideradas mais econômicas que as vigas de alma cheia, devido a usar, ao invés de apenas uma alma, duas almas ligadas a mesas na parte superior e inferior, esse sistema gera resistência a torção, podendo ser utilizadas em pontes de estruturas curvas. As mesas podem funcionar como tabuleiros, pois conseguem atingir grandes larguras. As vigas caixão são de fácil montagem devido à resistência a torção e possuem uma boa estética.

Figura 34- Viga caixão em concreto armado



Fonte: BILLINGTON (2007)

c) Vigas mistas

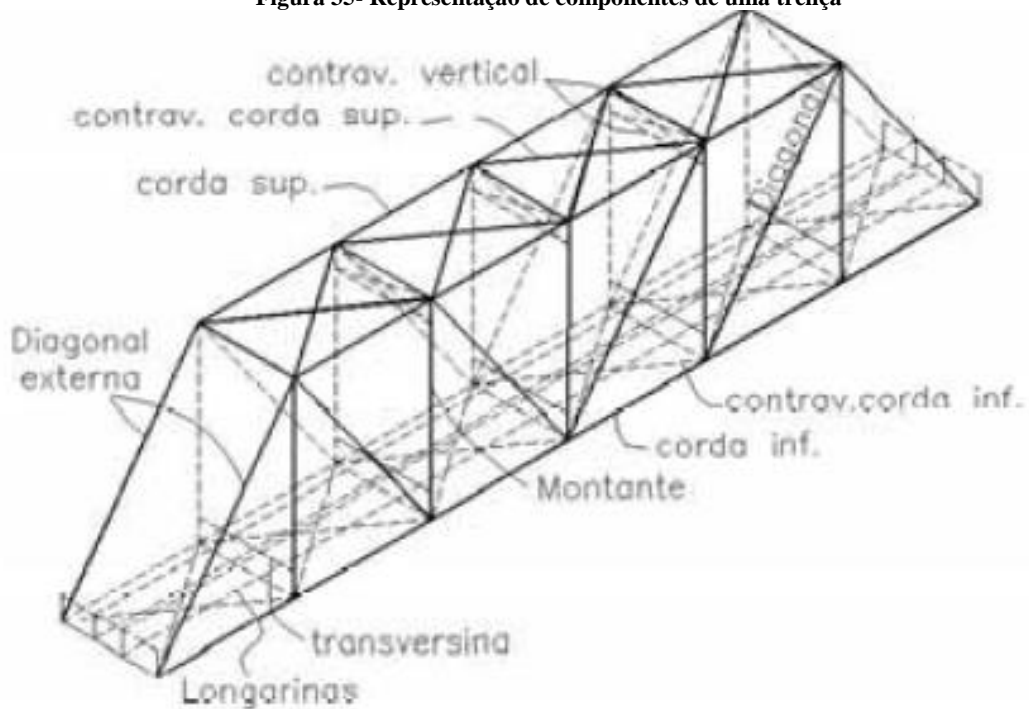
É a mistura de vigas de aço com tabuleiros de concreto, porém para que isso ocorra é necessário fazer a solidarização dos materiais, por conectores de cisalhamento. Geralmente as vigas são de perfil laminado U, o qual melhor se adapta as exigências. Os vãos mais econômicos vão de 20 a 50 m.

3.5.1.2 Pontes de treliças

Formada por um conjunto de triângulos compostos por peças retas e articuladas entre si, sendo as cargas distribuídas nas ligações (nós). O sistema de treliças tradicional é composto

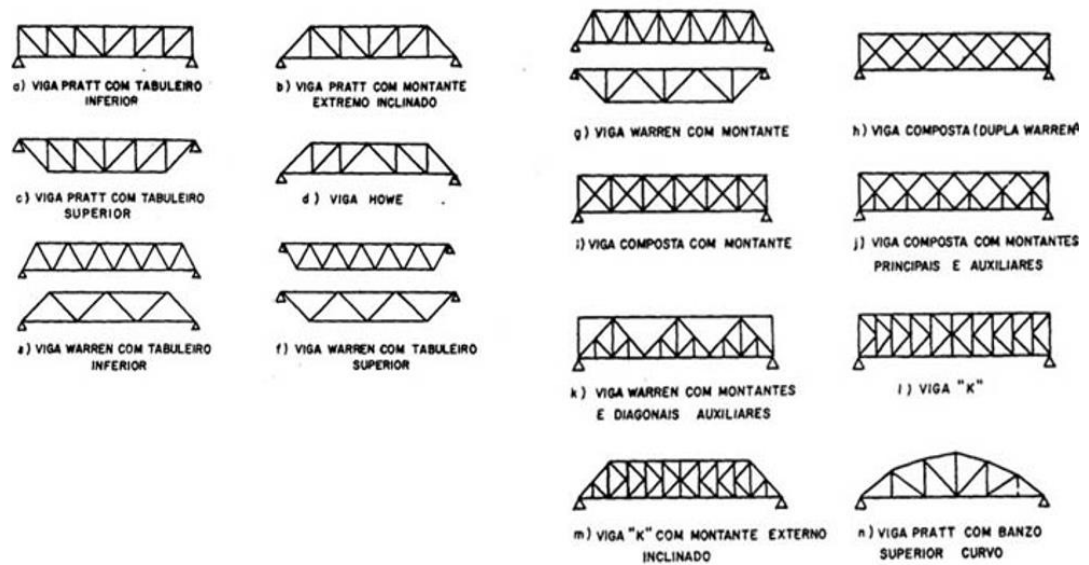
por tabuleiro, transversinas apoiadas nos nós das treliças, longarinas apoiadas nas transversinas, contraventamentos verticais e horizontais, cordas ou banzos superiores e inferiores, diagonais e montantes.

Figura 35- Representação de componentes de uma treliça



Fonte: PINHO,2007.

As treliças possuem vantagem de poderem atingir grandes vão com menor peso da estrutura e as cargas que solicitam a estruturas são apenas de compressão e tração, porém tem como desvantagem o seu custo de fabricação que é mais elevado. Os tipos de treliças mais usuais são a Pratt, Howe, Warren, viga "k" e Woopple.

Figura 36- Tipos de treliças

Fonte: <https://miliauskasarquitetura.files.wordpress.com/2011/09/pontes-trelic3a7adas-2.jpg> acesso em 29/04/2016

3.5.1.3 Pórticos

São as estruturas onde as vigas do tabuleiro são construídas em conjunto com os pilares, formando uma estrutura única ou monolítica, afim de reduzir os vãos das vigas retas. Esta composição geralmente tem pilares e fundações inclinadas. Os pilares recebem uma enorme carga de compressão que será transferida a fundação que recomenda-se que esteja em terreno que tenha capacidade de suportar as cargas.

A estrutura em pórtico não pode ser mista devido a presença de momentos negativos nos pilares e normalmente é construída em locais onde a topografia é favorável como regiões de vales.

Figura 37- Ponte em pórtico- Ponte de são João sobre o rio Douro, Portugal.

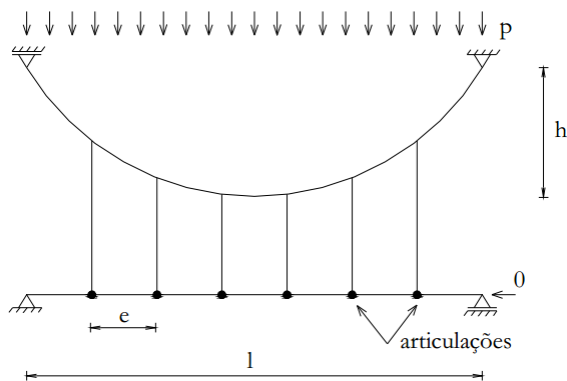
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_de_S%C3%A3o_Jo%C3%A3o- acesso em 11/05/2016.

3.5.1.4 Suspensas

Estas pontes ficam suspensas por cabos, que sofrem os efeitos de tração, presos a torres que suportam a maior parte do peso da ponte, por efeitos de compressão. As pontes suspensas apresentam, na maioria das vezes, sistemas de tesoura, as quais são dispostos sob o tabuleiro a fim de evitar grandes movimentos.

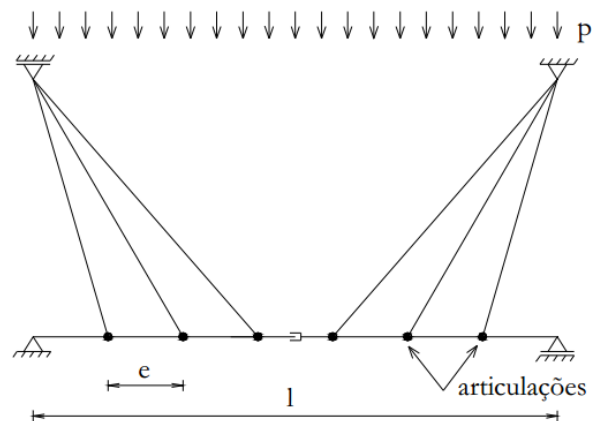
Dentre as pontes suspensas tem-se as pênséis e estaiadas. As pontes pênséis têm como principal característica sua sustentação por meio de cabos de aço estendidos de forma curva e apoiados em grandes torres e ancorados a rochas ou blocos maciços de concreto nas extremidades da ponte. Para que a ponte não sofra oscilações verticais são dispostas vigas de rigidez; as pontes estaiadas, por sua vez são sustentadas por cabos retos sustentados a torres dispostas entre os vãos adjacentes. Por serem mais rígidas não necessitam de vigas de rigidez.

Figura 38- Representação de ponte Pênsil



Fonte: STUCCHI,2006

Figura 39- Representação de ponte estaiada



Fonte:STUCCHI,2006

3.5.1.5 Arcos

As pontes em arco apresentam uma forma eficiente para redução dos esforços de flexão, porém aumentam os esforços de compressão, o que torna o concreto um material muito eficaz neste tipo de estrutura. As pontes em arco eram muito utilizadas no passado, como alternativas de vencer vãos. Atualmente com o avanço tecnológico do concreto protendido, o sistema em arcos está se tornando em desuso devido a ser mais oneroso que os sistemas atuais disponíveis

Figura 40- Ponte do arco de Pombeiro



Fonte:http://www.guimaraesturismo.com/pages/154?geo_article_id=526- acesso em: 27/04/2016

3.6-Método dos Elementos Finitos (MEF):

O método dos elementos finitos, de acordo com Souza, 2003:

“O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno (Problemas de Valor de Contorno), e possivelmente com condições iniciais (para problemas variáveis no tempo). (SOUZA,2003)

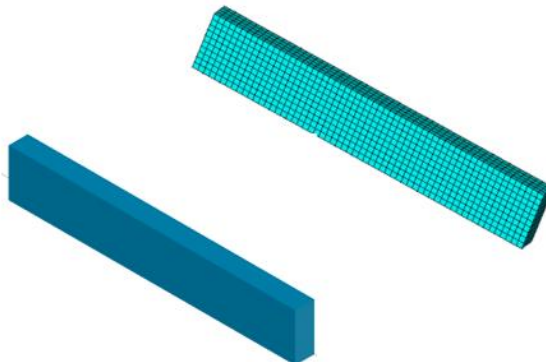
O método tem o objetivo de facilitar cálculos de problemas complexos de um meio contínuo, transformando os mesmos em cálculos mais simplificados, por meio de subdivisões

¹ Porcentagem exata: 0,32% da verba total do município.

(ou elementos finitos) mais simples como triângulos, quadriláteros, hexágonos, cubos etc. Quanto menores forem os elementos e quanto maior for a sua quantidade, mais precisa será a análise do modelo real e resultados mais próximos do real serão obtidos. A vantagem do método é que ele reduz a quantidade de protótipos de testes, realizando simulações mais rápidas e mais eficientes, em um período curto de tempo e proporcionando uma redução de custos.

