



ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ESTRUTURA E DESIGN DE DUAS PONTES DE ROBERT MAILLART UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

Patrícia Caroline Souza da Rocha Vieira

patriciavieira88@yahoo.com.br

Curso de Engenharia Civil – FACET – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – UniCEUB – Centro Universitário de Brasília. SEPN 707/907 Campus Asa Norte, Bloco 7, Brasília/DF. CEP 70790-075. www.uniceub.br

Marcos Henrique Ritter de Gregorio

marcos@ritter.arq.br

Curso de Engenharia Civil – FACET – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – UniCEUB – Centro Universitário de Brasília. SEPN 707/907 Campus Asa Norte, Bloco 7, Brasília/DF. CEP 70790-075. www.uniceub.br

Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva

salenoyure@hotmail.com

Curso de Engenharia Civil – FACET – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – UniCEUB – Centro Universitário de Brasília. SEPN 707/907 Campus Asa Norte, Bloco 7, Brasília/DF. CEP 70790-075. www.uniceub.br

Márcio Augusto Roma Buzar

buzar@unb.br

PPG-FAU, Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília/DF, CEP 70910-900.

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

leonardo@inojosa.com.br

PPG-FAU, Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília/DF, CEP 70910-900.

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: Análise Estrutural, Design, Arte Estrutural, Robert Maillart, Pontes, Zuoz, Tavanasa, MEF, Método dos elemento finitos, Ansys.

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial foi um período na história de grandes mudanças, marcado pelo desenvolvimento econômico e social, também pelo surgimento de construções mais complexas, como pontes, viadutos, ferrovias etc.

O novo contexto apresentado e as novas exigências inspiraram os engenheiros a criarem projetos de estruturas preocupando-se com a economia, a eficiência estrutural e a estética, ou seja os princípios enfatizados pela teoria da Arte Estrutural, cujo conceito será abordado adiante.

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 na ponte Tavanasa.

2 PRINCÍPIOS DA ARTE ESTRUTURAL

2.1 Definição dos Princípios

David P. Billington, engenheiro estrutural americano e professor da Universidade de Princeton, Nova Jérsei, expõe, em seu livro “*The Tower and The Bridge – The New Art of Structural Engineering*” (1983), o resultado de uma extensa pesquisa sobre o que ele define ser a “Arte Estrutural”. Esta teoria, sustentada por critérios bem definidos, sugere que, a partir do final do século XVIII, alguns engenheiros têm, conscientemente, praticado uma nova forma de arte, que é paralela e totalmente independente da arquitetura. Ele explica que, neste período, com a revolução industrial, com o surgimento do ferro estrutural, com o esforço desenvolvimentista e as condições sociais democráticas, criaram-se as condições para nascer esta nova modalidade de arte que, apesar de ser considerada moderna, não é possível enquadrá-la como mais um movimento da arte moderna. A Inglaterra reunia todas estas condições e foi o berço dos primeiros artistas estruturais. Thomas Telford, conhecido construtor de pontes, é o primeiro representando deste grupo. Suas pontes surgiram para resolver os problemas oriundos do transporte de produtos manufaturas pelas fábricas inglesas. Como o ferro era um material muito caro, Telford procurou usá-lo de forma racional e eficiente, gerando formas estruturais mais inteligentes. Este enfoque racionalista, acompanhado da preocupação estética, definiu os princípios da Arte Estrutural: eficiência, economia e elegância. O maior expoente desta modalidade de arte é o engenheiro suíço Robert Maillart (1872–1940).

2.2 As Três Dimensões da Estrutura

Billington, no desenvolver de sua hipótese, fraciona as estruturas em três dimensões. A **primeira dimensão** é a “científica”. Esta é a visão pragmática, de manter a estrutura estática. É a estrutura ser eficiente, usar o mínimo de materiais, resistir às cargas e durar muitos anos.

A **segunda dimensão** é a “social”. Essa visão está relacionada ao contexto político e econômico do local, sendo a estrutura colocada aqui, como um bem da sociedade. Sua medida está no custo-benefício da obra. A **terceira dimensão** é a “simbólica”. Acepções de aparência, elegância, poder expressivo e beleza são as mais relevantes nesta dimensão. O engenheiro estrutural com intenção de produzir arte estrutural deve saber equilibrar as três dimensões.

2.3 A Arte Estrutural e a Sociedade

As grandes estruturas, como pontes, grandes coberturas, estádios e torres, sempre tiveram papel especial nas mais diversas sociedades. A sociedade, por outro lado, também pode interferir na criação da Arte Estrutural. David Billington cita o exemplo dos concursos de projeto de pontes, ocorridos na Suíça no final do século XIX e início do século XX como catalisadores da Arte Estrutural. A Suíça é proeminente no desenvolvimento da Arte Estrutural por uma característica interessante de sua sociedade: o interesse pela economia e pelo resultado estético das obras. Neste cenário, o concurso (de engenharia ou arquitetura) é excelente para estimular um alto grau de eficiência e beleza das obras. Assim, a sociedade interfere na criação da Arte Estrutural por meio dos concursos públicos. Por último, pode-se abordar a interessante simbologia presente na arte estrutural com relação à era democrática. É visível, em obras como a Torre Eiffel e a ponte do Brooklyn, a inovação, a leveza, a transparência e o acesso total ao público.

As formas da Arte Estrutural elucidam a idéia de “democracia” e não de “autoritarismo”. Quando a estrutura e a forma são uma só, o resultado é a leveza, até mesmo a fragilidade. A estas características, se pode estabelecer um paralelo com as características da própria democracia.

