

PROJETO, EXECUÇÃO E REABILITAÇÃO DE  
**OBRAS DE ARTE**  
**ESPECIAIS**

*Organizadores:*

*João da Costa Pantoja*

*Márcio Augusto Roma Buzar*

*Naiara Guimarães de Oliveira Porto*

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**Reitora:** Márcia Abrahão Moura  
**Vice-Reitor:** Henrique Huelva  
**Decana de Pesquisa e Inovação:** Maria Emília Machado Telles Walter  
**Decanato de Pós-graduação:** Lucio Remuzat Rennó Junior  
**Decana de Extensão:** Olgamir Amancia

**FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO - FAU**

**Diretor da FAU:** Caio Frederico e Silva  
**Vice Diretoria da FAU:** Maria Cláudia Candeia de Souza  
**Coordenadora de Pós-Graduação:** Carolina Pescatori Cândido da Silva

**Coordenação de Produção Editorial,** Valmor Cerqueira Pazos  
**Preparação, Revisão e Diagramação:** Erika Stella da Silva Menezes  
Naiara Porto

**Conselho Editorial:** Abner Luis Calixter  
Humberto Salazar Amorim Varum  
Paulo de Souza Tavares Miranda  
Rodrigo Guimarães Martins

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Projeto, execução e reabilitação de obras de arte especiais [livro eletrônico] / organizadores João da Costa Pantoja, Marcio Augusto Roma Buzar, Naiara Guimarães de Oliveira Porto. -- Brasília, DF : LaSUS FAU : Editora Universidade de Brasília, 2024.  
PDF

Vários autores.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-84854-41-3

1. Artigos - Coletâneas 2. Engenharia civil  
3. Engenharia civil (Estruturas) 4. Patrimônio arquitetônico - Preservação I. Pantoja, João da Costa. II. Buzar, Marcio Augusto Roma. III. Porto, Naiara Guimarães de Oliveira.

24-219342

CDD-624

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Engenharia civil 624

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

1ª Edição

# ORGANIZZADORE E



# AUTORE

Daniel Nelson Maciel | Autor  
Eduardo Bicudo de Castro Azambuja | Autor  
Eduardo Valeriano Alves | Autor  
Fernanda Karen Melo da Costa | Autor  
Flávia Moll de Souza Judice | Autor  
Gláucyo Santos | Autor  
Iberê Pinheiro de Oliveira | Autor  
João da Costa Pantoja | Organizador e Autor  
Joel Araújo do Nascimento Neto | Autor  
José Neres da Silva Filho | Autor  
Karen Andreza Marcelino | Autor  
Luiz Carlos de Almeida | Autor  
Leandro Mouta Trautwein | Autor  
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa | Autor  
Luís Henrique Bueno Pinehiro | Autor  
Márcio Augusto Roma Buzar | Organizador e Autor  
Marcos Henrique Ritter de Gregorio | Autor  
Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro | Autor  
Naiara Guimarães de Oliveira Porto | Organizador  
Olímpia Loures Vale Pujatti | Autor  
Patrícia Caroline Souza da Rocha Vieira | Autor  
Paulo Robert Santos Machado | Autor  
Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva | Autor  
Ricardo Valeriano Alves | Autor  
Rodrigo Barros | Autor



# SUMÁRIO

## EIXO 1 Degradação, preservação, estética p. 10

- 1 p. 11 Avaliação da curva de desempenho e degradação de obras de arte especiais: Caso da Ponte do Braghetto
- 2 p. 29 A Preservação do Patrimônio Industrial Moderno Vinculado às Pontes Metálicas
- 3 p. 52 Análise da relação entre estrutura e design de duas pontes de Robert Maillart utilizando o software ANSYS

## EIXO 2 Soluções e análises estruturais p. 75

- 4 p. 76 Solução de viga vagonada, comparada com o modelo de treliça plana, no uso de passarelas com grandes vãos
- 5 p. 89 Análise das distribuições de momentos fletores e reações de apoio devidos à carga móvel em tabuleiros de pontes esconsas
- 6 p. 112 Pontes retas alargadas em concreto armado: a influência da resistência do concreto na distribuição de momento fletor devido à carga móvel
- 7 p. 138 Avaliação das condições estruturais da Ponte Fazenda Modelo

## EIXO 3 Reforço em pontes p. 150

8 p. 151 Reforço de Pontes de Concreto Armado por Protensão Externa

9 p. 164 Aplicação de protensão no reforço da ponte metálica do Rio Pardo

10 p. 182 Restauro Estrutural e Reforço da Ponte do Desengano

## AUTORES Resumo p. 198

DEGRADAÇÃO

PRESERVAÇÃO

ESTÉTICA



EIXO 1



# 3

## Análise da relação entre estrutura e design de duas pontes de Robert Maillart utilizando o *Software Ansys*

**VIEIRA, Patrícia Caroline Souza da Rocha**

Centro de Ensino Unificado de Brasília.

**GREGORIO, Marcos Henrique Ritter de**

Centro de Ensino Unificado de Brasília.

**SILVA, Ramon Saleno Yure Rubim Costa**

Centro de Ensino Unificado de Brasília.

**BUZAR, Márcio Augusto Roma**

Universidade de Brasília.

**INOJOSA, Leonardo da Silveira Pirillo**

Universidade de Brasília.

**Resumo:** A concepção de projetos de grande magnitude, como pontes, viadutos, estádios, torres e aquedutos, exige especial atenção do projetista devido ao impacto que podem causar no entorno. Quando bem projetadas, tais construções podem transcender seu propósito funcional e original, atingindo dimensões do campo da subjetividade, interferindo na beleza, harmonia e autoestima de uma cidade. Ao longo da história, 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 elementos finitos; Ansys.

## 1. INTRODUÇÃO

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

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, categoricamente 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, 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. PRINCIPIOS 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 pôde 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 ideia 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). 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