O MEF pode ser utilizados em diversas áreas, dentre elas as engenharias civil, automobilística, aeronáutica, naval e aeroespacial, além dos campos de energia, mineração, saúde, meio ambiente, recursos hídricos dentre outros. O método é utilizados para analisar tensões em estruturas, efeitos de temperatura, análises eletroestáticas, eletrodinâmicas, acústicas etc. Portanto, são utilizados softwares para analisar os problemas propostos por meio do MEF.

Figura 41- Representação de um modelo real e um modelo com as subdivisões em forma de quadriláteros



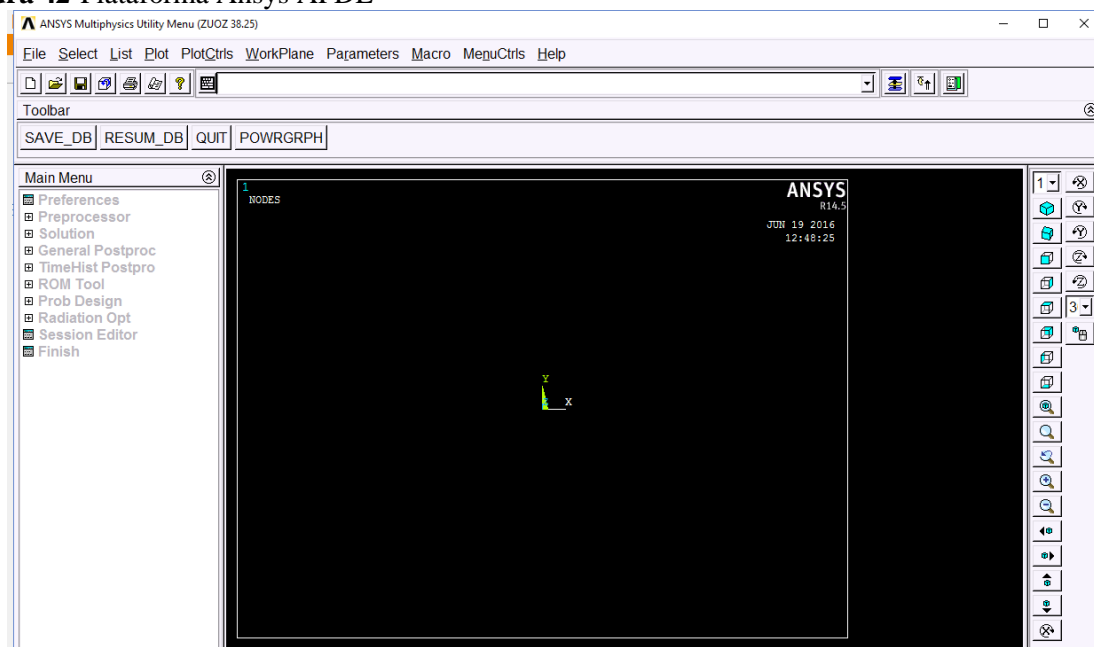
3.6.1 Ansys

O Ansys é um software desenvolvido para resolução de problemas por meio do método dos elementos finitos. Muito utilizado em diversas áreas da engenharia, para avaliação em modelos.

O software apresenta alguns tipos de análise dentre eles estão: a análise estática que pode ser linear e não linear dos deslocamentos, deformações e tensões; a análise dinâmica, que verifica os efeitos de vibração, frequência, a variação das cargas com o tempo; análise térmica, verificação de variação de temperatura, quantidade de calor, fluxo térmico etc.; análise eletromagnética a qual avalia os campos magnéticos em equipamentos eletromagnéticos; análise eletrostática que avalia os campos elétricos; e por fim a acústica, que realiza a avaliação da interação entre o meio fluido (som) e o meio sólido.

O Ansys também possui um sistema de resolução dos problemas físicos de forma combinada, ou seja, permitindo combinar e avaliar dois ou mais elementos de análise, citados, simultaneamente

Figura 42-Plataforma Ansys APDL



4 METODOLOGIA

4.1 Escolha do projeto

O referido estudo se baseou na escolha de duas pontes de Robert Maillart, que envolvem o tema Arte Estrutural.

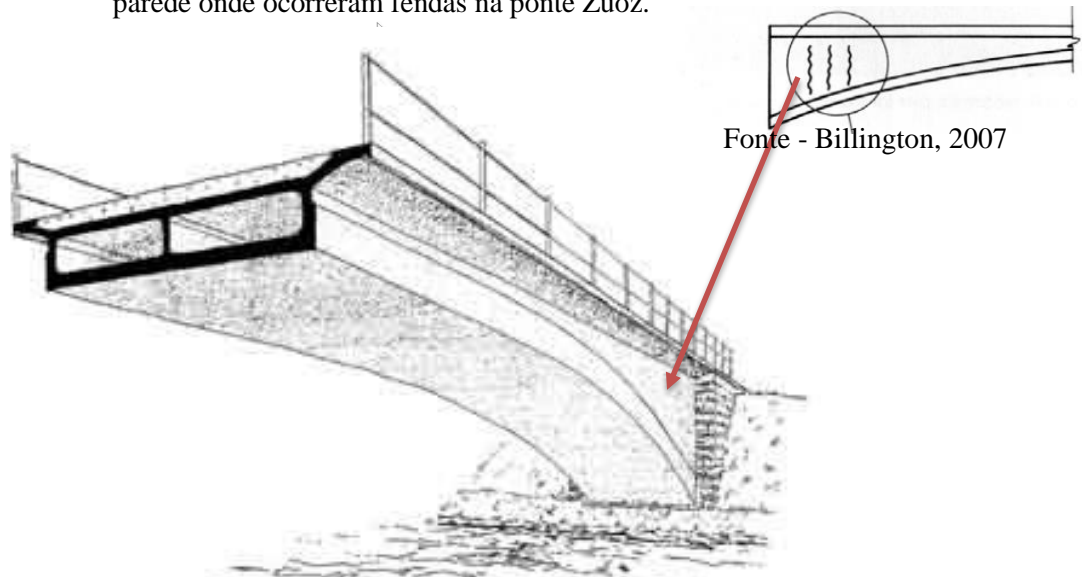
A seleção das pontes foi motivada pelo surgimento de trincas em uma das pontes (Zuoz) e como solução às patologias, Maillart apresentou um novo projeto de ponte (Tavanasa) retirando a porção da parede do arco onde houveram danos em Zuoz.

Para a realização do estudo de caso será utilizado o software especializado de elementos finitos, Ansys APDL. Por meio do programa serão analisadas as tensões ocasionadas por cargas de peso próprio da estrutura e por cargas móveis devido a um trem tipo de 120 KN mais carga distribuída de 3 KN/m², de forma a verificar a análise de Maillart em concluir que as trincas ocasionadas em Zuoz foram por efeito térmico, e não por solicitações de cargas na estrutura, pois na região onde ocorreram as fendas a tensão era mínima, o que o levou a concluir em Tavanasa que a retirada desta região não afetaria a estrutura.

Para análise serão modelados dois modelos simplificados das pontes Zuoz e Tavanasa e depois os modelos serão importados para o programa Ansys, no qual serão realizadas três simulações de análise de tensões, a primeira baseada em um modelo intacto da ponte Zuoz, a segunda em um modelo com danos, criados a partir da exclusão de elementos da malha, e por último a análise no modelo de Tavanasa.

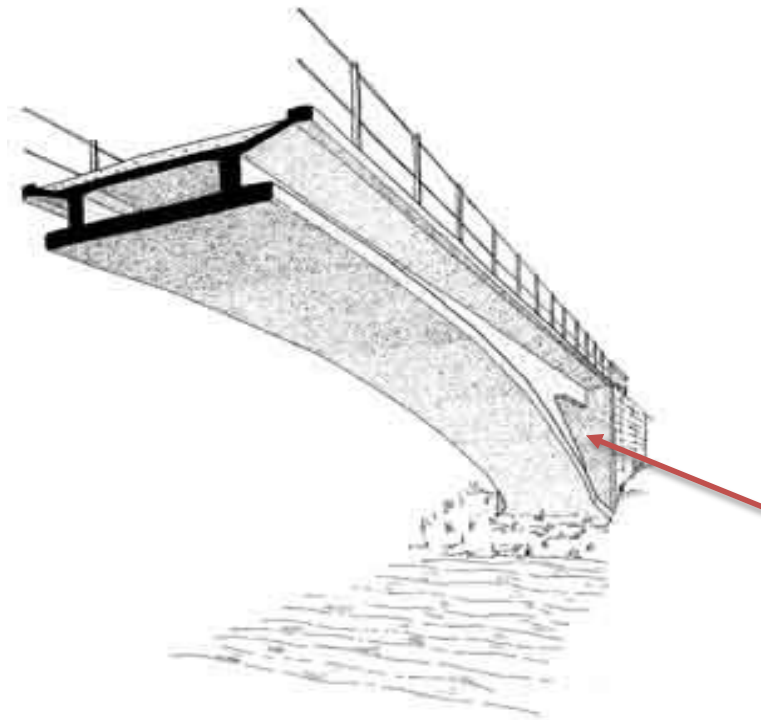
A seguir apresenta-se uma demonstração das fissurações e sua localização na parede longitudinal da ponte Zuoz (figura 43 a e b) e a solução em Tavanasa (figura 44) com a retirada de parte do arco onde foram ocasionadas as patologias:

Figura 43 a) e b) -Representação das trincas no lado esquerdo (a) e indicação da parede onde ocorreram fendas na ponte Zuoz.



Fonte: <http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html>-acesso em: 11/04/2016

Figura 44- Representação da ponte Tavanasa e as soluções propostas por Maillart. Detalhe para a abertura triangular na parede longitudinal do arco.



Fonte: <http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html>-acesso em: 11/04/2016

5 ESTUDO DE CASO

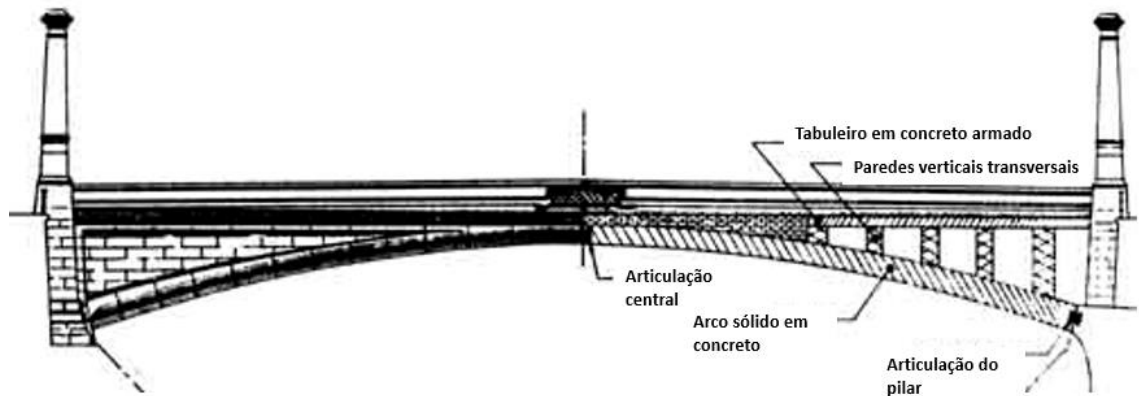
Foram avaliadas neste estudo de caso as tensões no arco das pontes Zuoz (1901) e Tavanasa (1905) a partir de modelos numéricos simplificado das estruturas desenvolvidas no AutoCad e importados para o programa Ansys APDL.