2.4 Estruturas e Arquitetura

As abordagens sobre a relação estrutura x arquitetura, especialmente nas delimitações das tarefas de engenheiros e arquitetos, geralmente são acompanhadas de muita polêmica. Billington é muito enfático ao deixar de fora da Arquitetura, obras como torres, estádios e pontes. Ele afirma que obras como essas, são resultados diretos apenas dos esforços dos engenheiros estruturais. Além disso, ele argumenta que engenheiros estruturais trabalham com objetos de larga escala e uso único, com o objetivo de resistir às forças da natureza; arquitetos trabalham com objetos de menor escala (casas, escolas hospitais) e uso complexo, com o objetivo de manipular o espaço. Esta visão talvez não seja tão maniqueísta no caso do Brasil. Devido à diversas razões culturais e históricas, aqui, os campos de atuação de arquitetos e engenheiros se fundem com mais intensidade, geralmente de modo a perder campo os arquitetos. O reconhecimento do valor expressivo das estruturas é muito válido, principalmente para superar a limitada visão de que apenas arquitetos podem elevar construções ao status de obras de arte. Além disso, conhecer os princípios da Arte Estrutural e saber reconhecer obras desta magnitude pode auxiliar na análise de obras de arquitetura que seguem preceitos semelhantes aos especificados por Billington em seu livro. Deste modo as pontes analisadas neste artigo fruto do trabalho do engenheiro Robert Maillart são grandes monumentos de Arte estrutural.

3 BIOGRAFIA DO AUTOR

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 cogumelo.

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. Nos primórdios do século XX, ele é destaque por desenvolver estruturas de concreto armado com muita eficiência tanto estruturalmente quanto esteticamente.

Maillart é lembrado pelas estruturas e tecnologias inovadoras em concreto armado, utilizando as técnicas dos arcos triarticulados, das vigas em caixão arqueadas e das lajes em cogumelo. Muito conhecido pelas obras de pontes, sendo algumas de seu currículo as pontes Stauffacher, Zuoz, Billwil, Tavanasa e sua obra prima, que até os dias atuais impressiona, a ponte Salginatobel, na Suíça (1930).

4 ESTUDO DE CASO

4.1 A escolha

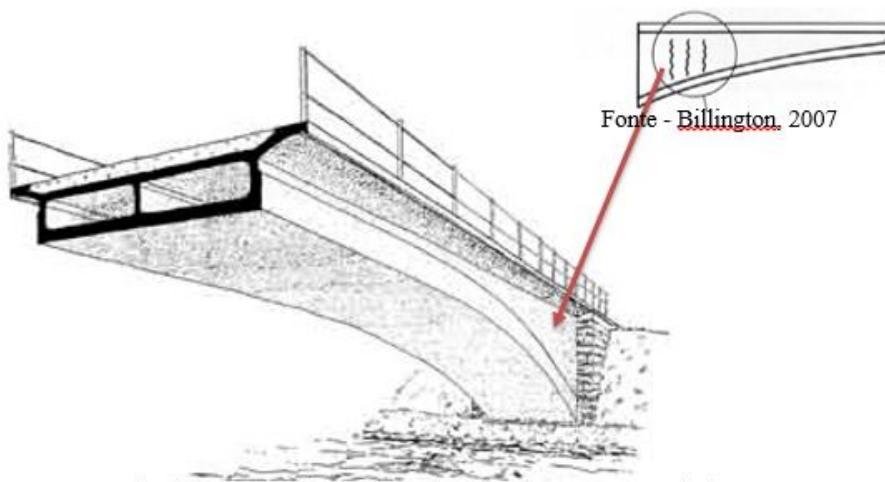
O referido estudo foi baseado nas pontes Zuoz e Tavanasa de Robert Maillart, que envolvem o tema Arte Estrutural.

A seleção das pontes foi motivada pelo surgimento de trincas na ponte Zuoz (figuras 1 a e b) e como solução às patologias, Maillart apresentou um novo projeto da ponte Tavanasa figura 1 c) com a proposta de retirada de porção da parede do arco onde houveram danos em Zuoz.

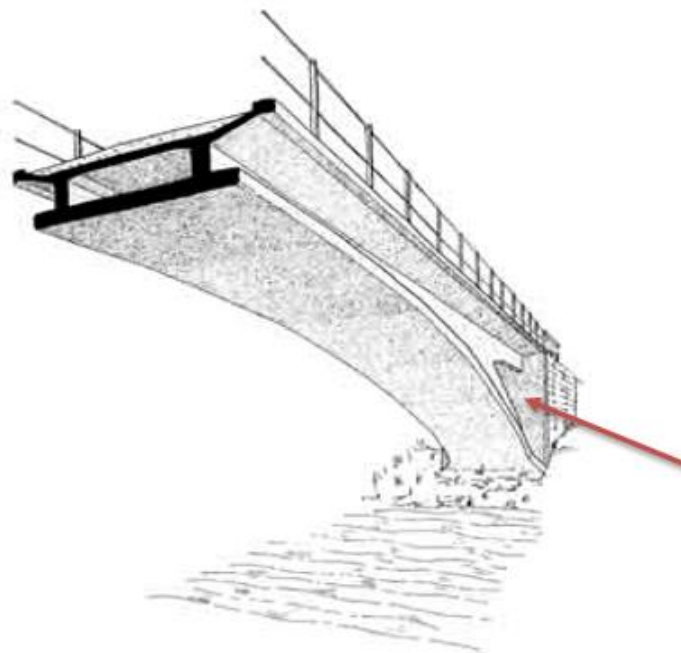
Para a realização do estudo de caso será utilizado o software especializado de elementos finitos, Ansys APDL. Por meio do programa, serão analisadas as tensões ocasionadas por cargas de peso próprio da estrutura e por cargas móveis devido a um trem tipo de 120 KN mais carga distribuída de 3 KN/m², de 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 a 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 será 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.

Figura 1 a), b) e c) - Representação das pontes em a) Zuoz; em b) representação das trincas na parede do arco de Zuoz; e em c) representação da ponte Tavanasa



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



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

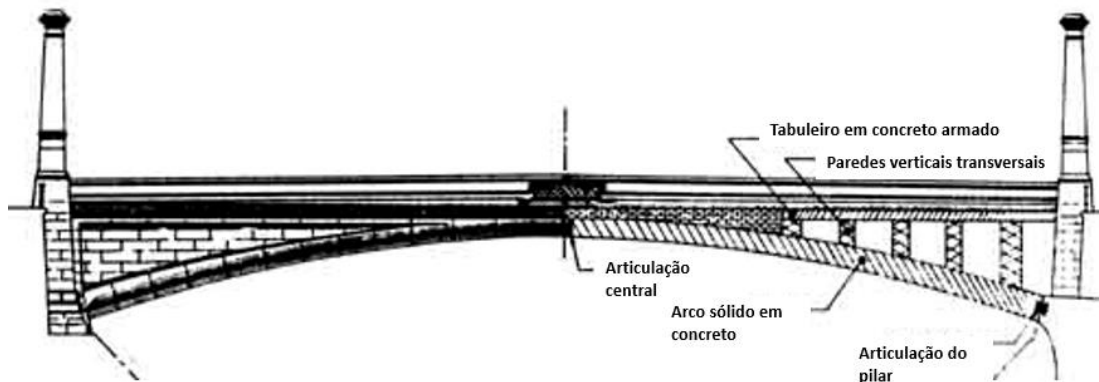
4.2 Descrição das pontes

A ponte Zuoz, sobre o rio Inn na Suíça, finalizada no ano de 1901, tem como inovação a utilização de vigas caixão arqueadas e a utilização de articulações no arco. A inspiração desta nova forma veio da ponte Stauffacher (figura 1), em Zurique, criada dois anos antes de Zouz, 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 caixão arqueadas (figura 2 a e b). 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.