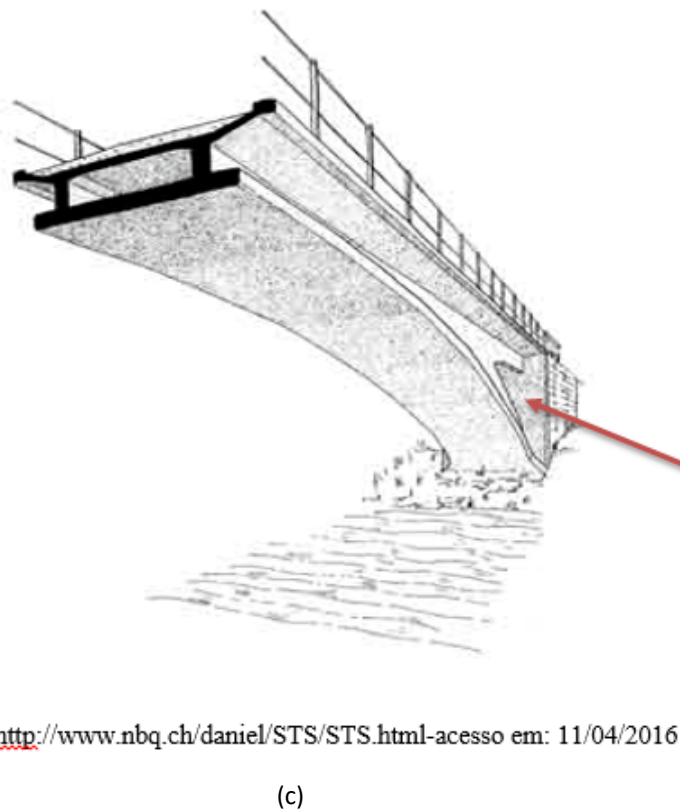
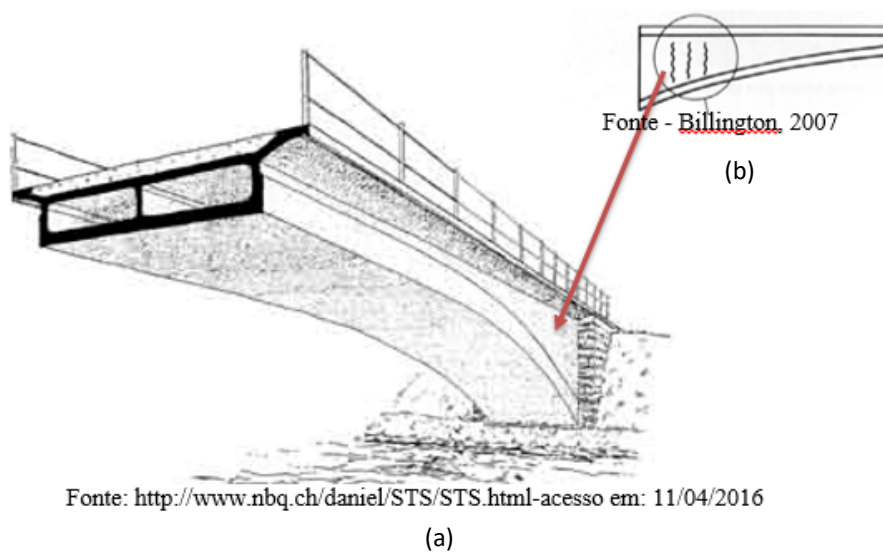
O referido estudo foi baseado nas pontes Zuoz e Tavanasa de Robert Maillart, que envolvem o tema Arte Estrutural.

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, apresentado na 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/m<sup>2</sup>, 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 arquétipos 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:** REPRESENTAÇÃO DAS PONTES EM (A) ZUOZ; EM (B) REPRESENTAÇÃO DAS TRINCAS NA PAREDE DO ARCO DE ZUOZ; E EM (C) REPRESENTAÇÃO DA PONTE TAVANASA

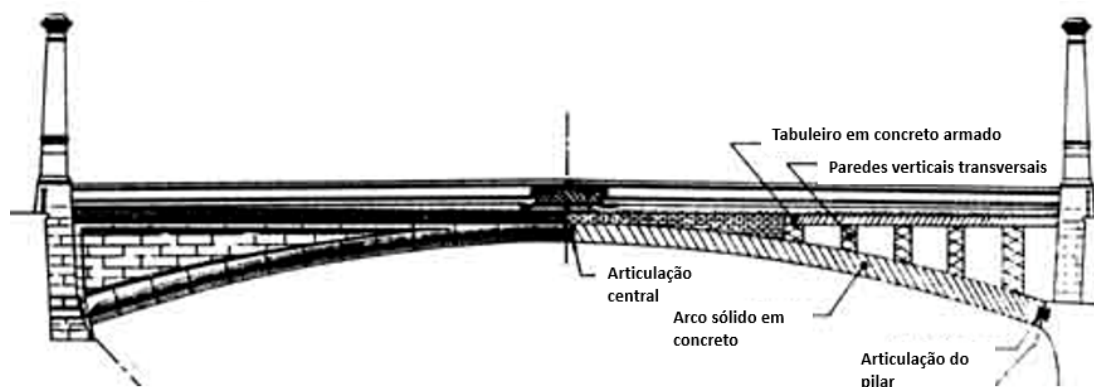


## 4.2. DESCRIÇÃO DAS PONTES

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 ideia 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

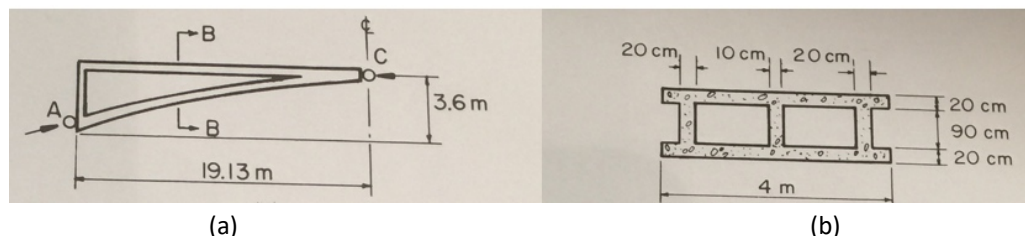


FONTE: BILLINGTON, 1979- COM ADAPTAÇÕES.

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:** Representação simplificada da região do arco (a) seção transversal simplificada da viga caixão (b)

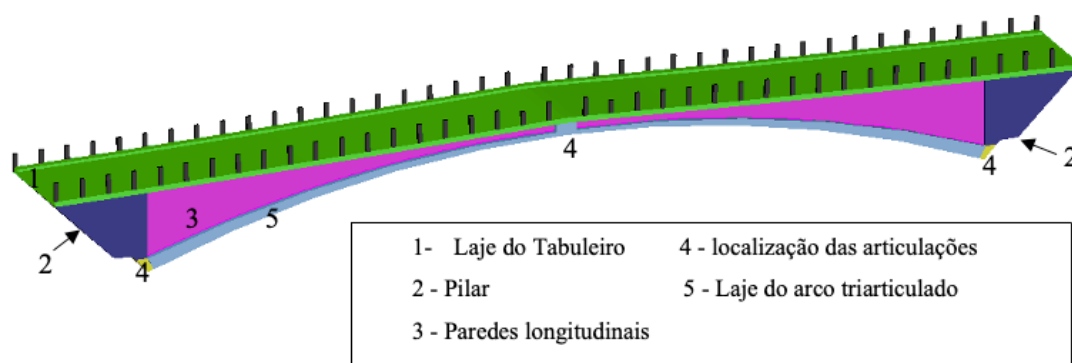


FONTE: BILLINGTON, 1979.

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 dela, 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



FONTE: AUTORES.

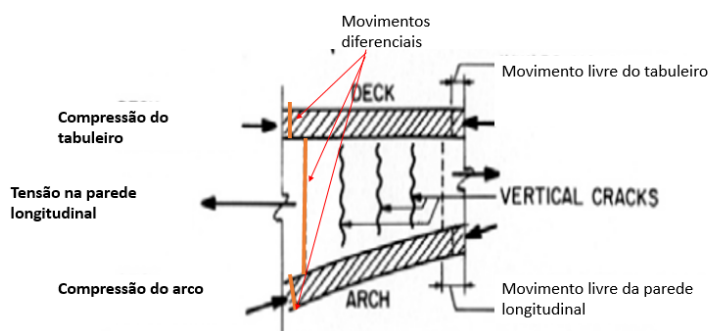


Dois anos após a construção da ponte Zuoz, ocorreram fissurações verticais na região das paredes longitudinais, três na região do lado esquerdo próxima aos pilares e uma maior na região do lado direito também próxima aos pilares, todas as trincas encontravam-se apenas de um lado da ponte onde a incidência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

Billington (1979) diz que Maillart mostrou mais tarde em seu novo projeto, a ponte em arcos. Billwil (1904) apresentou através de cálculos mais elaborados, que as partes onde havia fendas em Zuoz não eram muito solicitadas pelas cargas permanentes nem variáveis. O que o levou 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 em virtude do movimento diferencial das paredes longitudinais que se comprimiam mais, devido à exposição ao calor e do tabuleiro e do arco, que comprimiam em menor intensidade, causando a presença de maior umidade 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, ADAPTADO).