5.1 Descrição das pontes

A ponte Zuoz, sobre o rio Inn na Suíça é uma das grandes obras de Robert Maillart, finalizada no ano de 1901. Tem como inovação a utilização de vigas caixa arqueadas e a utilização das articulações no arco. A inspiração desta nova forma veio da ponte Stauffacher, em Zurique, assinada e desenhada dois anos antes de Zuoz, com um pesado arco curvo, que escondia por meio de fachadas de alvenaria as paredes transversais as quais levavam as cargas recebidas do tabuleiro diretamente para o arco sólido de concreto, sem reforço, e este por sua vez transmitia as cargas para os pilares. Em Zuoz, Maillart retirou a pesada fachada de alvenaria substituindo-a por paredes arqueadas de concreto armado, retirou também as paredes transversais, propondo um diferente modelo estrutural e preocupando-se desta vez em integrar a estrutura a estética da ponte, o resultado foi um modelo mais eficiente e econômico.

Maillart propôs para Zuoz a união das paredes laterais com a laje do tabuleiro e a laje do arco, formando vigas caixa arqueadas. A idéia de Maillart com a fusão dos elementos era de que todos eles trabalhassem juntos e desta forma além de suportar o próprio peso poderiam reduzir tensões nos outros elementos.

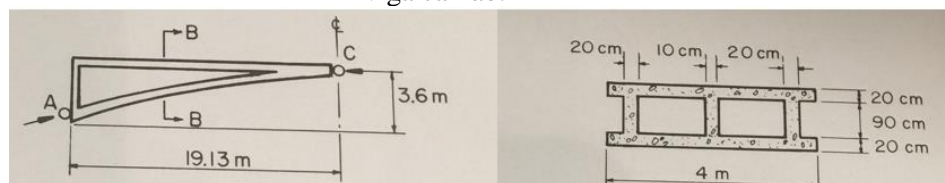
Figura 45-Ponte Stauffacher- representação da fachada em alvenaria, arco de concreto, articulações, paredes transversais e tabuleiro



Fonte –Billington, 1979- Com adaptações

BILLINGTON (1983) conclui que na época não haviam ainda cálculos suficientes para justificar a estabilidade da nova ponte, por este modelo representar algo além do seu tempo. A ideia de Maillart em buscar uma estrutura mais leve e com menos tensões internas resultou, no surgimento de tensões concentradas na região dos caixões, levando a uma análise de cálculos de tamanha complexidade que não havia recursos na época que pudessem justificar matematicamente o modelo da ponte. Os céticos por sua vez aumentavam sua insegurança na aprovação do novo design.

Figura 46 a) e b)- Representação simplificada da região do arco (a) seção transversal simplificada da viga caixão.



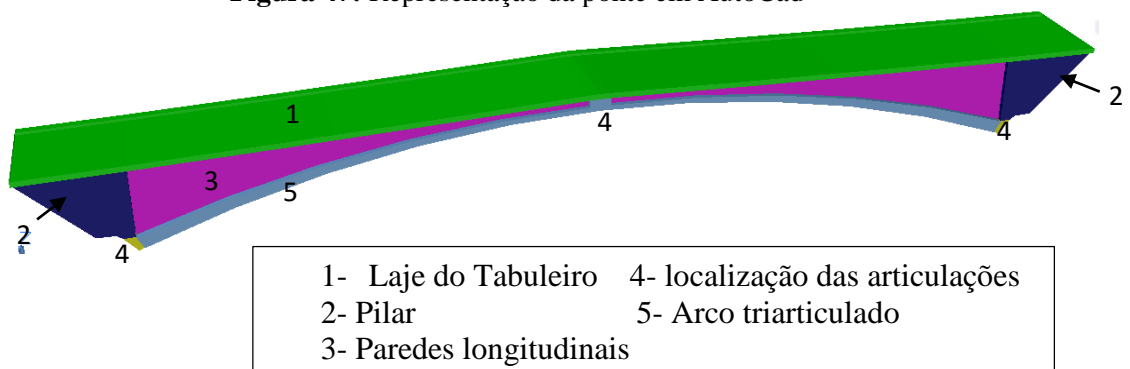
Fonte - Billington, 1979

Wilhelm Ritter, professor de Maillart e líder mundial de análise em pontes em arco, apoiou o projeto de Zuoz pela eficiência do modelo em integrar o design à estrutura e resultar em maior economia. Ritter diante da dificuldade em apresentar os cálculos que pudessem convencer aos desacreditados a respeito da estabilidade da ponte, propôs um teste de cargas em

larga escala para serem aplicadas à ponte. O teste consistiu em 3 etapas: a primeira foi da carga permanente, reduzindo os escoramentos da ponte e verificando a capacidade da ponte de suportar o próprio peso; a segunda avaliou as cargas variáveis de tráfego a partir de camadas de cascalho espalhadas sobre a pista da ponte; e a terceira sob a carga de caminhões. O teste resultou em pequenos movimentos e pequenas fissuras no meio do vão da ponte não prejudiciais a integridade da mesma. Conforme SMITH(1976) as informações dos cálculos previstos para a ponte original não estão disponíveis, desta forma o estudo é feito por meio de dados obtidos no estudo feito por SMITH (1976), e BILLINGTON (1979).

A proposta de Robert Maillart foi uma estrutura de concreto armado com arco triarticulado, com articulações no meio do vão e nas extremidades do arco junto aos pilares de pedra, paredes longitudinais acompanhando o desenvolvimento do arco, tabuleiro com leve arqueamento e corrimão de ferro no tabuleiro. O conjunto do arco, paredes longitudinais e tabuleiro formam a viga caixão.

Figura 47: Representação da ponte em AutoCad

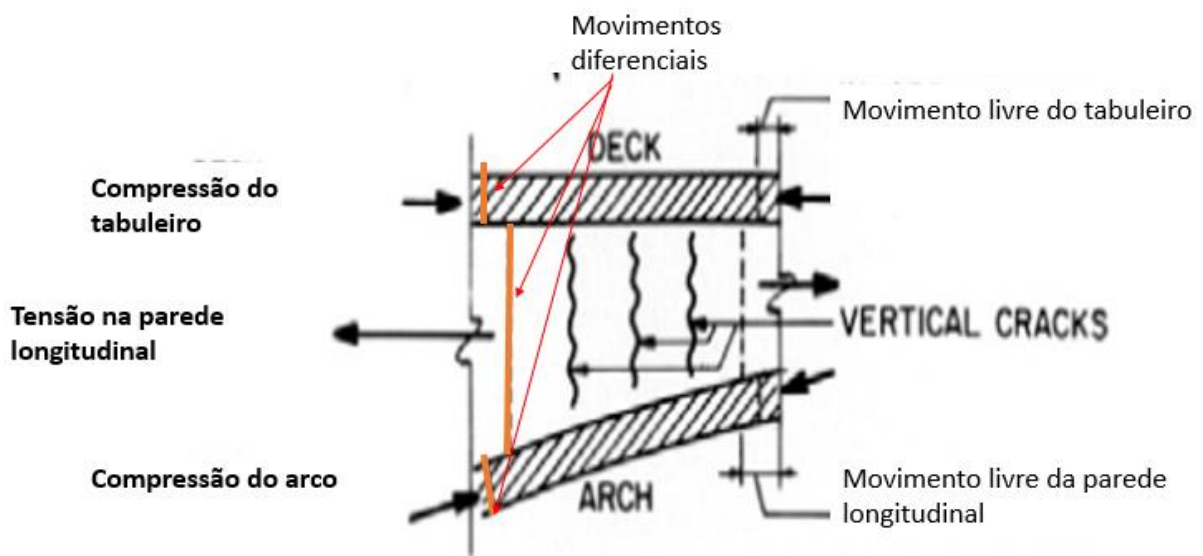


Dois anos após a construção da ponte Zuoz, ocorreram fissurações na região das paredes longitudinais, três na região do lado esquerdo próxima aos pilares e uma maior na região do lado direito também próxima aos pilares, e fissuras horizontais nas duas regiões, todas as trincas encontravam-se apenas de um lado da ponte onde a incidência do sol era constante.

BILLINGTON (1979) diz que Maillart mostrou mais tarde em seu novo projeto da ponte em arco Billwil (1904) através de cálculos mais elaborados, que as partes onde haviam fendas em Zuoz não eram muito solicitadas pelas cargas permanentes nem variáveis. Concluiu portanto, que as trincas eram provenientes de contrações e expansões ocasionadas pelo efeito do sol, um carregamento horizontal longitudinal na ponte.

As fendas foram geradas devido ao movimento diferencial das paredes longitudinal que se comprimiam mais devido à exposição ao calor, do tabuleiro e do arco, que comprimiam em menor intensidade devido a presença de umidade ser maior nestas regiões. O efeito diferencial no concreto gerou tensões maiores na região, o que gerou as fissurações, a quais não prejudicavam a estabilidade da estrutura.

Figura 48-Representação da região fissurada pelos movimentos diferenciais entre o tabuleiro, paredes longitudinais e arco



Fonte: BILLINGTON,2007 (com adaptações)

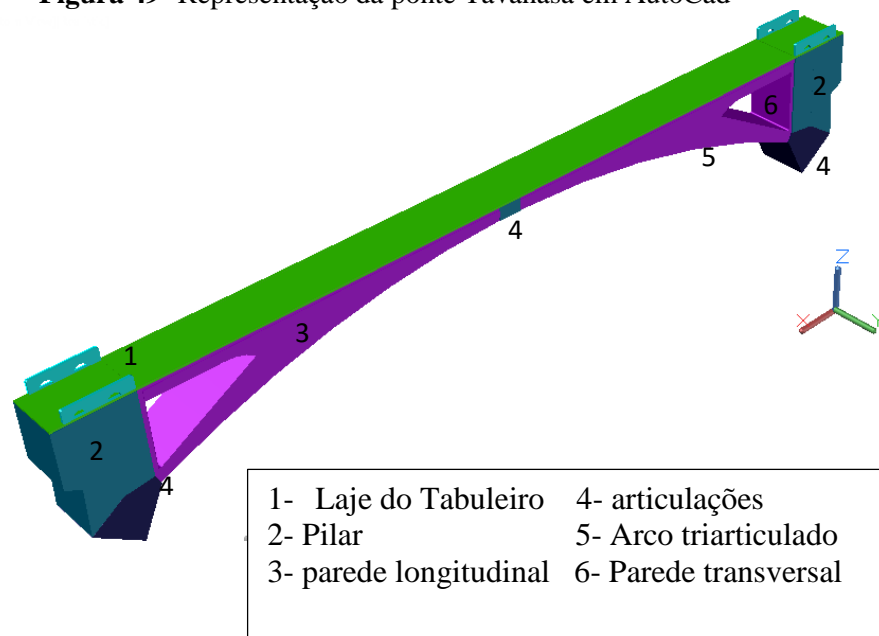
Tendo a experiência vivida em Zuoz, Maillart propôs outro projeto inovando as técnicas usadas em Zuoz, o projeto da ponte Tavanasa.

A ponte Tavanasa foi inaugurada, sobre o rio Reno, Suíça, no ano de 1905 em concreto armado considerada de maior vão da suíça e terceira do mundo, diferente da ponte Zuoz, Maillart retirou a parte da ponte onde surgiram trincas em Zuoz, a partir de uma abertura triangular nas paredes longitudinais e a redução dos dois caixões de Zuoz para apenas um, o

que minimizou as cargas permanentes e otimizou a estrutura da ponte. O resultado foi maior eficiência estrutural e economia, além de aperfeiçoar a técnica do arco triarticulado, na qual o arco poderia movimentar-se livremente sem a ocorrência de esforços internos. (BILLINGTON, 1983)

BILLINGTON (1979) mostra que a estrutura de Tavanasa, diferente de Zuoz não tem seu peso apoiado diretamente nos pilares, mas sim em paredes finas transversais que transferem parte da carga vinda do tabuleiro e da parede longitudinal diretamente para as articulações no final do arco.

Figura 49- Representação da ponte Tavanasa em AutoCad



Para provar seus cálculos ele utilizou de polígono funicular, que do latim significa corda, quando submetida a esforços sofre forças de tração, porém quando é invertida sofre efeitos de compressão. Desta forma Tavanasa foi sua primeira obra prima. Ele conseguiu apresentar uma nova forma estética, pouco conhecida na época, conseguiu aumentar o poder de eficiência estrutural e diminuir os custos da obra, de manutenção e desperdício de materiais.