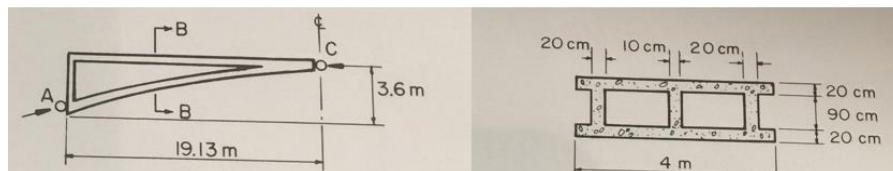
Figura 2-Ponte Stauffacher- representação da fachada em alvenaria, arco de concreto, articulações, paredes transversais e tabuleiro



Fonte –Billington, 1979- Com adaptações

Billington (1983) diz que ideia de Maillart em buscar uma estrutura mais leve e com tensões internas reduzidas 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, ao projeto de Zuoz, por sua vez aumentavam sua insegurança e dificultavam a aprovação do novo design.

Figura 3 a) e b)- Representação simplificada da região do arco (a) seção transversal simplificada da viga caixão.



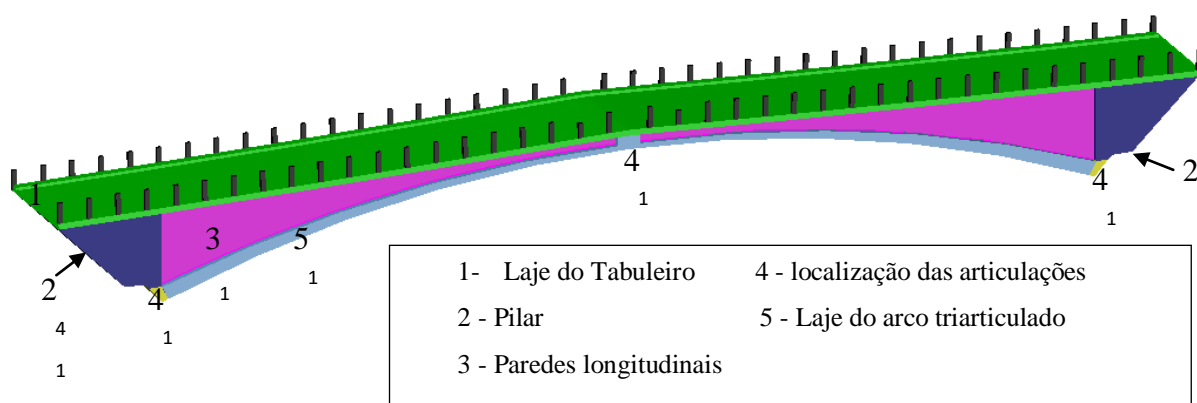
Fonte - Billington, 1979

Wilhelm Ritter, professor de Maillart e renomado na 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 do desafio em apresentar os cálculos propôs um teste de

cargas em larga escala a serem aplicadas à ponte, que resultou em pequenos movimentos e pequenas fissuras no meio do vão da ponte não prejudiciais a integridade da mesma, viabilizando sua utilização.

A proposta de Robert Maillart, ilustrada pela figura 3, 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 4: Representação da ponte em AutoCad

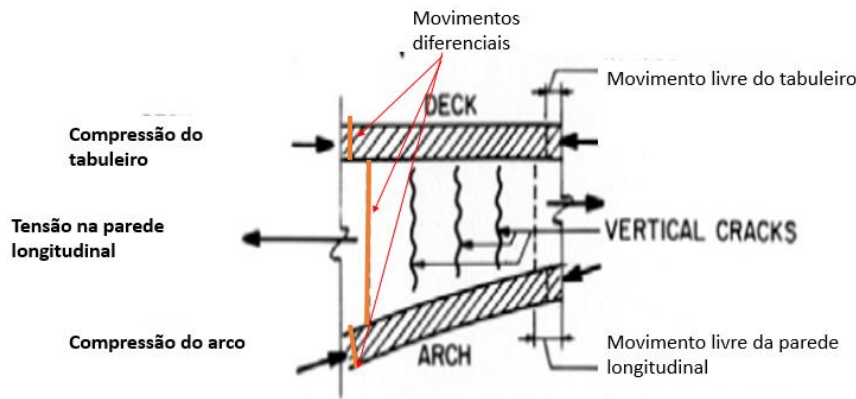


Dois anos após a construção da ponte Zuoz, ocorreram fissurações verticais na região das paredes longitudinais, três na região do lado esquerdo próxima aos pilares e uma maior na região do lado direito também próxima aos pilares, todas as trincas encontravam-se apenas de um lado da ponte onde a incidência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

BILLINGTON (1979) diz que Maillart mostrou mais tarde em seu novo projeto da ponte em arcos Billwil (1904) através de cálculos mais elaborados, que as partes onde haviam fendas em Zuoz não eram muito solicitadas pelas cargas permanentes nem variáveis. Levando-o a concluir que as trincas eram provenientes de contrações e expansões ocasionadas pelo efeito do sol (figura 4), um carregamento horizontal 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 5-Representação da região fissurada pelos movimentos diferenciais entre o tabuleiro, paredes longitudinais e arco.