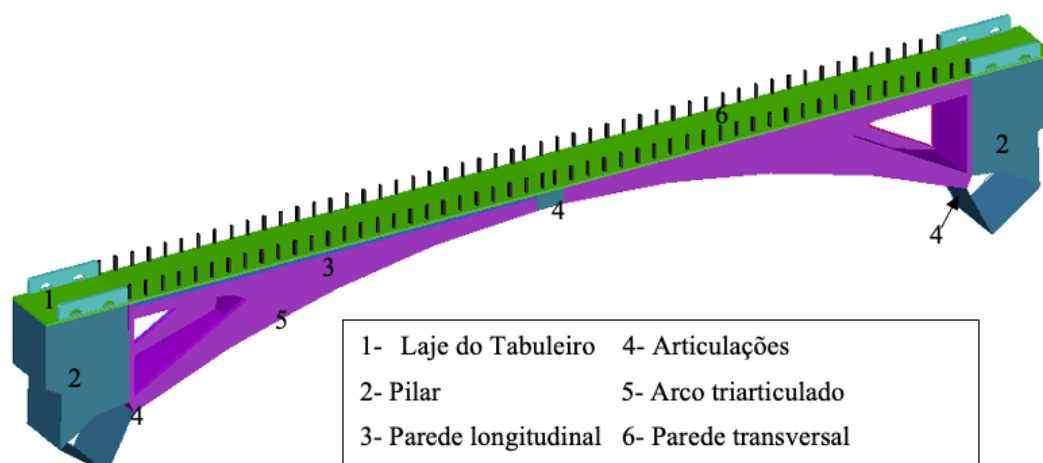
Tendo a experiência vivida em Zuoz, Maillart propôs outro projeto inovando as técnicas usadas em Zuoz: o projeto da ponte Tavanasa.

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



FONTE: AUTORES.

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 se encontravam 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](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



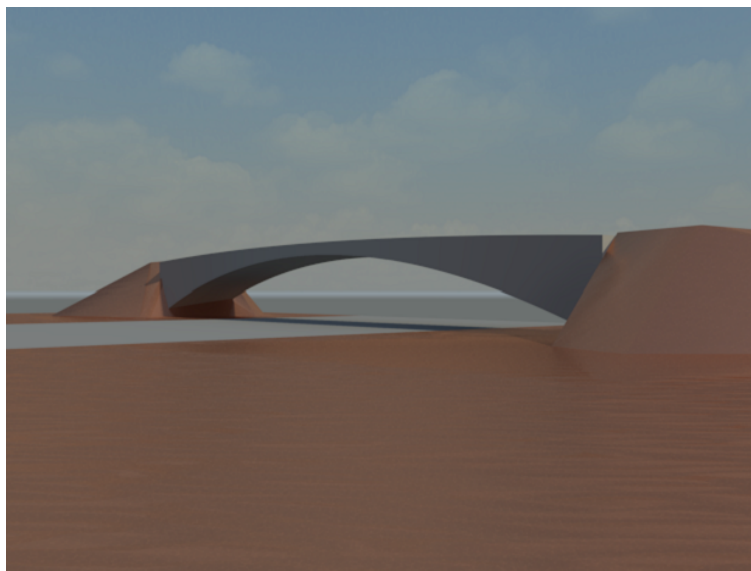
FONTE: BILLINGTON,1979.

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



**FONTE:** AUTORES.

Tavanasa (1905):

**Figura 10:** Ponte Tavanasa sobre o rio Reno

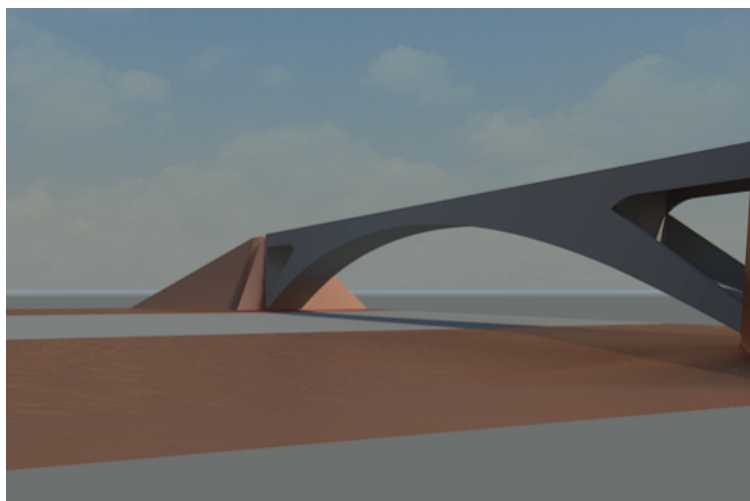


**FONTE:** BILL,1969.

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

FONTE: AUTORES.

#### 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  $25 \text{ KN/m}^3$  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  $3 \text{ KN/m}^2$ , 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.

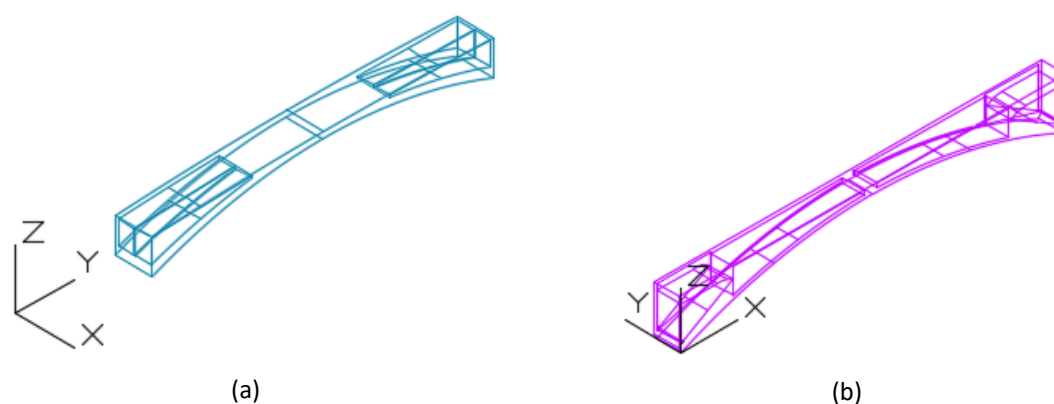
TABELA 1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

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

#### 4.3.2. MODELO NUMÉRICO

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

FIGURA 12: MODELAGEM PONTE ZUOZ (A) E MODELAGEM PONTE TAVANASA (B)

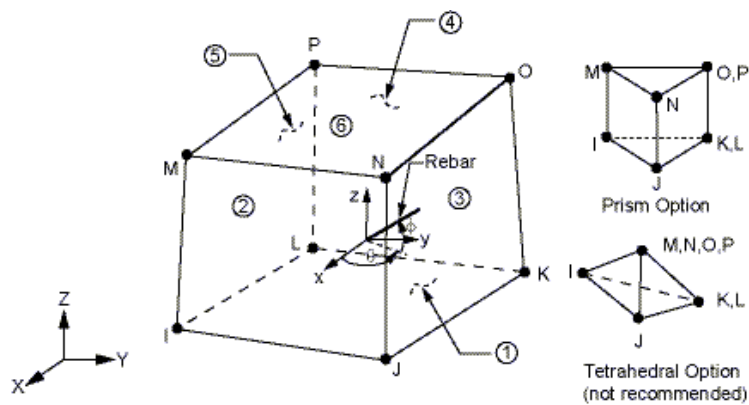


Fonte: Autores.