Em 1927 a ponte foi derrubada por uma grande avalanche, porém após a realização de uma análise dos escombros, mostrou-se que os materiais utilizados na ponte encontravam-se em ótimo estado de conservação, o que tira a hipótese de que a ponte tenha arruinado por questões estruturais ou de más condições de seus materiais.

Figura 50- Ponte Tavanassa em ruínas após avalanche de pedras



Fonte -<http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html#4>. –acesso em:29/05/2016

5.1.1 Dados das pontes:

Poucas informações sobre as pontes estão disponíveis, pelo fato de serem muito antigas. Devido a isso o presente trabalho se baseou em referências bibliográficas disponíveis que apresentaram dados de maior confiança. Portanto para a coleta de dados utilizou-se de informações nos estudos de Billington (1979), Smith (1976) e Bill (1979). A seguir explicitam-se os dados:

Zuoz (1901):**Figura 51-** Ponte Zuoz sobre o rio Inn

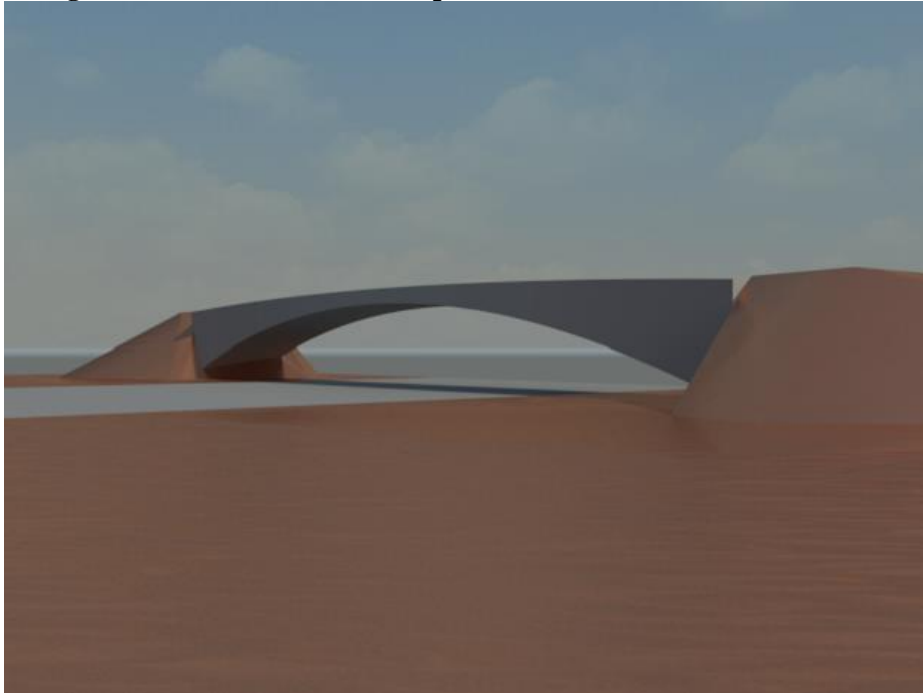
Fonte: Billington,1979

A ponte apresenta de acordo com dados obtidos em BILLINGTON (1979), SMITH(1976) e Bill (1969):

- Extensão total do tabuleiro: 47,68 m (Billington,1979), 40 m (Bill,1969 e Smith,1976)
- Extensão do vão da ponte: 38,25 m (Billington,1970), 30 m (Bill,1969 e Smith,1976)
- Altura da base dos pilares ao tabuleiro: 3,6 m (Billington,1979, Bill,1969 e Smith,1976)
- Largura do tabuleiro: 4 m (Billington,1979, Bill,1969 e Smith,1976)
- Largura entre as paredes do arco: 3,50 m (Billington,1979)
- Espessura da laje tabuleiro de 0,20 m (Billington,1979)
- Espessura da laje arco: varia de 0,16 m no meio do vão a 0,50 m nas extremidades (Bill,1969 e Smith,1976)

Adotou-se para o modelo simplificado da ponte as dimensões de 38,25 m de extensão do vão; 3,5 m a distância entre as paredes longitudinais; 4 m de largura do tabuleiro; dimensão da laje do arco entre 0,16m e 0,50 m; laje de 0,20 cm de espessura e 3,60 m de altura.

Figura 52- Modelo de Zuoz simplificado renderizado em REVIT



Tavanasa (1905):

Figura 53- Ponte Tavanasa sobre o rio Reno



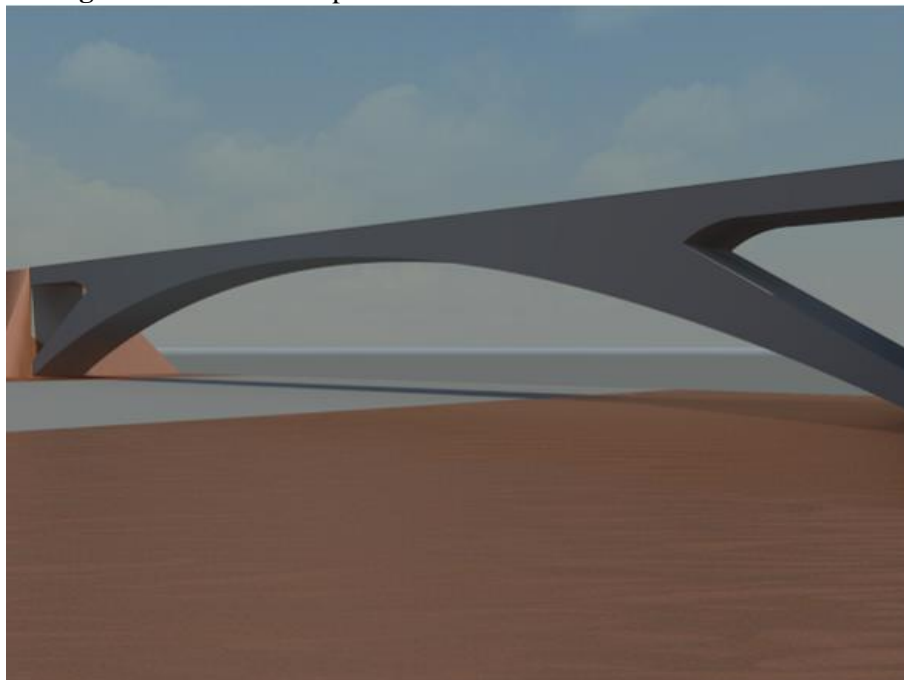
Fonte: Billington, 1979

Para os dados de Tavanasa não houve conflitos e desta forma foram fundamentados nas informações encontradas em Bill (1969) e BILLINGTON (1979), que apresentaram as mesmas dimensões para a ponte:

- Extensão total do tabuleiro: 61 m
- Extensão do vão da ponte: 51 m
- Altura da base da ponte ao tabuleiro: 5,50 m
- Largura do tabuleiro: 3,60 m (tabuleiro + barreira do corrimão); 3,20 (tabuleiro)
- Largura entre as paredes do arco: 3,40 m
- Espessura do tabuleiro de .12 m

Foi adotado para a modelagem simplificada da ponte as dimensões de 51 m de extensão do vão; 3,6 m a largura do tabuleiro; 3,4 m largura entre as paredes do arco; laje do tabuleiro 0,12 cm de espessura e 5,5 m de altura.

Figura 54- Modelo simplificado de Tavanasa renderizado em REVIT



5.2 Carregamentos aplicados

Visto que na época de construção das pontes não haviam normas de regulamentação para estruturas de pontes em concreto armado, as solicitações adotadas para os modelos foram baseadas nas normas NBR 7187/2003 de pontes de concreto armado, NBR 7188/1982 norma de carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas e na NBR 6118/2003 norma de estruturas de concreto. Estas normas são as que mais se assemelham com este estudo de caso, por se tratarem de pontes, de cargas móveis de trem tipo, semelhantes as utilizadas por BILLINGTON (1979), e por fim por se tratarem de estruturas de concreto. Em vista disto, os dados utilizados para os modelos foram obtidos no estudo de caso da ponte Zuoz de SMITH (1976) e no livro de BILLINGTON (1979). Os mesmos dados foram utilizados para a ponte Tavanasa devido à falta de dados da mesma.

As cargas utilizadas para os modelos foram cargas permanentes cujas intensidades podem ser consideradas como constantes ao longo da vida útil da construção.

Os tipos de cargas permanente consideradas pela norma NBR 7187/2003 são:

- Provenientes do peso próprio da estrutura;
- As cargas provenientes de pavimentação, trilhos, lastros, domentes, revestimentos, guarda-corpos, guarda-rodas, dispositivos de sinalização e barreira;
- Empuxos de terra e líquidos;
- As deformações provocadas por fluência e retração do concreto, por variação de temperatura e deslocamento dos apoios.

Além das cargas permanentes foram consideradas cargas variáveis que são ações de caráter transitório. As cargas variáveis apresentadas pelas norma NBR 7187/2003 são:

- Cargas móveis;
- Cargas de construção;
- Cargas de vento;
- Empuxo de terra provocado por cargas móveis;
- Pressão da água em movimento;
- Variações de temperatura;
- Efeito dinâmico provocado pelo movimento das águas.

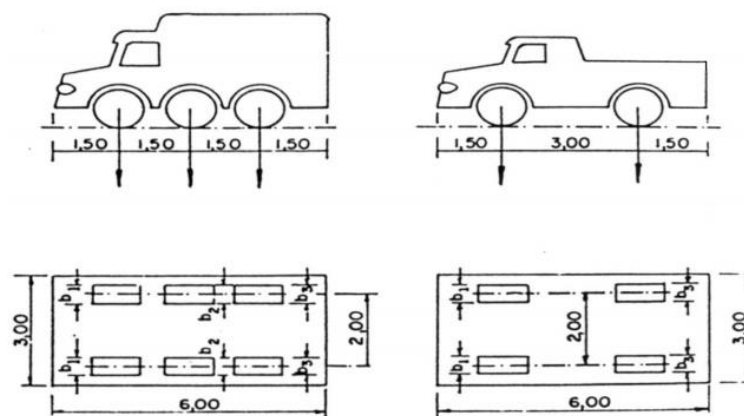
Para este estudo de caso foram adotadas apenas a carga permanente do peso próprio da estrutura, que de acordo com a norma 7187/2003 para ser avaliada considera-se o peso específico de no mínimo 25 KN/m³ para concreto armado, e como cargas variáveis foram utilizadas apenas as cargas móveis preconizadas na norma NBR 7188.