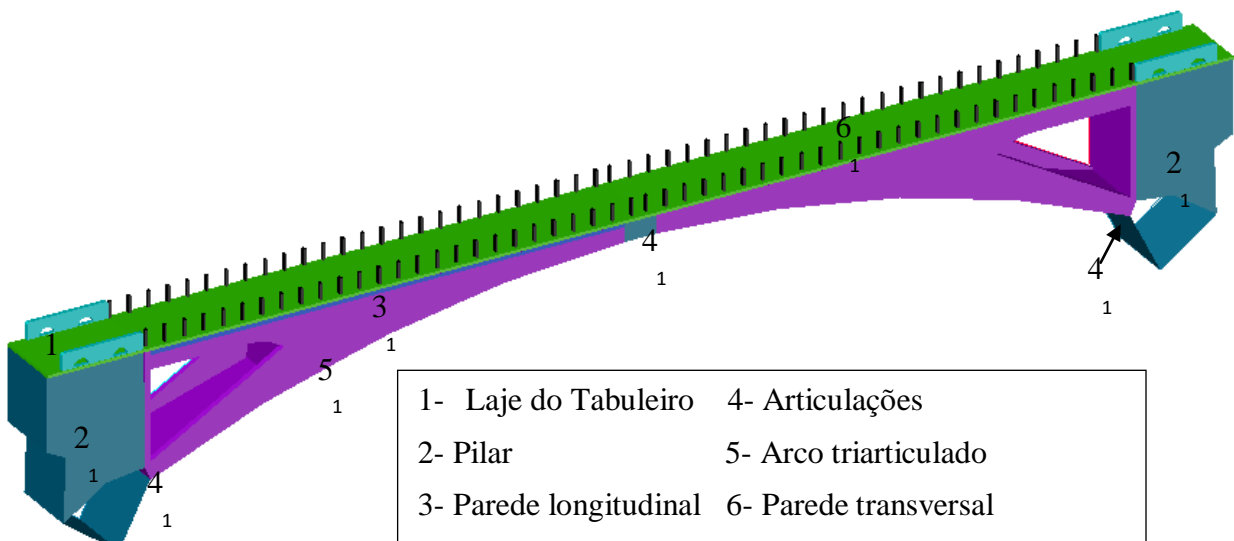
Fonte: BILLINGTON,2007 (com adaptações)

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

A ponte Tavanasa (figura 5) foi inaugurada, sobre o rio Reno, Suíça, no ano de 1905 em concreto armado considerada, na época, a de maior vão da suíça e terceira do mundo. Diferente da ponte Zuoz, Maillart removeu a porção 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 6- Representação da ponte Tavanasa em AutoCad



Para provar seus cálculos, ele utilizou de polígono funicular, que do latim significa corda, que 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 (figura 7), 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 7- Ponte Tavanassa em ruínas após avalanche de pedras



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

4.3 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 8- Ponte Zuoz sobre o rio Inn



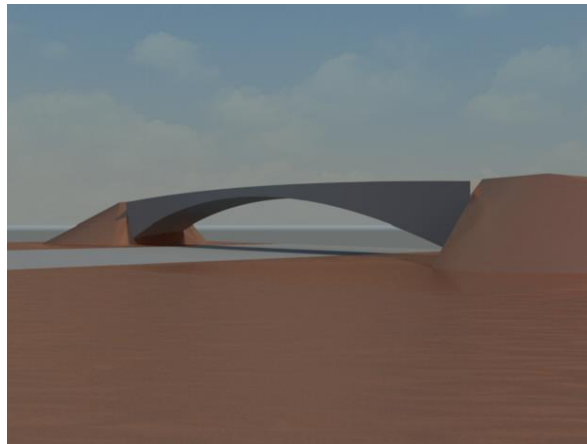
Fonte: Billington, 1979

A ponte (figura 8) apresenta, de acordo com dados obtidos em BILLINGTON (1979), SMITH(1976) e Bill (1969):

- Extensão total do tabuleiro: 47,68 m (Billington,1979);
- Extensão do vão da ponte: 38,25 m (Billington,1979);
- 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 dos caixões: 2 X 1,75 m = 3,5 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).

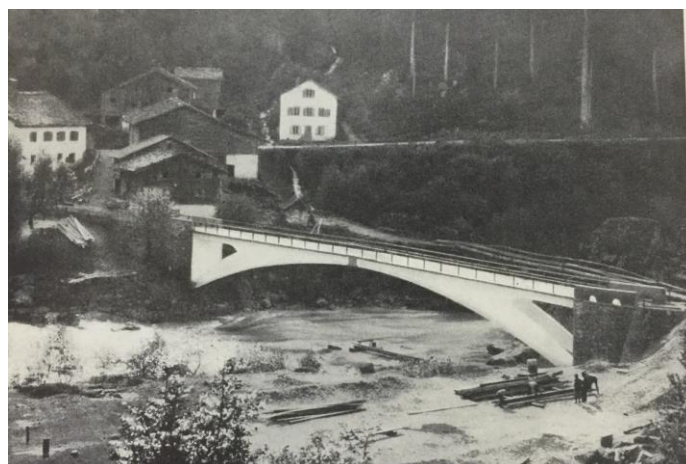
Adotou-se para o modelo simplificado da ponte, representado pela figura 9, as dimensões de 38,25 m de extensão do vão; 3,5m largura total dos dois caixões; 4 m de largura do tabuleiro; dimensão da laje do arco entre 0,16m e 0,50 m; laje de 0,20 cm de espessura e 3,60 m de altura.

Figura 9- Modelo de Zuoz simplificado renderizado em REVIT



Tavanasa (1905):

Figura 10- Ponte Tavanasa sobre o rio Reno



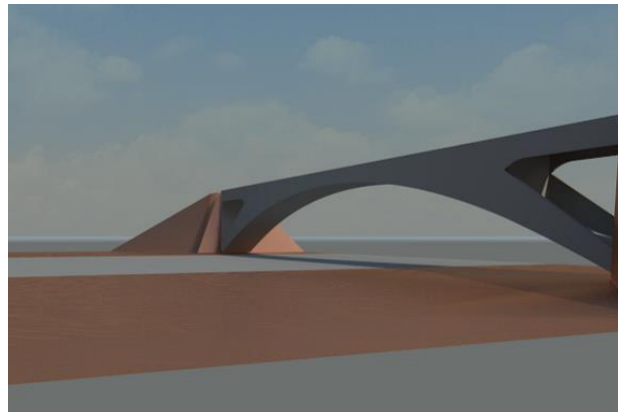
Fonte: Bill,1969

A ponte Tavanasa apresenta as seguintes informações encontradas em Bill (1969) e BILLINGTON (1979):

- 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 (figura 11) as dimensões de 51 m de extensão do vão; 3,2 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 11- Modelo simplificado de Tavanasa renderizado em REVIT



4.3.1 Carregamentos aplicados

Visto que na época de construção das pontes não havia normas de regulamentação para estruturas de pontes em concreto armado, adotou-se para os estudos de caso informações obtidas 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. As normas, portanto, serviram além de guias, também serviram de complemento para a falta de dados necessários para a simulação dos modelos.