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.

<sup>1</sup> Razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal

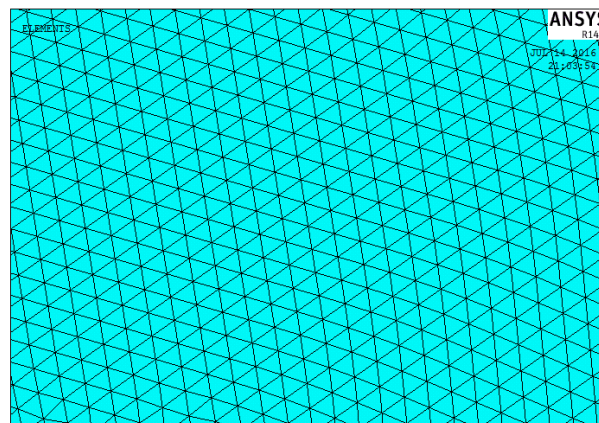
**Figura 13:** Elemento SOLID65



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

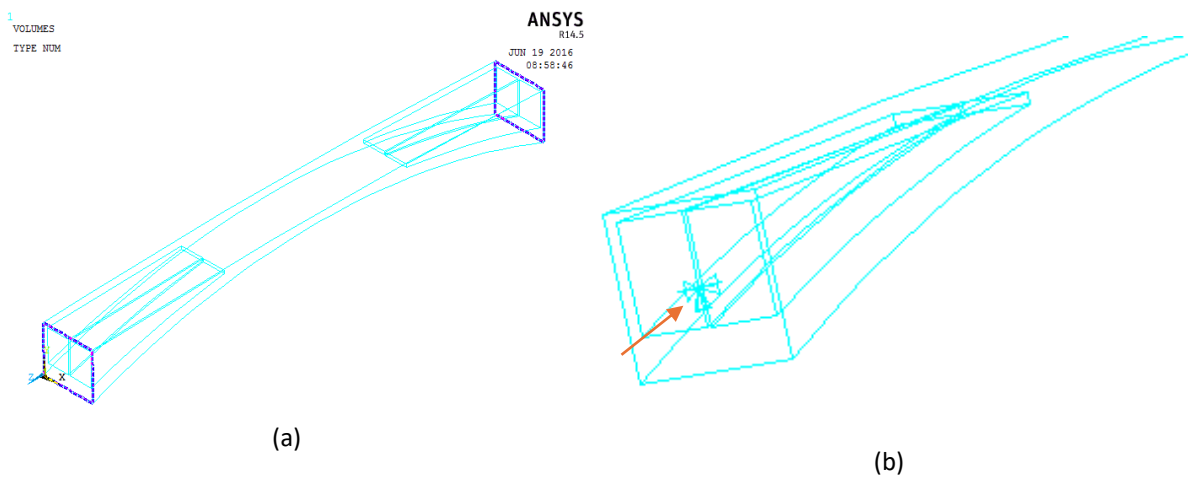


FONTE: AUTORES.

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.



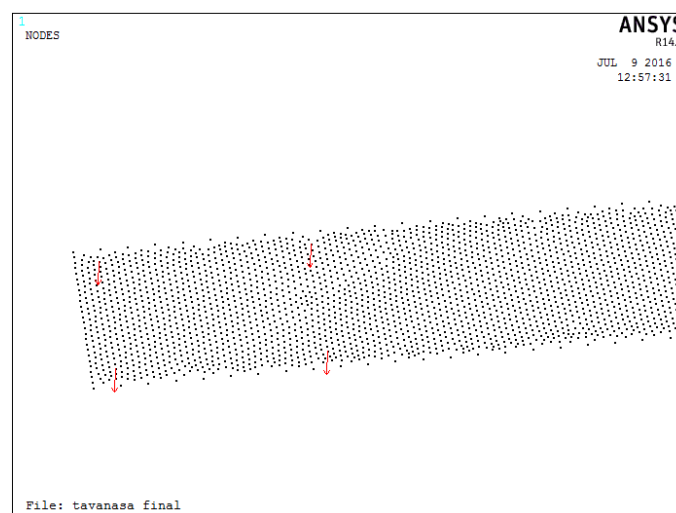
**FIGURA 15:** APLICAÇÃO DE CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL ESCURO E DETALHE COM CONDIÇÃO DE CONTORNO APLICADA



Fonte: Autores.

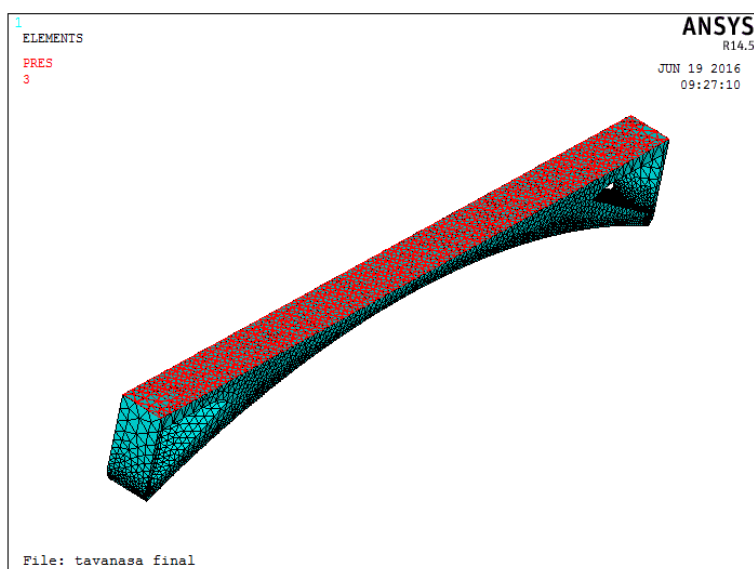
Em relação as cargas aplicadas aos modelos, quatro cargas pontuais, duas de 20 KN e duas de 40 KN, foram inseridas para representação do Trem tipo de 120 KN figura 16, posicionadas na região mais desfavorável dos modelos, considerada a região onde ocorreram as trincas em Zuoz, mais uma carga distribuída ao longo de todo o tabuleiro de 3 KN/m<sup>2</sup> figura 17.

**FIGURA 16:** APLICAÇÃO DE CARGAS PONTUAIS AOS NÓS DO TABULEIRO EQUIVALENTE AO TREM TIPO DE 120 KN



FONTE: AUTORES.

**FIGURA 17:** CARGA DISTRIBUÍDA (EM VERMELHO) DE 3 KN/M<sup>2</sup> APLICADA SOBRE TODA A SUPERFÍCIE



FORTE: AUTORES.