As cargas móveis rodoviárias consideradas na ponte foram baseadas na antiga norma NBR 7188/1982 devido a informações encontradas em BILLINGTON (1979), no qual relata que a ponte foi projetada para um Trem tipo de 12T. As cargas móveis são divididas em três classes classificadas de acordo com a NBR7188/1982:

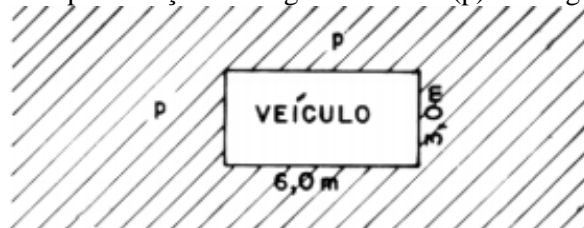
- Classe 45- equivalente a um Trem Tipo de 45 T ou 450 KN
- Classe 30- equivalente a um Trem Tipo de 30 T ou 300 KN
- Classe 30- equivalente a um Trem Tipo de 12 T ou 120 KN

Para o estudo de caso foi utilizada a carga de um veículo de 120 KN distribuída em 4 rodas de carga concentrada, com os 2 eixos de carga afastados 2 m entre si, resultando em uma área de ocupação de 18 m² e cercada de uma carga distribuída constante de 3 KN/m² referente ao elemento estrutural do tabuleiro. Valores esquematizados na figura a seguir:

Figura 55- Representação de carga móvel em ponte. Modelo 2 utilizado para este estudo de caso



Fonte - NBR 7188/1982

Figura 56 - Representação de carga distribuída (p) ao longo da ponte

Fonte - NBR 7188/1982

A seguir (Tabela 1) são apresentadas as propriedades dos materiais adotadas no modelo numérico:

Tabela 1- Propriedades dos materiais

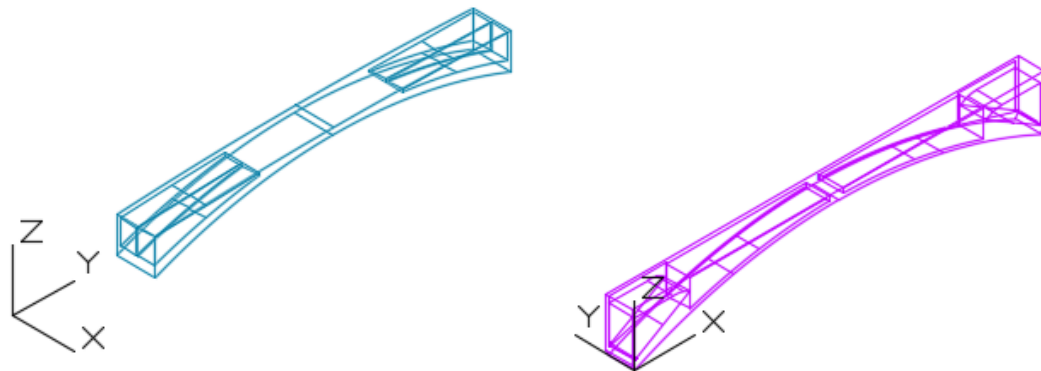
Módulo de elasticidade adotado:	$210410 \text{ kg/cm}^2 = 2,1\text{E} +007 \text{ KN/m}^2$ - SMITH (1976)
fck (força característica do concreto à compressão):	$E=5600 \cdot \sqrt{(fck)}= 14,1 \text{ Mpa}$ - 14.100 KN/m^2 - (NBR 6118/2003).
fctk (força característica do aço à tração)	$0,3 \cdot fck^{2/3} = 1,75 \text{ Mpa}$ = 1.750 KN/m^2 - (NBR 6118/2003).
v (Coeficiente de Poisson¹ do concreto):	0,2- (NBR 6118/2003)
Peso específico:	25 kN/m^3 - (NBR 7187/2003)

5.3- Modelo Numérico

Inicialmente a geometria das pontes foi importada do AutoCad (Figuras 57 a) e b)) para em seguida definir o tipo de elemento, malha, carregamento e condições de contorno.

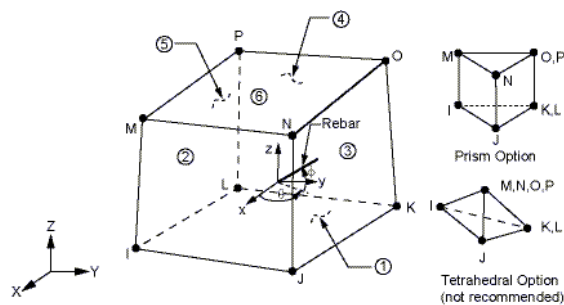
¹ Razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal

Figura 57 a) modelagem Ponte Zuoz e b) Modelagem ponte tavanasa



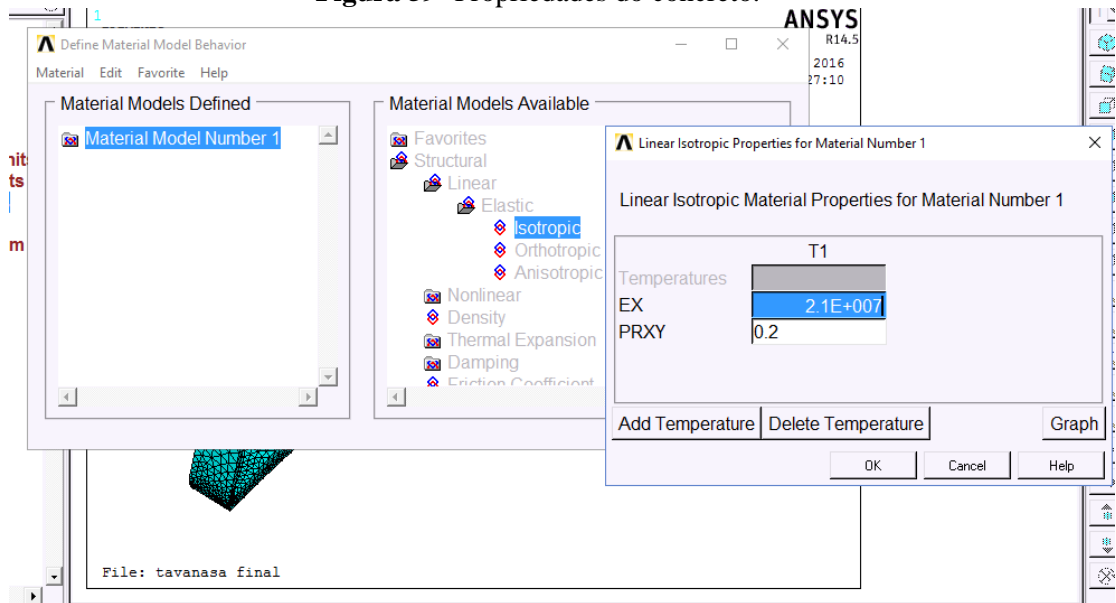
O modelo numérico limitou-se a uma análise linear elástica para as duas pontes utilizando o elemento SOLID65(3-D Reinforced Concrete Solid) que está ilustrado na Figura 57 e é usado para modelagem 3-D de estruturas de concreto, com ou sem barras de reforço. É um elemento que possui oito nós e três graus de liberdade por nó: translação nas direções x,y,z.

Figura 58-Elemento SOLID65.



A Figura 59 apresenta a inserção de algumas das propriedades do concreto já definidas anteriormente.

Figura 59- Propriedades do concreto.



A malha utilizada foi a tetraédrica, sendo que na ponte Zuoz foram obtidos 258.912 elementos e 65.902 nós e na ponte Tavanasa 26.288 elementos e 7.315 nós.

Figura 60 detalhe malha ponte Zuoz

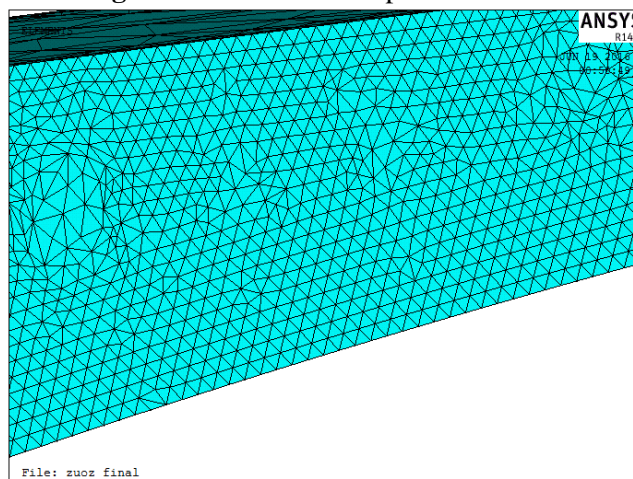
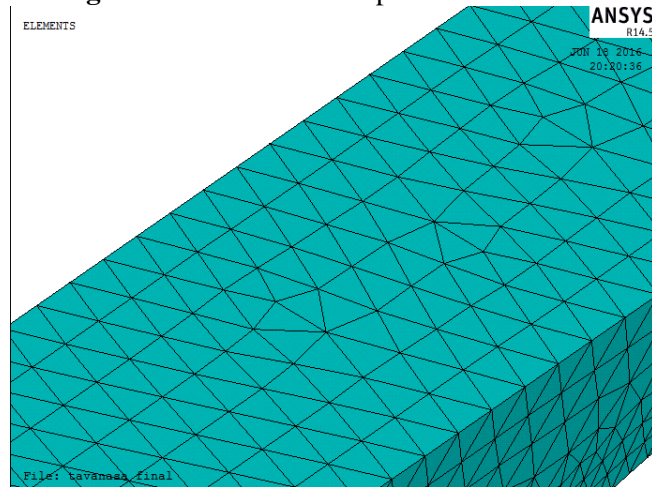


Figura 61- Detalhe malha ponte Tavanasa



Após a definição da malha, aplicou-se as condições de contorno nos modelos, nas quais os graus de liberdade nas duas áreas das extremidades da ponte foram restringidos. Aplicadas as condições de contorno aplicou-se a carga de um trem tipo de 120 KN, que equivale à 4 cargas móveis pontuais representando a força de cada roda do veículo tipo e a carga distribuída de 3 kN/m² ao longo de todo o tabuleiro.

Em relação à posição do trem tipo, o mesmo foi posicionado próximo à região do apoio visando simular a condição mais desfavorável nesta região, onde surgiram as trincas em Zuoz.

Figura 62 a) e b)- Aplicação de condição de contorno nas áreas destacadas em azul escuro e detalhe com condição de contorno aplicada

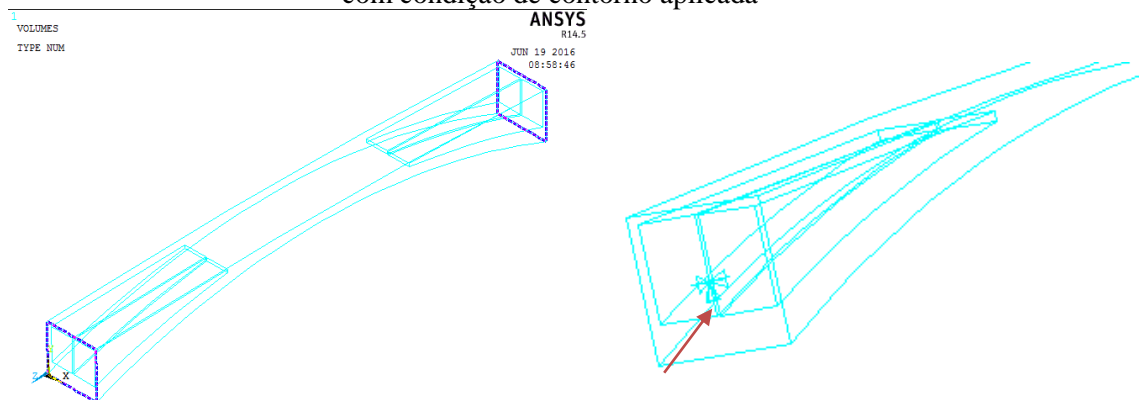


Figura 63- Aplicação de cargas pontuais equivalente ao trem tipo de 120 KN nos nós do tabuleiro.