Para o estudo de caso foi utilizado como carga permanente o peso próprio das estruturas, o qual as cargas de acordo com a norma 7187/2003 são avaliadas a partir da aplicação de um peso específico mínimo de 25 KN/m³ para concreto armado. Também foram consideradas como cargas variáveis as cargas móveis de um Trem Tipo de 120 KN e carga distribuída no tabuleiro de 3 KN/m², a partir das informações obtidas no estudo de Billington, 1979, cargas que se assemelham às existentes na NBR 7188/1982.

A tabela 1 apresenta os dados obtidos nos estudos de Smith (1976) e Billington (1979) e as informações complementares necessárias para a simulação do modelo no software, obtidas em norma.

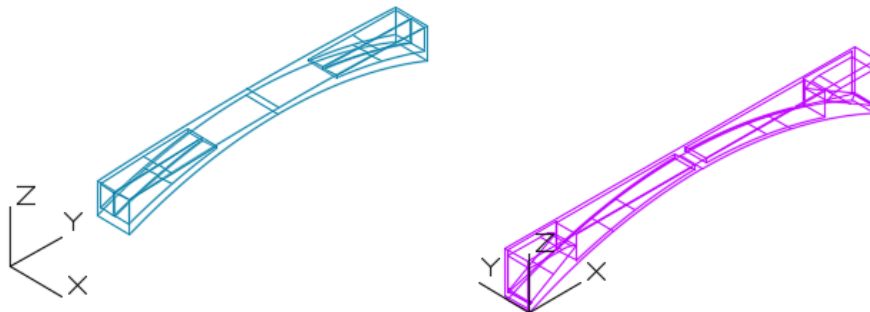
Tabela 1- Propriedades dos materiais

| | |
|---|---|
| Módulo de elasticidade adotado: | 210410 kg/cm ² = 2,1E +007 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) |

4.3.2 Modelo Numérico

Para a criação do modelo numérico das pontes, inicialmente foram feitas as modelagem simplificadas das pontes em AutoCAD representadas pelas figuras 12 “a” e “b” a seguir:

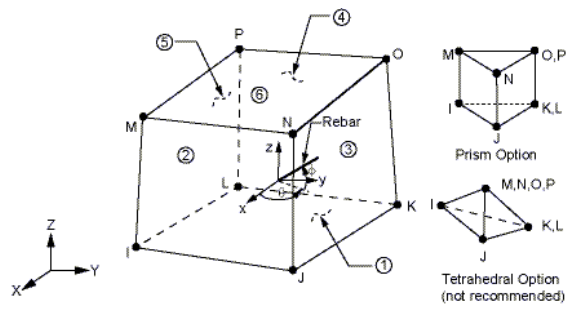
Figura 12 a) modelagem Ponte Zuoz e b) Modelagem ponte Tavanasa



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 13 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.

¹ Razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal

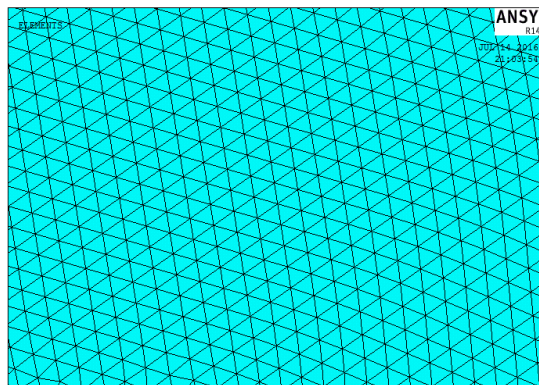
Figura 13- Elemento SOLID65.



fonte: Ansys APDL 14.5 Help

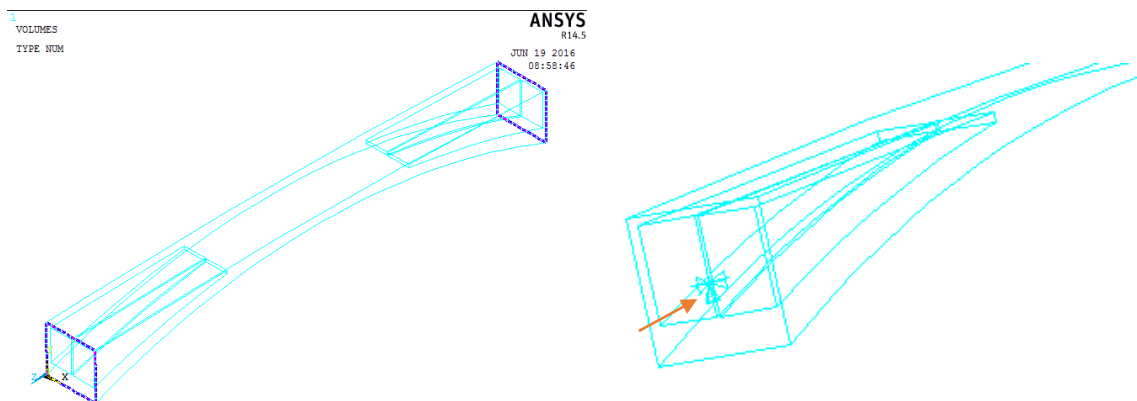
A malha, representada na figura 14, utilizada nos modelos foi do tipo tetraédrica, representada pela figura 14. Foram obtidos para o modelo Zuoz 719.968 elementos e 173.201 nós e no modelo Tavanasa 712.507 elementos e 151.015 nós.

Figura 14- detalhe malha



Para os modelos, aplicou-se condições de contorno restringindo os graus de liberdade em toda a área dos extremos dos dois modelos conforme representado nas figuras 15 a e b.