#### 4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

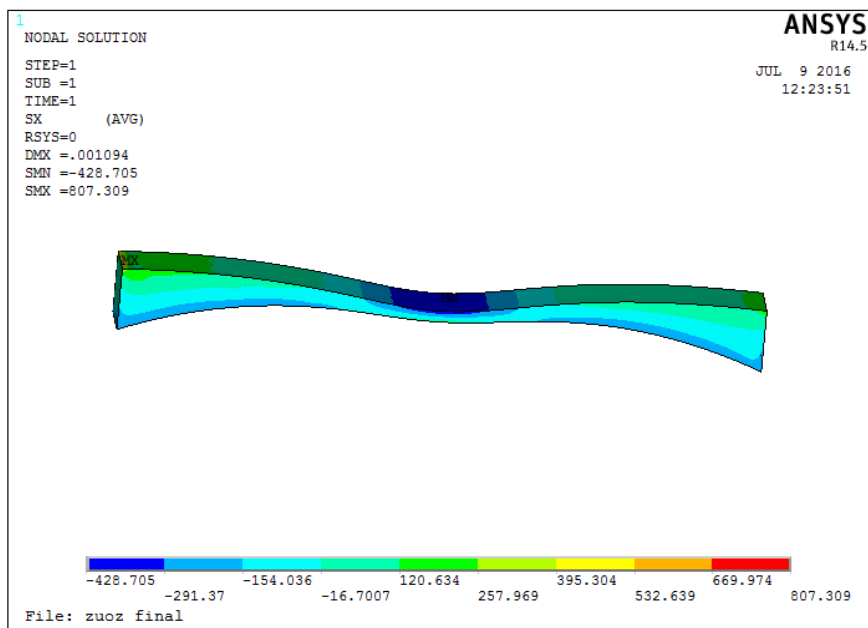
O modelo da ponte Zuoz (figura 18) apresentou como resultado um deslocamento máximo de 1,094 mm e tensões máximas de solicitação à compressão o valor de 428,705 KN/m<sup>2</sup> e à tração o 807,309 KN/m<sup>2</sup>. O modelo da ponte Tavanasa (figura 19) por sua vez apresentou deslocamento máximo de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

**TABELA 2.** DESLOCAMENTOS MÁXIMOS E MÁXIMAS TENSÕES

| Modelos  | $\Delta$ máximo (mm) | $\sigma_c$ máxima (KN/m <sup>2</sup> ) | $\sigma_t$ máxima (KN/m <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------------|--|--|
| Zuoz     | 1,094                | 428,705                                | 807,309                                |
| Tavanasa | 1,68                 | 2.645,53                               | 712,766                                |

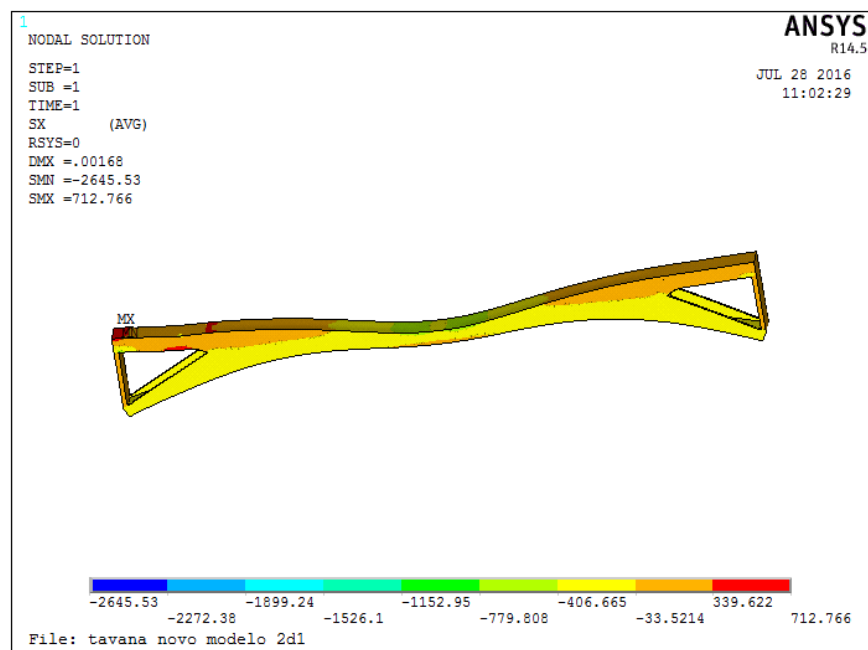
FORTE: AUTORES.

**FIGURA 18:** REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE ZUOZ DEFORMADO E A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES



FONTE: AUTORES.

**FIGURA 19:** REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE TAVANASA DEFORMADO E A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES



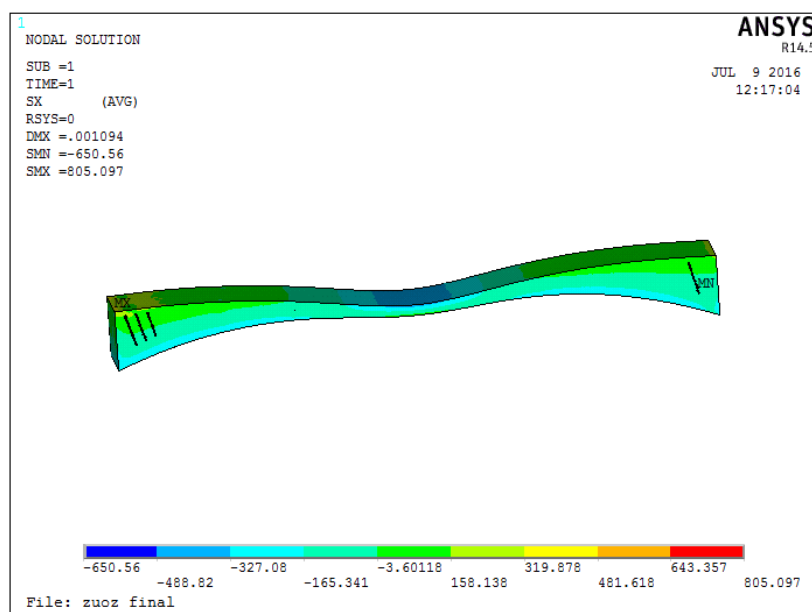
FONTE: AUTORES.

Os dados obtidos foram comparados às resistências calculadas do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) de 14.100 KN/m<sup>2</sup> e à tração ( $f_{ctk}$ ) de 1.750 KN/m<sup>2</sup>. Para o modelo de Zuoz observou-se que os valores de solicitação de compressão (428,705 KN/m<sup>2</sup>) eram menores que os valores

obtidos da resistência do concreto à compressão, assim como os valores de solicitação de tração ( $807,309 \text{ KN/m}^2$ ) eram menores que a resistência à tração do concreto.