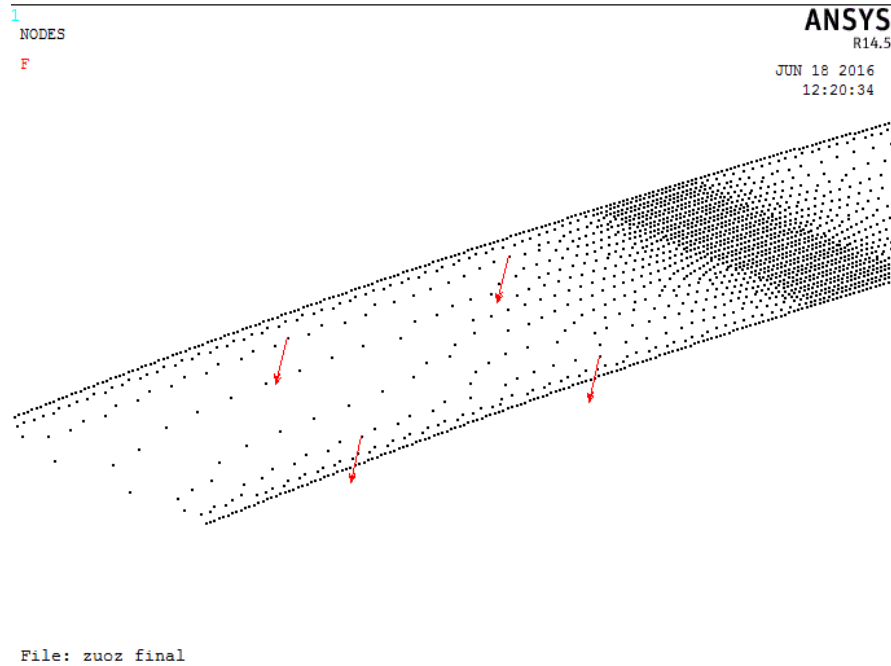
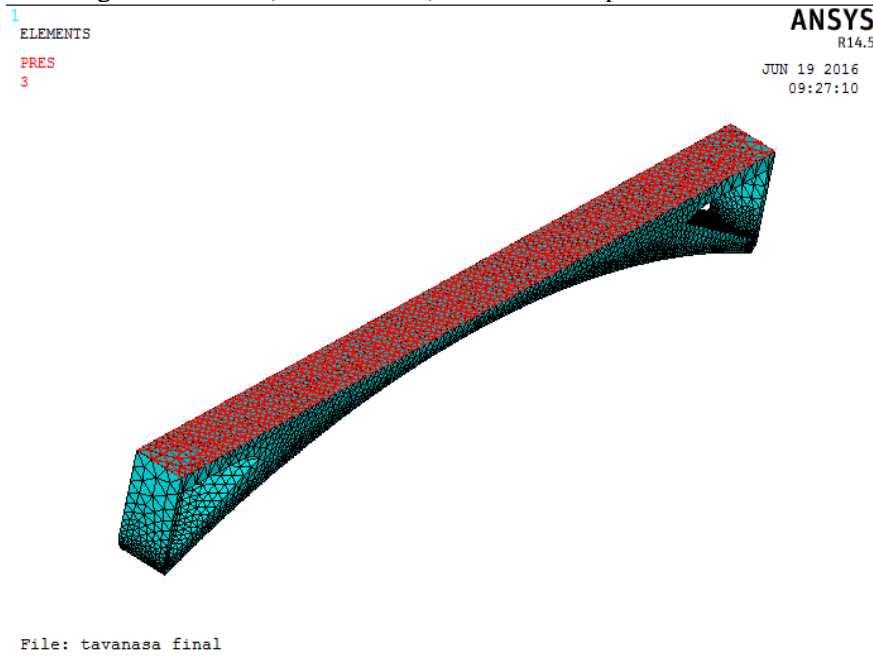


Figura 64- Carga distribuída (em vermelho) de 3 KN/m² aplicada sobre toda a superfície.



5.4- Análise dos resultados

O modelo da ponte Zuoz apresentou como resultado um deslocamento máximo de 1,167mm e tensões máximas de solicitação à compressão o valor de 464,491 KN/m² e à tração o 538,024 KN/m². A ponte Tavanasa por sua vez apresentou deslocamento máximo de 1,49 mm e tensões solicitação à compressão de 698,458 KN/m² e à tração de 303,689 KN/m².

Tabela 2- deslocamentos máximos e máximas tensões.

Modelos	Δ máximo (mm)	σ_c máxima (KN/m ²)	σ_t máxima (KN/m ²)
Zuoz	1,167	464,491	538,024
Tavanasa	1,486	698,458	303,689

Figura 65- Representação do modelo de Zuoz deformado e a distribuição de tensões

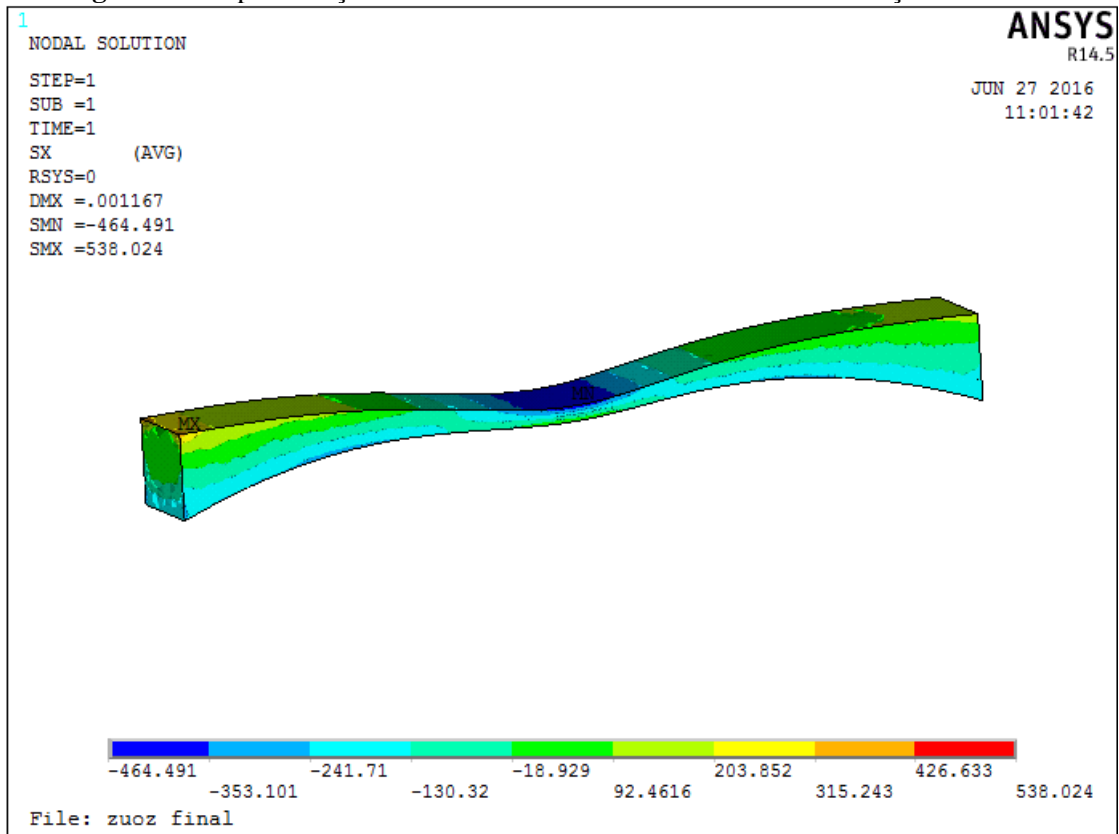
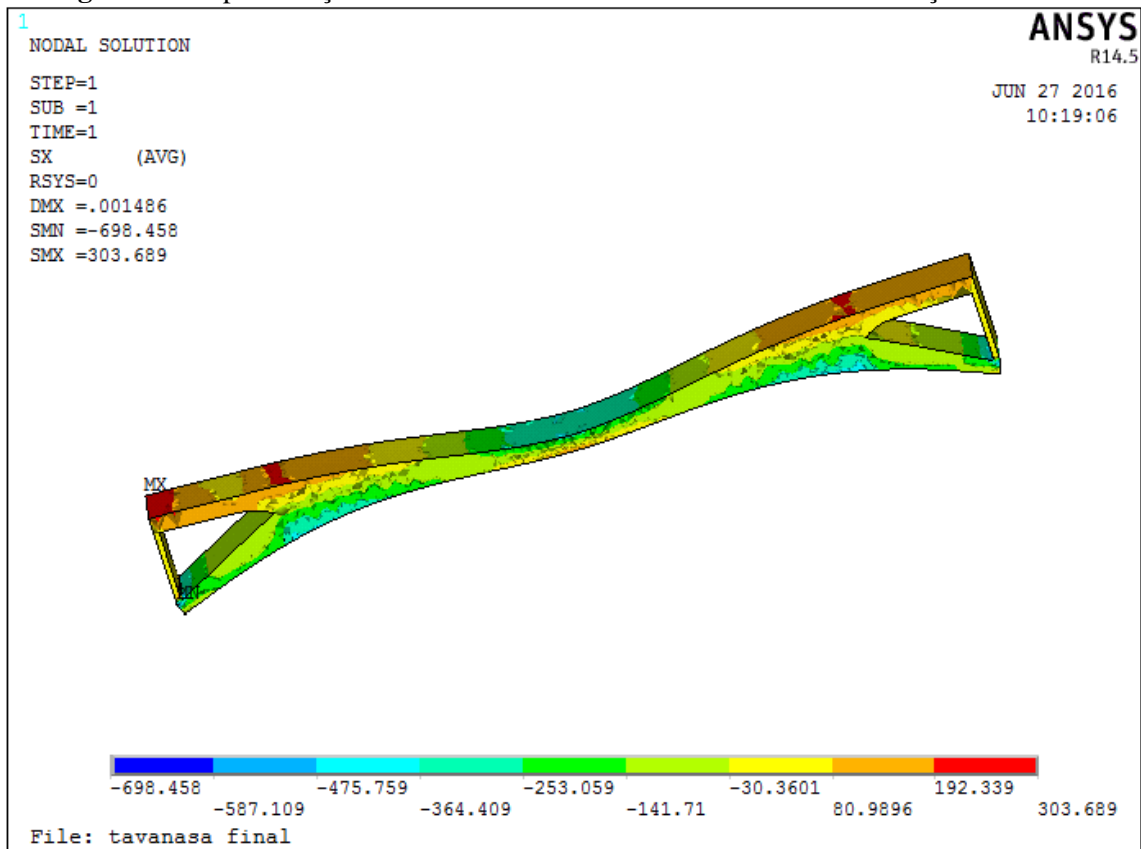


Figura 66 -Representação do modelo de Tavanasa deformado e a distribuição de tensões



Verificados os dados, estes foram comparados à resistência calculada do concreto à compressão (f_{ck}) de 14.100 KN/m^2 e à tração (f_{ctk}) que equivale à 1.750 KN/m^2 . Para a ponte Zuoz observou-se que os valores de sollicitação de compressão ($464,491 \text{ KN/m}^2$) eram menores que os valores obtidos da resistência do concreto à compressão, assim como os valores de sollicitação de tração ($538,024 \text{ KN/m}^2$) eram menores que a resistência à tração do concreto.