Figura 15 a e b- Aplicação de condição de contorno nas áreas destacadas em azul escuro e detalhe com condição de contorno aplicada



Em relação as cargas aplicadas aos modelos, quatro cargas pontuais, duas de 20 KN e duas de 40 KN, foram inseridas para representação do Trem tipo de 120 KN figura 16, posicionadas na região mais desfavorável dos modelos, considerada a região onde ocorreram as trincas em Zuoz, mais uma carga distribuída ao longo de todo o tabuleiro de 3 KN/m² figura 17.

Figura 16- Aplicação de cargas pontuais aos nós do tabuleiro equivalente ao trem tipo de 120 KN.

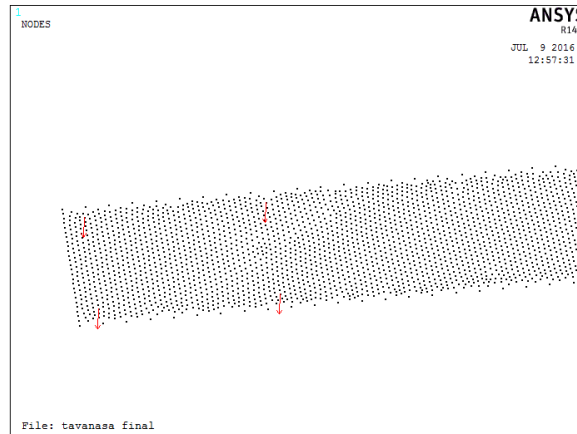
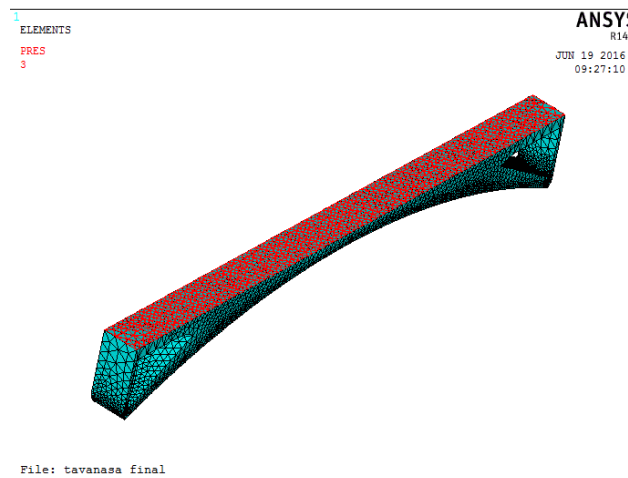


Figura 17 - Carga distribuída (em vermelho) de 3 KN/m² aplicada sobre toda a superfície.



4.4 Análise dos resultados

O modelo da ponte Zuoz (figura 18) apresentou como resultado um deslocamento máximo de 1,094 mm e tensões máximas de sollicitação à compressão o valor de 428,705 KN/m² e à tração o 807,309 KN/m². O modelo da ponte Tavanasa (figura 19) por sua vez apresentou deslocamento máximo de 1,672 mm e tensões sollicitação à compressão de 1078,25 KN/m² e à tração de 470,762 KN/m² apresentados na tabela 2 a seguir:

Tabela 2- deslocamentos máximos e máximas tensões.

| Modelos | Δ máximo (mm) | σ_c máxima (KN/m ²) | σ_t máxima (KN/m ²) |
|----------|----------------------|--|--|
| Zuoz | 1,094 | 428,705 | 807,309 |
| Tavanasa | 1,68 | 2.645,53 | 712,766 |

Figura 18- Representação do modelo de Zuoz deformado e a distribuição de tensões

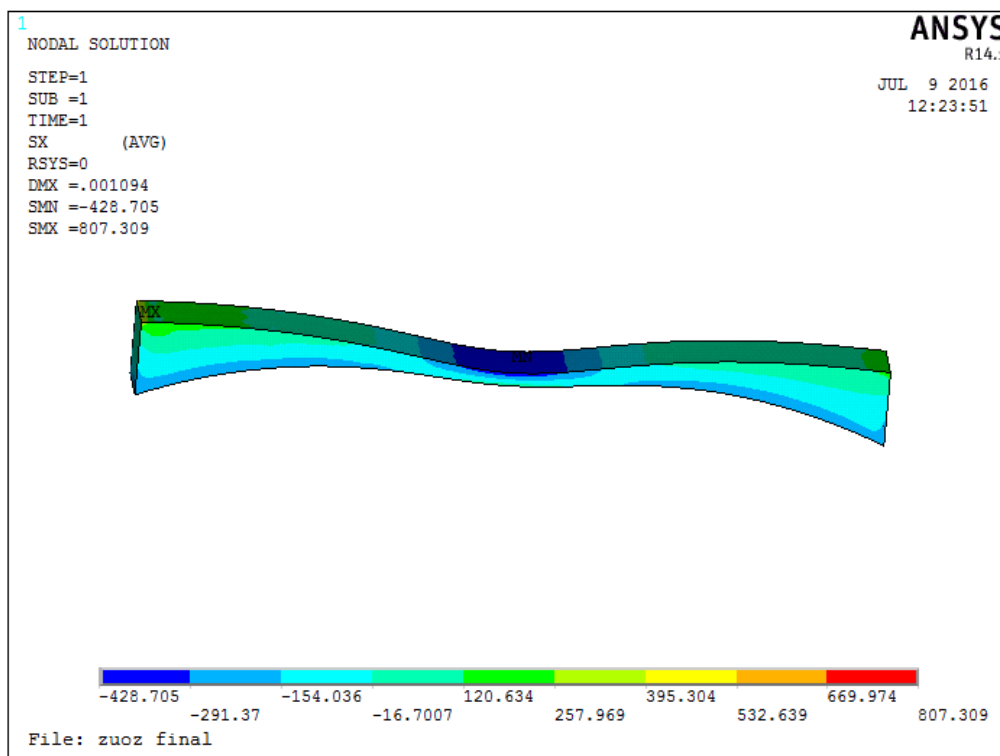
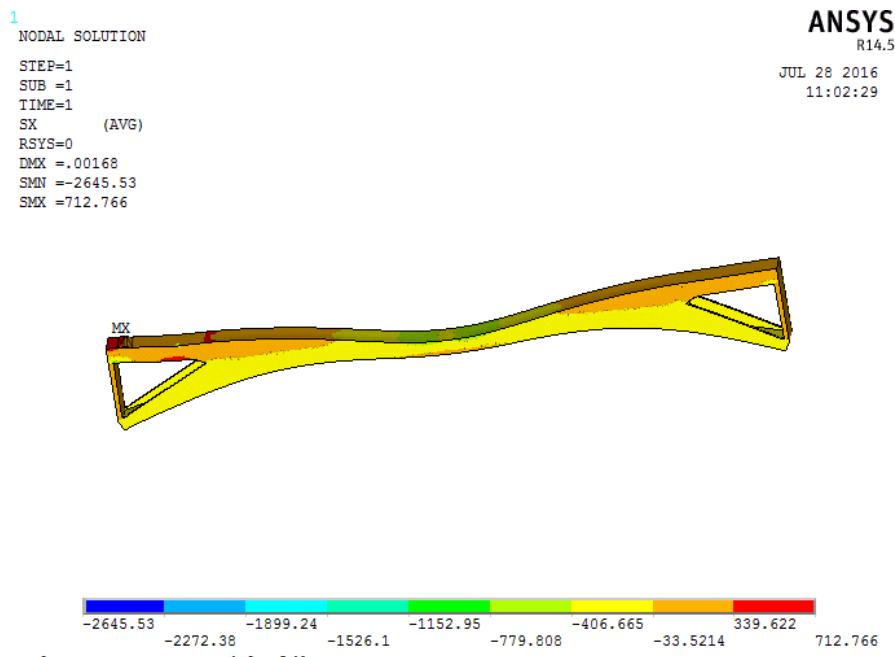