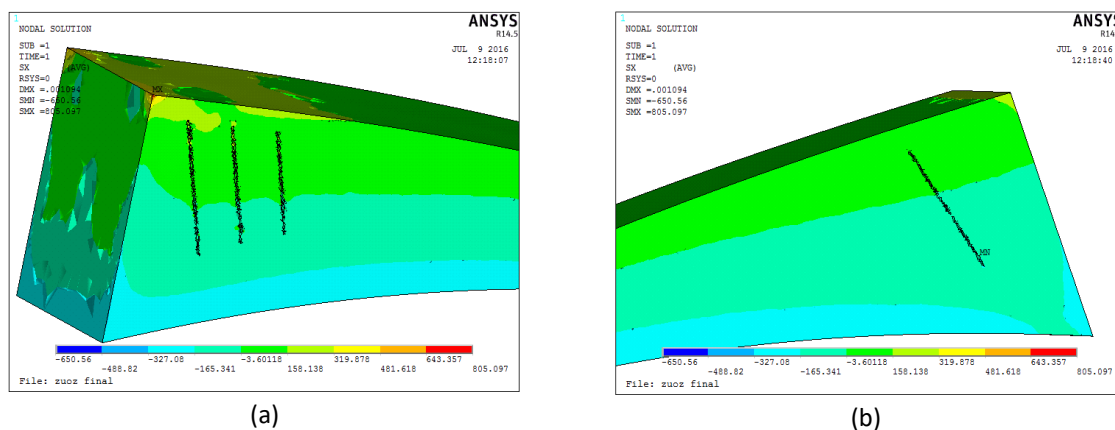
Devido aos danos sofridos pela ponte Zuoz, foi simulado um modelo com danos (figura 20) representando as trincas ocorridas em Zuoz (figura 21 a e b). Para isso foram deletados elementos da malha (figura 22) para representar os danos ocorridos e feitas as verificações quanto à estabilidade da estrutura.

FIGURA 20: VISTA GERAL DE MODELO COM DANO

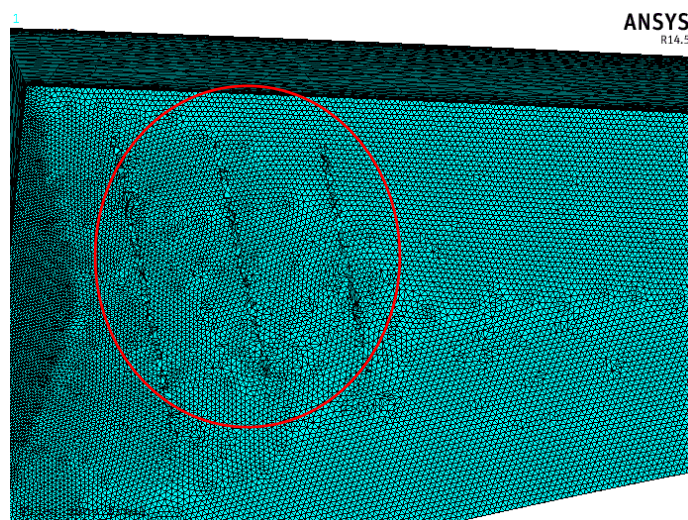


FONTE: AUTORES.

FIGURA 21. REPRESENTAÇÃO DO DANO DO LADO ESQUERDO DA PAREDE LONGITUDINAL (A) E REPRESENTAÇÃO DO DANO DO LADO DIREITO DA PAREDE LONGITUDINAL (B)



FONTE: AUTORES.

**FIGURA 22:** REPRESENTAÇÃO DA MALHA COM ELEMENTOS DELETADOS

FONTE: AUTORES.

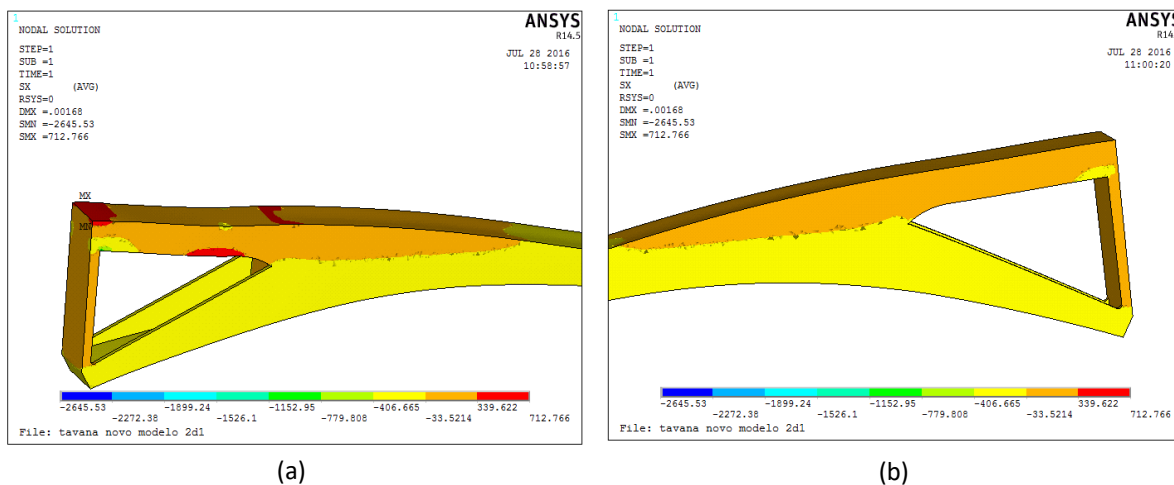
Os efeitos obtidos da simulação do modelo com danos continuaram ainda favoráveis a estabilidade do modelo que apresentou um aumento na sollicitação de compressão do concreto, porém ainda inferior ao limite proposto pelo  $f_{ck}$  de  $14.100 \text{ KN/m}^2$ .

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  $14.100 \text{ KN/m}^2$  e uma tensão de sollicitação de tração do concreto de  $712,766 \text{ KN/m}^2$  também abaixo da resistência do  $f_{ctk}$  de  $1.750 \text{ KN/m}^2$ .

A simulação de Tavanasa ainda apresentou maior eficiência em relação ao modelo de Zuoz nas tensões de tração, as quais foram reduzidas em  $336,547 \text{ KN/m}^2$ , 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.

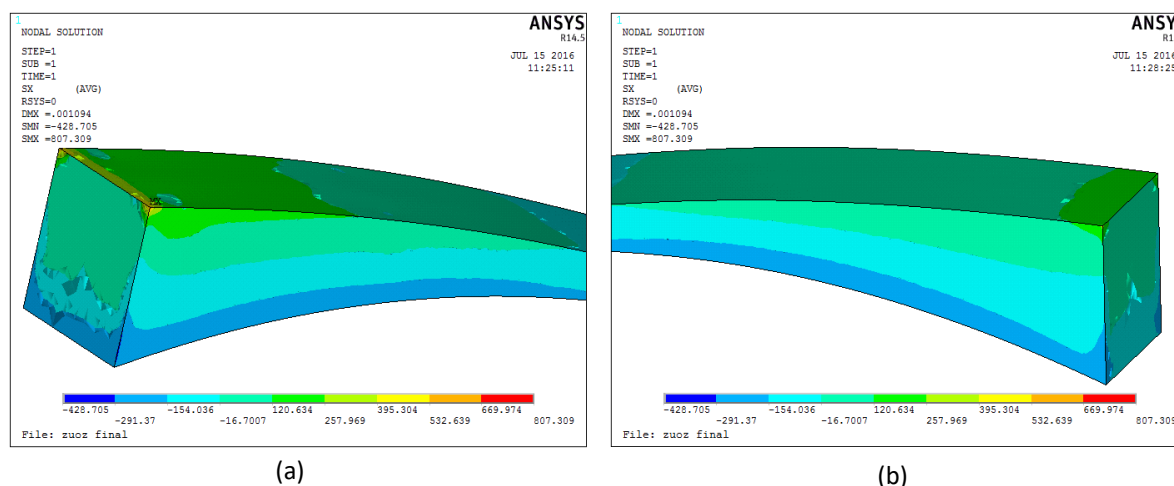
**FIGURA 23:** DETALHAMENTO DE TENSÕES NA REGIÃO ONDE FORAM APLICADAS AS CARGAS PONTUAIS MAIS CARGA DISTRIBUÍDAS (A) E DETALHAMENTO DE TENSÕES NA REGIÃO ONDE FORAM APLICADAS APENAS AS CARGAS DISTRIBUÍDAS (B)



FONTE: AUTORES.