Figura 67 - Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas as cargas pontuais

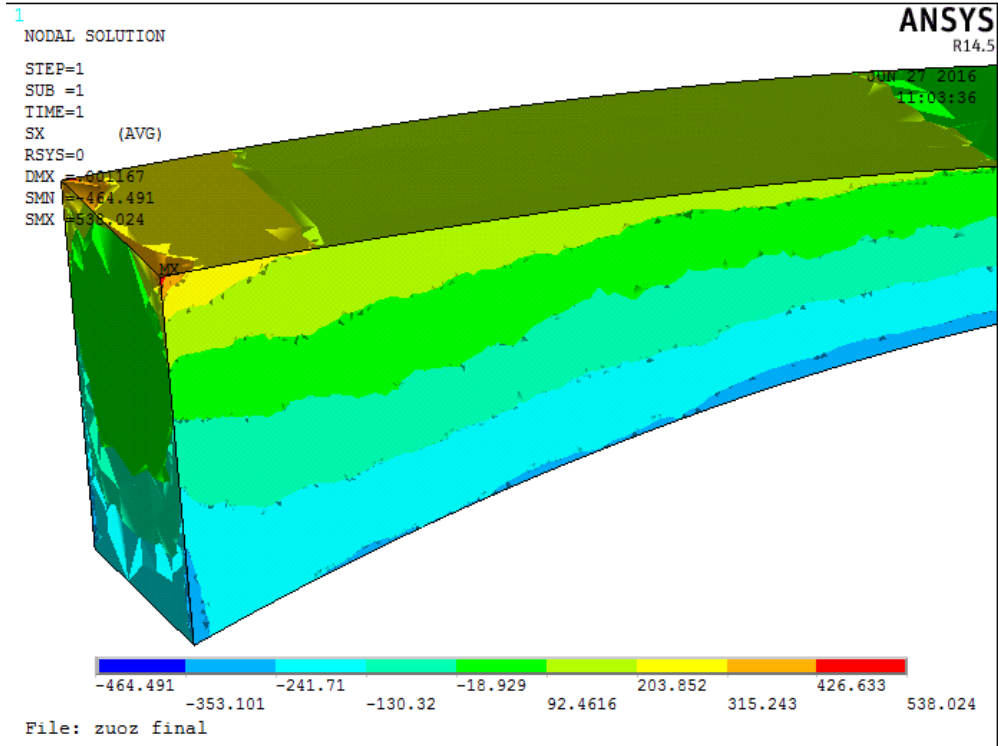
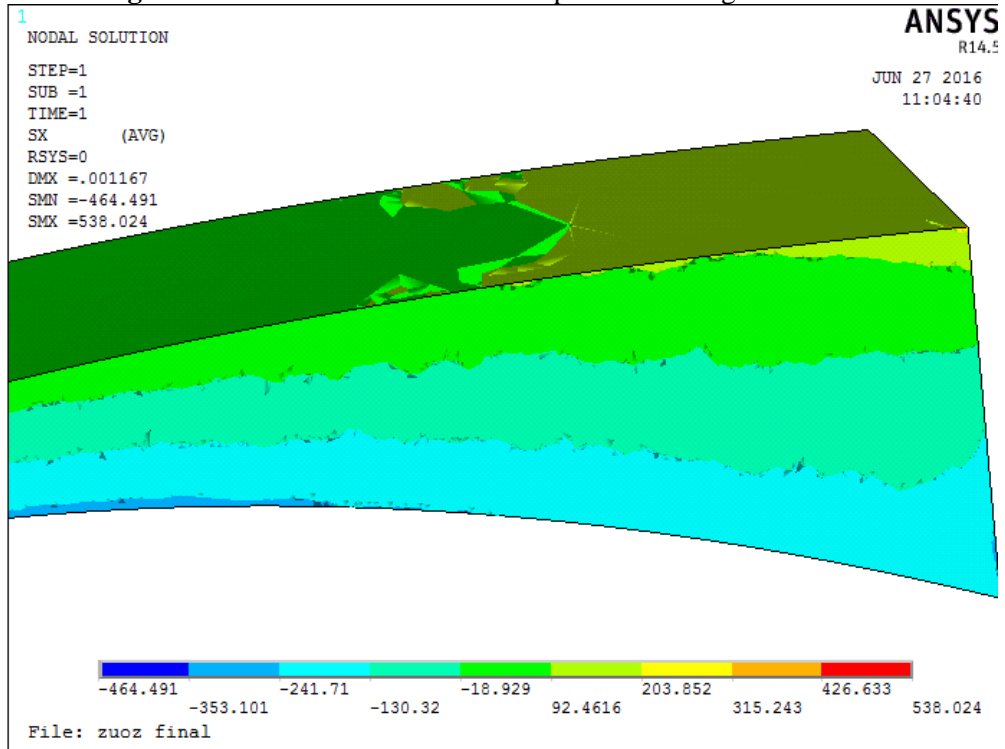


Figura 68- Detalhamento de tensões apenas com cargas distribuídas



Após feita a simulação no modelo intacto foi realizada a simulação no modelo com danos, esses foram gerados a partir da eliminação de alguns elementos da malha. Inicialmente seriam simuladas trincas na região do apoio, mas para isso deveria ser feito um modelo com uma malha bastante refinada e, por conseguinte, seria necessário um elevado esforço computacional. Dessa forma, simulou-se o deslocamento do concreto usando a malha já definida anteriormente.

Figura 69 a) e b)- elementos deletados da malha deslocamento do concreto nos lados esquerdo e direito

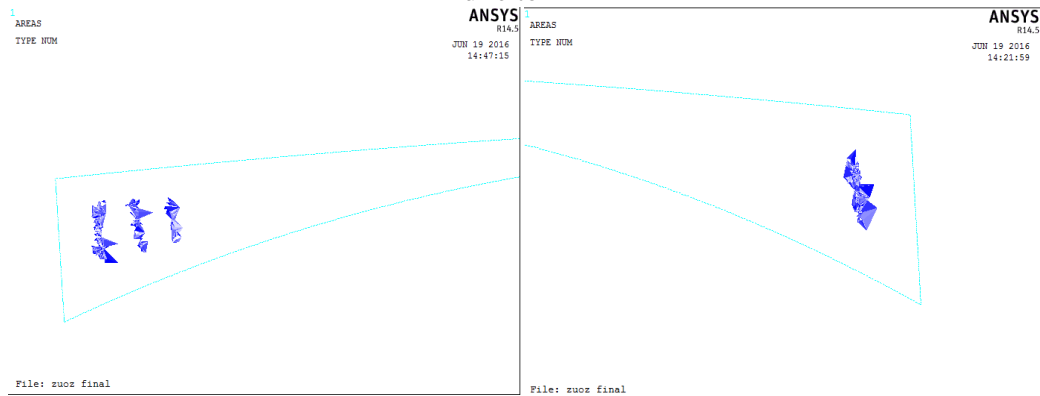
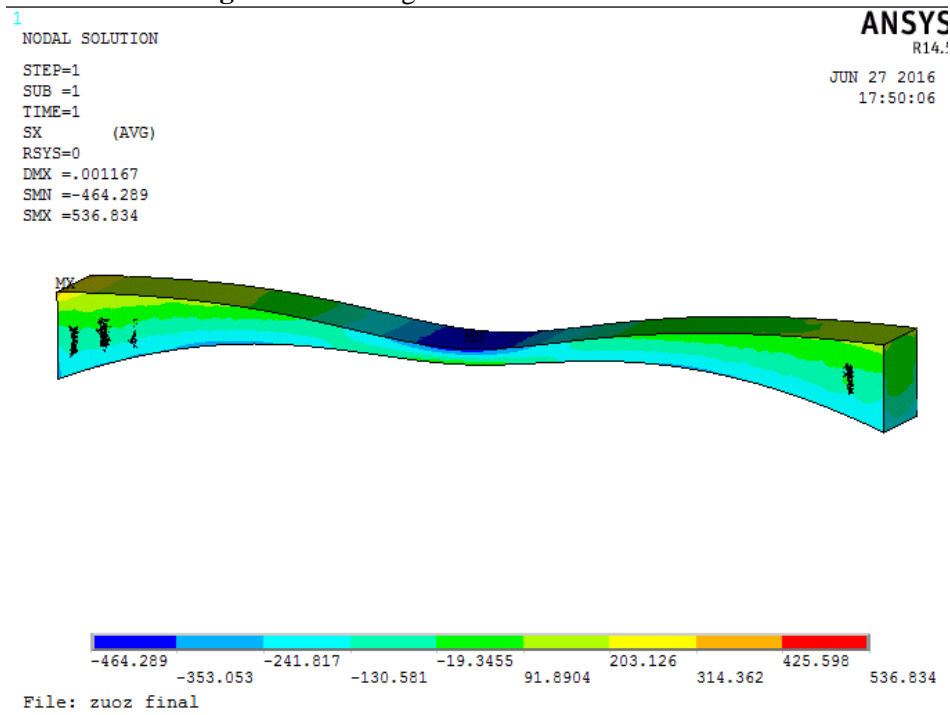


Figura 70- Vista geral de modelo com dano



A simulação da estrutura de Zuoz intacta e com danos superiores à fissuração apresentada na ponte Zuoz nos leva a concluir que as trincas não foram causadas por tensões elevadas na ponte Zuoz e podem ter sido causadas devido a efeitos térmicos, assim como afirmou Maillart em sua verificação.

Para Tavanasa o resultado das tensões foi favorável assim como em Zuoz as solicitação de tração ($303,689 \text{ KN/m}^2$) e compressão ($698,458 \text{ KN/m}^2$) eram menores que as resistências do concreto ($f_{ck} - 14.100 \text{ KN/m}^2$ e $f_{ctk} - 1.750 \text{ KN/m}^2$). O modelo de Tavanasa ainda apresentou maior eficiência em relação ao modelo de Zuoz nas tensões de tração, as quais foram reduzidas em $234,34 \text{ KN/m}^2$, cerca de $43,5\%$, o que favorece a estrutura por se tratar de um arco que trabalha melhor os efeitos de compressão.

Figura 71- Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas as cargas pontuais

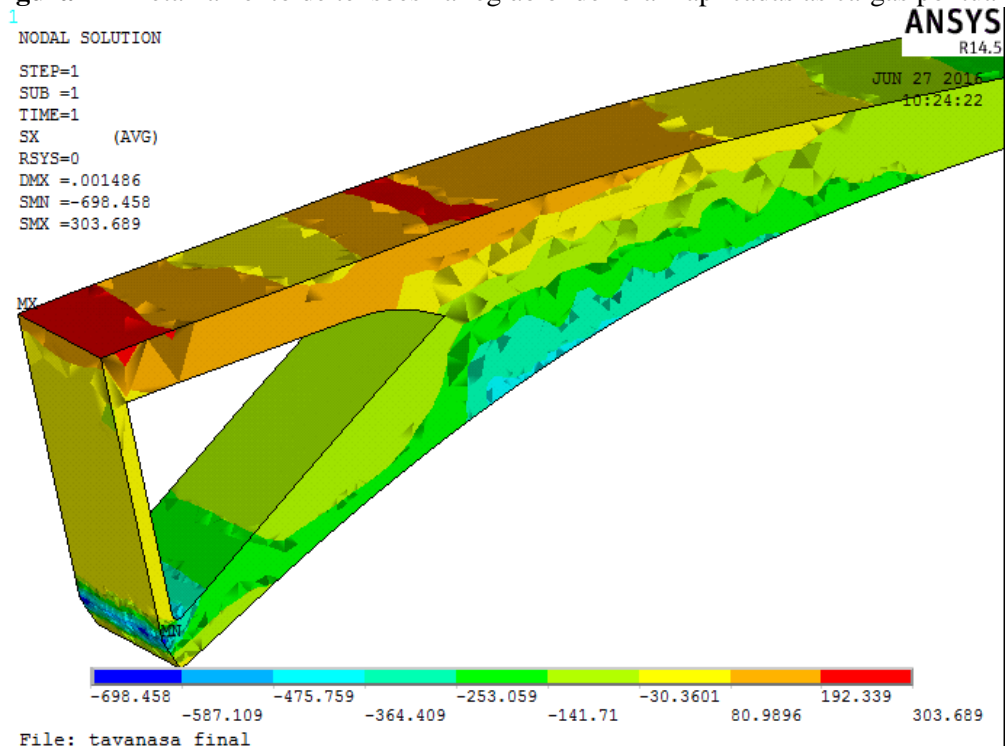
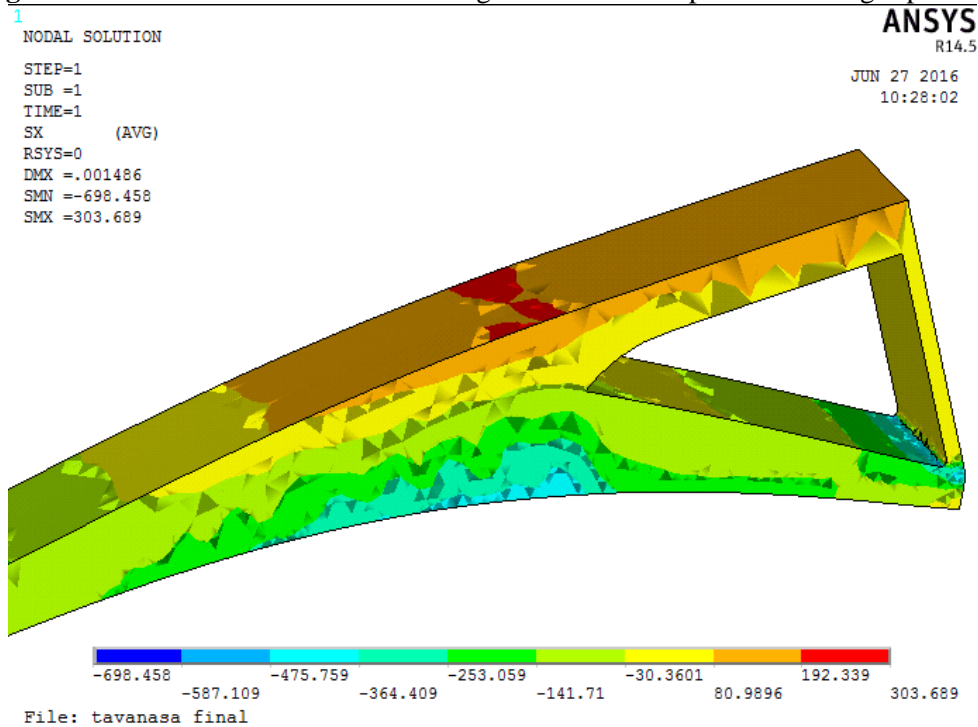