Figura 19- Representação do modelo de Tavanasa deformado e a distribuição de tensões



Os dados obtidos foram comparados às resistências calculadas do concreto à compressão (f_{ck}) de 14.100 KN/m² e à tração (f_{ctk}) de 1.750 KN/m². Para o modelo de Zuoz observou-se que os valores de sollicitação de compressão (428,705 KN/m²) eram menores que os valores obtidos da resistência do concreto à compressão, assim como os valores de sollicitação de tração (807,309 KN/m²) eram menores que a resistência à tração do concreto.

Devido aos danos sofridos pela ponte Zuoz, foi simulado um modelo com danos (figura 20) representando as trincas ocorridas em Zuoz (figura 21 a e b). Para isso foram deletados elementos da malha (figura 22) para representar os danos ocorridos e feitas as verificações quanto à estabilidade da estrutura.

Figura 20- Vista geral de modelo com dano

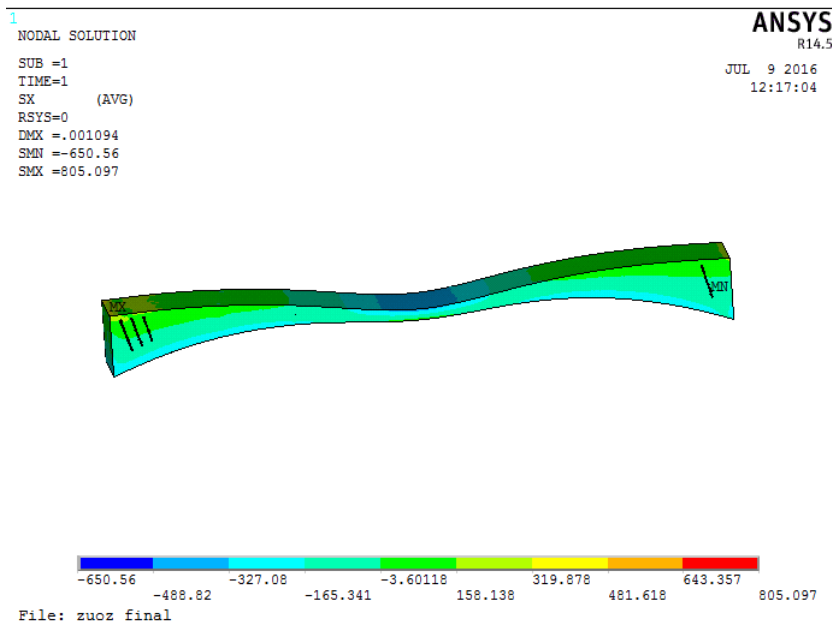


Figura 21- a) Representação do dano do lado esquerdo da parede longitudinal e b) Representação do dano do lado direito da parede longitudinal.

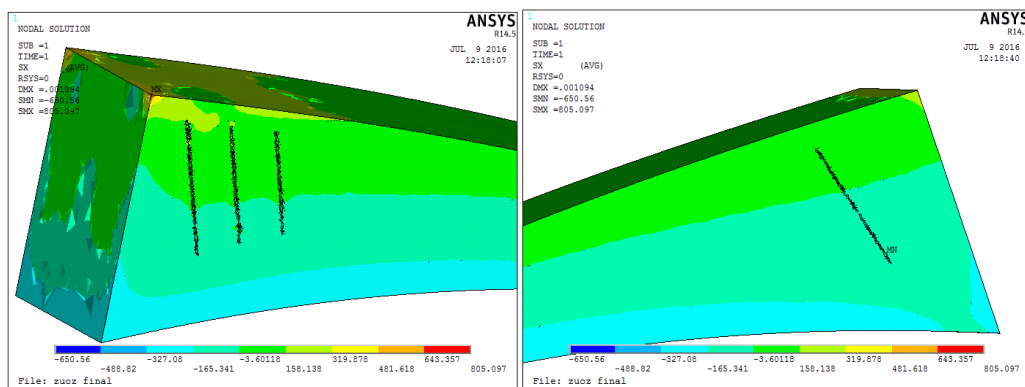
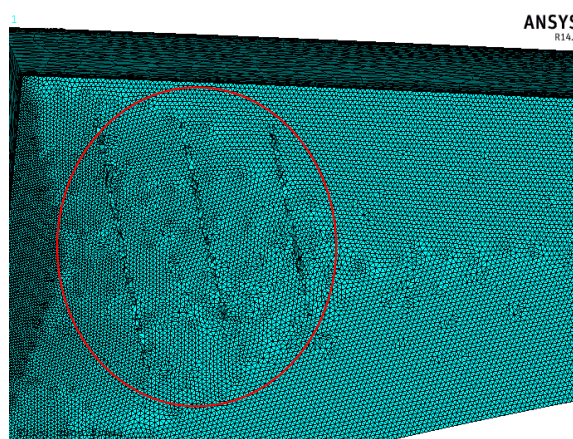