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 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.

**FIGURA 24:** DETALHAMENTO DE TENSÕES NA REGIÃO ONDE FORAM APLICADAS AS CARGAS PONTUAIS MAIS CARGA DISTRIBUÍDAS (A) E DETALHAMENTO DE TENSÕES NA REGIÃO ONDE FORAM APLICADAS APENAS AS CARGAS DISTRIBUÍDAS (B)



FONTE: AUTORES.

## 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, o que torna sua estrutura, um modelo de estética, eficiência estrutural e economia.

## BIBLIOGRAFIA

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 creative response to concrete cracking**.in fracture mechanics of concrete and concrete structures; 2; 973-980; International conference on fracture mechanics of concrete and 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.

# RESUMO SOBRE OS



# AUTORES



**Daniel Nelson Maciel**

[dnmaciel@ect.ufrn.br](mailto:dnmaciel@ect.ufrn.br)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2000), com mestrado em Engenharia Civil e ênfase em Engenharia de Estruturas, pela Universidade de São Paulo (2003). Doutorado na mesma área pela Universidade de São Paulo (2008), tendo realizado estágio doutoral na Universidade de Cambridge, no Reino Unido. Possui experiência como engenheiro de Estruturas Aeronáuticas (Stress Engineer), tendo trabalhado nas empresas Akaer Engenharia, Aernnova Engineering e Boeing Company. Atualmente, é Professor Associado na Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN e Professor permanente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) da UFRN. Suas áreas de interesse incluem formulações não lineares no Método dos Elementos Finitos, Análise Dinâmica de Estruturas, Termomecânica e Hiperelasticidade.

**Eduardo Bicudo de Castro Azambuja**

[ebcazambuja@azmb.com.br](mailto:ebcazambuja@azmb.com.br)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Brasília (UnB) em 1991, com especializações em Tecnologia para Uso do Aço pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Gestão Empresarial pelo UniCEUB, e Avaliações e Perícias em Engenharia pelo Instituto de Educação Tecnológica De Luca Daher. Possui também mestrado em Tecnologia pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (FAU-UnB). Possui experiência na área de Engenharia Civil, com foco em Estruturas Metálicas e Concreto Armado, atuando em projetos, reforço e recuperação estrutural. Atualmente, é professor no Instituto de Pós-graduação (IPOG).

**Eduardo Valeriano Alves**

[eduardovalerianoalves@gmail.com](mailto:eduardovalerianoalves@gmail.com)

Graduado em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas pela UERJ (1983), possui Mestrado em Engenharia Civil com especialização em Estruturas pela COPPE/UF RJ (1994) e Doutorado em Engenharia Civil pela UFF (2009). Atualmente, é Professor Associado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense (UFF). Com vasta experiência na área de Estruturas, sua atuação concentra-se em projetos, construção e reabilitação de pontes e viadutos, com especial destaque para a utilização de concreto protendido.

**Fernanda Karen Melo da Costa**  
[fernandakmcosta@gmail.com](mailto:fernandakmcosta@gmail.com)

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2018), mestrado em Engenharia Civil pela mesma instituição (2021), além de formação técnica em Tecnologia da Informação com ênfase em Informática para Internet (2013) e em Edificações (2013), ambos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Instituto Federal do Rio Grande do Norte, respectivamente. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com foco em Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: pontes de concreto, fator de distribuição de cargas, alargamento de pontes, e Método dos Elementos Finitos (MEF).

**Flávia Moll de Souza Judice**  
[flaviamoll@poli.ufrj.br](mailto:flaviamoll@poli.ufrj.br)

É graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (1994), com mestrado (1998) e doutorado (2002) em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ. Desde 2006, atua como professora no Departamento de Estruturas (DES) da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Sua experiência é voltada para a área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas de Concreto, trabalhando especialmente com concreto armado e protendido, pontes e pré-fabricados. Atualmente, exerce o cargo de Chefe do Departamento de Estruturas (DES) e é Representante Titular no Conselho de Ensino de Graduação (CEG) da UFRJ.

**Gláucyo Santos**  
[glaucyo.santos@gmail.com](mailto:glaucyo.santos@gmail.com)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia (1993) e possui mestrado em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília (2003). Possui experiência na área de Engenharia Civil, com foco em Métodos Numéricos, e trabalha principalmente com os temas de software educativo, ensino de engenharia, elementos finitos e método das forças. Também atua na elaboração de projetos e reforços em estruturas metálicas, concreto armado e protendido, voltados para obras de infraestrutura e edificações.

### **Iberê Pinheiro de Oliveira**

[iberep@gmail.com](mailto:iberep@gmail.com)

Graduado em Engenharia Civil pela UFMG (1995), com mestrado (2019) e doutorado (2023) em Arquitetura na área de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade pela PPGFAU/UnB, com publicações focadas no ciclo de vida dos imóveis, mecanismos de degradação, desempenho, obsolescência e depreciação. Pós-graduado em Auditoria, Avaliações e Perícias pelo IPOG e em Projeto, Execução e Manutenção de Edificações pelo UniCEUB. É membro efetivo e revisor da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), participando da elaboração de normas como a ABNT NBR 14653 (Avaliação de bens), ABNT NBR 6118 (Projeto de estrutura de concreto) e ABNT NBR 15200 (Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio), entre outras. Atuou como Vice-Presidente do IBAPE/DF, é filiado ao ICOMOS-DF e pesquisador do Laboratório do Ambiente Construído (LabRAC). Com experiência em diversas áreas da construção civil, já inspecionou mais de 1.000.000 metros quadrados, e trabalhou com projetos e cálculos estruturais em concreto, madeira e aço, além de execução de obras. É autor do livro 'Como Cuidar do Seu Imóvel'.

### **João da Costa Pantoja**

[joaocpantoja@gmail.com](mailto:joaocpantoja@gmail.com)

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Brasília (1991), com mestrado em Estruturas e Construção Civil pela mesma instituição (2003) e doutorado em Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) (2012), tendo realizado estágio doutoral na University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, Estados Unidos. Completou o pós-doutorado na Universidade do Porto - FEUP (2018). Desde agosto de 2014, é Professor Adjunto do Departamento de Tecnologia na área de Estruturas da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Sua atuação acadêmica inclui especialização em modelos numéricos aplicados a estruturas, patologia das estruturas, inspeções especializadas, reabilitação estrutural para conservação patrimonial, modelos multicritérios para avaliação de imóveis urbanos e bens singulares, e modelos para certificação de empreendimentos. Na área profissional, foi responsável pela implementação do processo AGÊNCIA 93 nas agências bancárias do centro-oeste, nordeste e norte do Brasil pelo grupo ITAÚ, realizando inspeções preliminares, execução de planilhas de serviços, fiscalização e gerenciamento de obras de 1992 a 1995. Coordenou projetos para a implantação do trecho subterrâneo do METRO/DF na Asa Sul, incluindo oito estações enterradas e a execução completa do túnel em Brasília/DF, de 1996 a 2000. Acumulou aproximadamente 200 anotações de responsabilidade técnica (ARTs) relativas a consultoria técnica, execução e gerenciamento de obras, projetos civis em edificações, laudos

técnicos, pareceres e perícias entre 1992 e 2022. É coordenador do Laboratório de Reabilitação do Ambiente Construído (LabRAC) da Universidade de Brasília e tem coordenado diversos projetos de pesquisa nas áreas de Arquitetura e Engenharia focados na reabilitação de edificações.