Figura 72- Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas as cargas pontuais



Não foram obtidos dados suficientes para justificar a retirada de parte da parede longitudinal, visto que não foram realizadas análises térmicas, porém percebe-se que as tensões (em Zuoz) na região onde houve a redução da estrutura (em Tavanasa) são menores em relação à tensão total obtida. Além disso, como o modelo de Tavanasa apresentou resultados favoráveis quanto à tensões de tração aplicadas mesmo após a retirada de parte da parede, percebe-se que a nova ponte possuía um modelo estruturalmente mais eficiente.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu fazer reflexões sobre o quanto a estrutura e a forma podem ter influência em um novo projeto. O que leva a refletir a atual realidade dos profissionais de arquitetura e engenharia que diante dos pequenos prazos para entrega de projetos faz com que não exista a troca de informação entre os profissionais que acabam limitando seus projetos individualmente a cada área, ou seja, resultando em projetos ineficientes e antieconômicos onde o design e a estrutura não se complementam. Vale ressaltar que os principais conceitos da Arte Estrutural, de eficiência estrutural, estética e economia propostos por Billington devem ser conceitos essenciais ao longo de toda a carreira destes profissionais de arquitetura e engenharia levando-os a modelos estruturais o quais a beleza do projeto encontra-se na integração da estética com a estrutura, o que resulta na economia dos recursos tão almejada.

Maillart foi um grande exemplo de engenheiro que se preocupava em integrar a estética com os elementos estruturais. Embora a época fosse desfavorável à inovação de seus modelos, Maillart sempre buscava inovar em seus novos projetos e superar os modelos anteriores.

A simulação de modelos simplificados das pontes de Maillart apresentaram eficiência estrutural em seus resultados o que leva a concluir que as trincas em Zuoz não foram consequências de tensões excessivas nas paredes longitudinais. E pode-se supor, pela eficiência obtida nos resultados do modelo de Tavanasa, que a retirada de parte das paredes longitudinais foi mais uma ideia inovadora de Maillart que torna sua estrutura um modelo de estética, eficiência estrutural e economia de recursos.

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Fazer estudo térmico nas pontes de forma a verificar o efeito térmico diretamente na estrutura;
- Fazer a simulação de trincas em uma malha mais refinada.

BIBLIOGRAFIA

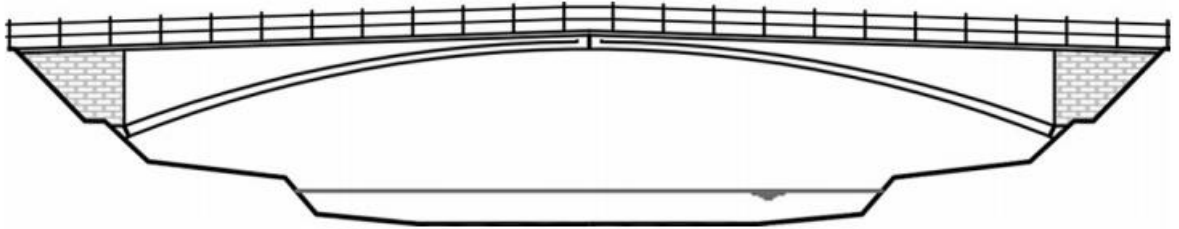
- ALMEIDA, SÉRGIO MARQUES FERREIRA DE, SOARES, PAULO SÉRGIO, **Superestruturas de Pontes Rodoviárias**, 1ª ed. Niterói, EDUFF, 1986.
- ARSENIC, NIKOLA; LONGO ORLANDO CELSO; BORGES, MARCOS MARTINS. **O ensino e a aprendizagem da disciplina Projeto no curso de Arquitetura e Urbanismo**. Juiz de Fora. CES revista. v.25, p. 49-64. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: **Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres**. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: **Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido -Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto armado-Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.
- BILL, Max. **Robert Maillart bridges**. 3. ed. Zurich: Ed D'Archit . 1969.
- BILLINGTON, DAVID P, *Robert Maillart's Bridges: The Art of Engineering*, Princeton University Press, 1978
- BILLINGTON, DAVID P. **The criative response to concrete cracking.in FRACTURE MECHANICS OF CRONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES**; 2; 973-980; International conference on fracture mechanics of concreteand concrete structures, by Francis, London, Taylor 2007.
- BILLINGTON, D. P. **The tower and the bridge: the new art of structural engineering**.Princeton, Universidade de Princeton, 1983.
- CASTRO JÚNIOR, FRANCISCO AFONSO DE. **Além de L sobre 10 : diretrizes para o lançamento estrutural arquitetônico** / Francisco Afonso de Castro Júnior. Brasília, 2014.
- CHARLESON, Andrew W. **Estrutura aparente: um elemento de composição em arquitetura** / Andrew W. Charleson ; tradução Alexandre Salvaterra – Porto Alegre: Bookman, 2009.
- FONSECA, ROGER PAMPONET DA. **A ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: Construção, forma e função estrutural**. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

- GLANCEY, JONATHAN. **A História da Arquitetura** / Jonathan Glancey ; tradução Luis Carlos Borges e Marcos Marcionilo – São Paulo : Edições Loyola, 2001.
- MARCHETTI, OSVALDEMAR. **Pontes de concreto armado**/ Osvaldemar Marchetti. São Paulo: Editora Blucher,2008.
- PINHO, FERNANDO OTTOBONI. **Pontes e viadutos em vigas mistas**/Fernando Ottononi Pinho, Ildony Hélio Bellei.- Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2007.
- REBELLO, YOPANAN CONRADO PEREIRA. **Engenheiros, arquitetos e um único objeto**: a edificação. Anotações de aula. Curso de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo da USJT, s.d.
- REBELLO, YOPANAN CONRADO PEREIRA 1949- **A concepção Estrutural e a Arquitetura**/ Yopanan Conrado Pereira Rebello.—São Paulo: Zigurate Editora, 2000.
- SÁLES, J J ; MALITE, Maximiliano ; GONÇALVES, Roberto Martins ; MUNAIAR NETO, J . **Sistemas Estruturais-Teoria e Exemplos**. 1. ed. São Carlos: Editora USP, 2005. 266 p.
- SÁNCHEZ, J. M. M.; FONSECA, R. P. ; SILVA, E. G. ; AZAMBUJA, E. B. C. ; ARAKAKI, S. R. . **Forma e Função Estrutural na Arquitetura de Brasília: Ponte, Palácios, Torre e Igrejinha**. In: I Encontro Nacional da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2010, Rio de Janeiro. Arquitetura, Cidade, paisagem e Território: Percursos e prospectiva. Rio de Janeiro: Prourb, 2010.
- SMITH, KENT FARNOW **A computadorized sutudy of Robert Maillart’s Zuoz Bridge**. The concrete arch bridge, 1893-1919: A catalog from na American Perspective. 1976. 167 f. (Senior Thesis). University of Pricetron, 1976.
- SOUZA, REMO MAGALHÃES DE. **O método do elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Belém, 2003. Universidade federal do Pará. Centro tecnológico. Departamento de Engenharia civil. Núcleo de instrumentação e computação aplicada à engenharia.
- STUCCHI, FERNANDO REBOUÇAS- **Pontes e grandes estruturas**. São Paulo 2006.Universidade de São Paulo. Departamento de estruturas e fundações.
- TORROJA, EDUARDO. **Razón y ser de los tipos estructurales**. Madri: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1960.

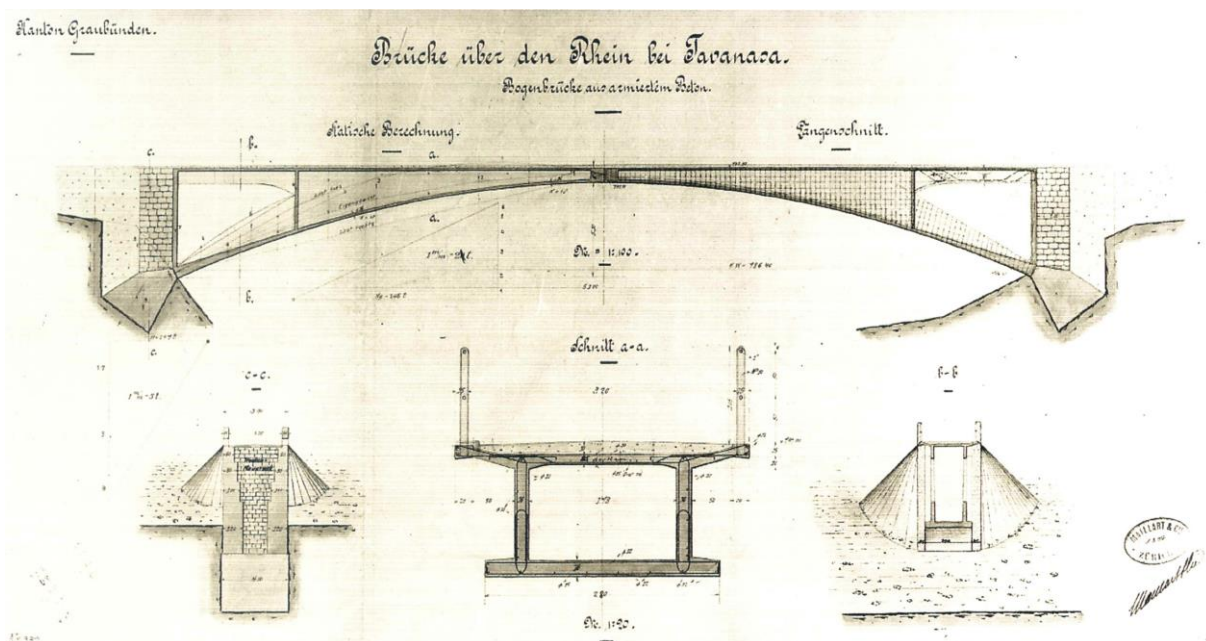
- D.ZASTAVNI, J-F. CAP 2009. **What ideas does Maillart's eighty-year-old approach give us about how a concrete structure could be designed in the 21th century?**- Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September – 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain.

ANEXOS

Anexo 1- Modelos utilizados para modelagem em AutoCad das ponte Zuoz e Tavanasa.



Fonte- D.ZASTAVNI, J-F. CAP 2009



Fonte-

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rheinbr%C3%BCcke_Tavanasa_Bauplan_01_11.jpg-
acesso em 10/04/2016