Figura 22- Representação da malha com elementos deletados



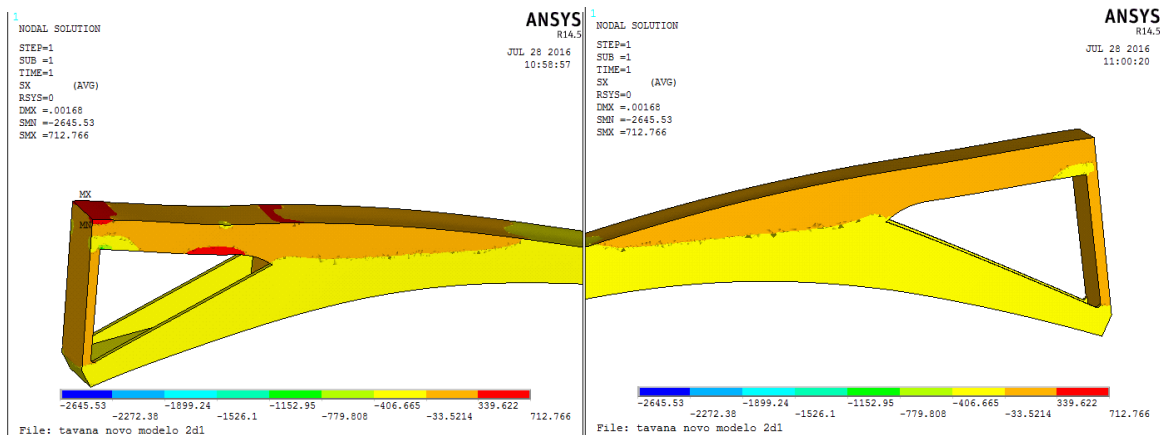
Os efeitos obtidos da simulação do modelo com danos continuaram ainda favoráveis a estabilidade do modelo que apresentou um aumento na sollicitação de compressão do concreto, porém ainda inferior ao limite proposto pelo f_{ck} de 14.100 KN/m^2 .

Observando os resultados dos modelos de Zuoz intacto e com danos percebe-se que as trincas ocorridas não foram causadas por tensões elevadas na ponte Zuoz, visto que as tensões de sollicitação foram aquém das resistências do concreto nos dois casos. E portanto, podem ter sido causas de efeitos térmicos assim como afirmou Maillart em sua análise aos danos ocorridos.

O modelo de Tavanasa proposto como solução ao modelo de Zuoz, também apresentou resultados favoráveis em relação aos efeitos de tensão (figuras 23 a e b). Obtendo como máxima tensão de sollicitação de compressão do concreto o valor de $2.645,53 \text{ KN/m}^2$ abaixo da resistência do f_{ck} calculada de 14.100 KN/m^2 e uma tensão de sollicitação de tração do concreto de $712,766 \text{ KN/m}^2$ também abaixo da resistência do f_{ctk} de 1.750 KN/m^2 .

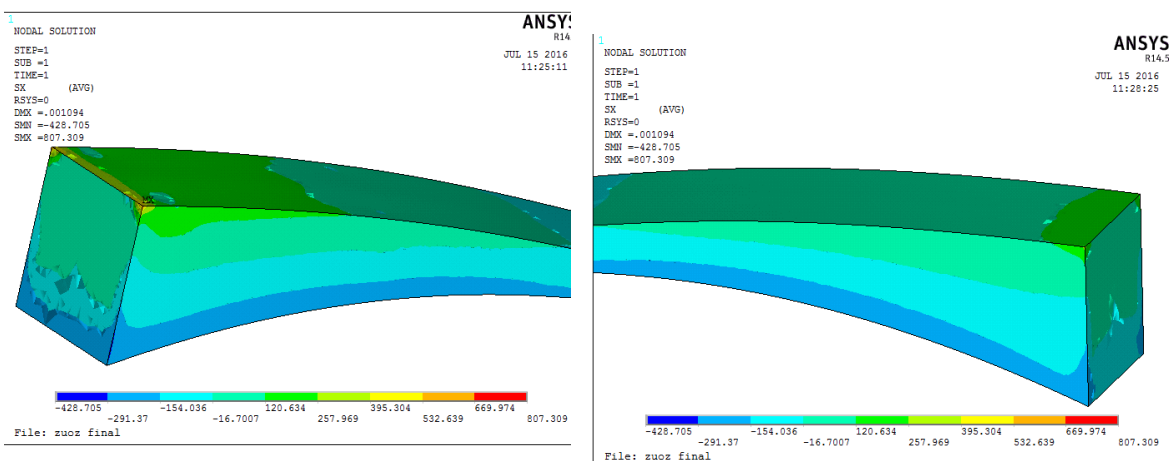
A simulação de Tavanasa ainda apresentou maior eficiência em relação ao modelo de Zuoz nas tensões de tração, as quais foram reduzidas em 336,547 KN/m², cerca de 41,7% do valor de Zuoz, o que favorece a estrutura por se tratar de um arco de concreto que trabalha melhor os efeitos de compressão.

Figuras 23 a e b- a) Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas as cargas pontuais mais carga distribuídas e b) Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas apenas as cargas distribuídas.



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 (figuras 24 a e b). Além disso, como o modelo de Tavanasa apresentou resultados favoráveis quanto às tensões de tração aplicadas mesmo após a retirada de parte da parede, percebe-se que a nova ponte possui um modelo estruturalmente mais eficiente.

Figuras 24 a e b- a) Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas as cargas pontuais mais carga distribuídas e b) Detalhamento de tensões na região onde foram aplicadas apenas as cargas distribuídas.



5 CONCLUSÃO

Os princípios da Arte Estrutural, de eficiência estrutural, estética e economia propostos por Billington, devem ser essenciais ao longo de toda a carreira dos profissionais de arquitetura e engenharia, resultando em modelos estruturais onde a beleza do projeto encontra-se na integração da estética com a estrutura, o que causa a economia 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.