**Joel Araújo do Nascimento Neto**

[joel.neto@ufrn.br](mailto:joel.neto@ufrn.br)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (1996), com mestrado (1999) e doutorado (2003) em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas, ambos pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Atualmente, é Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PEC/UFRN). Possui experiência na área de Engenharia Civil com foco em Estruturas de Concreto e Alvenaria, trabalhando principalmente com modelagem de edifícios, alvenaria estrutural, painéis de contraventamento e interação parede-viga.

**José Neres da Silva Filho**

[jneres@ect.ufrn.br](mailto:jneres@ect.ufrn.br)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) (1996), com mestrado (2000) e doutorado (2005) em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília (UnB), tendo realizado parte do doutorado na North Carolina State University (NCSU), EUA (2002/2004). Possui também MBA Executivo em Gerência e Controle de Projetos pela Universidade Gama Filho (UGF) (2007). Atuou como consultor do DNIT em Obras de Arte Especiais, incluindo pontes, estruturas de contenção e viadutos. Foi Professor Adjunto e Diretor de Planejamento e Infraestrutura na Universidade Federal de Roraima (UFRR), onde coordenou o planejamento e a construção das obras de Reestruturação Universitária (REUNI) e presidiu várias comissões de licitações (CPL-UFRR). Também foi consultor do Conselho de Trânsito do Estado de Roraima (CETRA-RR). Foi Professor Adjunto na Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN e, atualmente, é Professor Associado no Departamento de Engenharia Civil e na Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Planejamento e Controle de Obras, Licitação de Obras Públicas, Estruturas de Concreto Armado e Protendido, Patologia das Estruturas, Projeto de Edifícios, Estruturas de Madeira, Projeto, Recuperação e Reforço de Estruturas, Interação Solo-Estruturas, Aerogeradores Onshore, Pontes em Concreto Armado e Protendido, e Modelagem de Estruturas.

**Karen Andreza Marcelino**  
[karen.marcelino.106@ufrn.edu.br](mailto:karen.marcelino.106@ufrn.edu.br)

É doutoranda no Departamento de Engenharia Civil, de Construção e Ambiental (CCEE) da North Carolina State University (NCSU). Possui curso técnico em Geologia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde teve bolsa de Iniciação Científica do CNPq, e mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFRN (PPCivAm/UFRN), com ênfase em Estruturas e bolsa de mestrado CAPES/DS. Tem interesse na área de Estruturas de Concreto e participou de projetos de pesquisa em Geotecnia.

**Luiz Carlos de Almeida**  
[luish.pinheiro@hotmail.com](mailto:luish.pinheiro@hotmail.com)

É engenheiro Civil formado em 1978, com mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Completou dois pós-doutorados na Universidad Castilla-La Mancha, em 2008 e 2016. Desde 1978, é Professor Associado I (MS-5.1) em Regime de Dedicção Integral à Docência e à Pesquisa (RDIDP) na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da UNICAMP. Leciona no curso de Graduação em Engenharia Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e no curso de Formação de Especialista em Estruturas de Concreto Armado. Foi Vice-Prefeito da Cidade Universitária Zeferino Vaz da UNICAMP, Chefe do Departamento de Estruturas da FEC/UNICAMP e Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Civil. Também coordenou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil de 2018 a 2021 e atualmente é Coordenador do Curso de Formação de Especialista em Projetos de Estruturas de Concreto Armado. Sua experiência na área de Engenharia Civil é focada em Estruturas de Concreto Armado, com ênfase em análise estrutural, diagnóstico estrutural, patologias das estruturas de concreto armado, análise inversa e monitoração estrutural.

**Leandro Mouta Trautwein**  
[leandromt@unicamp.br](mailto:leandromt@unicamp.br)

Possui graduação em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (1998), mestrado em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília (2001) e doutorado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2006). Obteve o título de Livre Docência em 2021 pela UNICAMP. Atualmente é professor Associado da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Análise Estrutural, atuando

principalmente nos seguintes temas: concreto armado e protendido, modelagem computacional via método dos elementos finitos, análise experimental de estruturas e monitoração de estruturas. É líder do grupo de pesquisa GMAE/Unicamp (Grupo de Monitoração e Análise Numérica de Estruturas) e do Laboratório de Modelagem Estrutural e Monitoração. Foi agraciado com o prêmio de Melhor de Tese de Doutorado em Estruturas no ano de 2008, em concurso promovido pelo Instituto Brasileiro do Concreto. Foi coordenador do Comitê Científico do Congresso Brasileiro do Concreto, por 4 anos. É membro atuante de diversas Comissões de Estudo da ABNT e do IABMAS (International Association for Bridge Maintenance and Safety) e do Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON. Autor de trabalhos e artigos técnico-científicos publicados em congressos, nacionais e internacionais e em periódicos indexados.

**Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa**

[leonardo@inojosa.com.br](mailto:leonardo@inojosa.com.br)

É graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (2003), com mestrado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília (2010) e doutorado pela Universidade de Brasília (2019) e Especialização Master em Estruturas de Edificações pela Universitat de Barcelona (2022). Atuou como chefe do Departamento de Edificações - DEDI, da NOVACAP - Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (2015-2017) e como Diretor do CEPLAN - Centro de Planejamento Oscar Niemeyer - UnB (2020-2021). Tem experiência acadêmica em Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em Tecnologia da Arquitetura, Estruturas e Representação Gráfica, atuando principalmente nos seguintes temas: arquitetura, projeto, sistema estrutural, estrutura de concreto, desenho técnico e BIM - Building Information Modeling. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT-UnB).

**Luís Henrique Bueno Pinheiro**

[luish.pinheiro@hotmail.com](mailto:luish.pinheiro@hotmail.com)

É engenheiro Civil pela Unesp de Ilha Solteira, Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica pela Unicamp, Diretor na Arcoponte Consultoria e Projetos Ltda. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia de Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: Consultoria técnica de estruturas de concreto armado, protendido, metálicas e madeiras, incluindo a interação com o solo; Inspeção, investigação, testes, avaliação do quadro patológico das estruturas e Terapia de estruturas. Cálculo Estrutural: Dimensionamentos, cálculos estruturais e elaboração de projetos estruturais básicos e executivos de obras de arte especiais, estações

ferroviárias e metroviárias, obras enterradas, portos, dentre outras obras de infraestrutura e de edificações, industriais e residenciais; Análise estrutural quanto à capacidade portante de pontes e viadutos; Estudo de Viabilização de Transporte de Cargas; Reforço de pontes e outras estruturas por várias técnicas, dentre elas Protensão Externa e Fibras de Carbono; Estruturas mistas de madeira e concreto; Uso de cálculo pelo Método dos Elementos Finitos; Ensaio e Testes Estruturais: Provas de carga; Instrumentação de estruturas; Avaliação de dados adquiridos; Ensaio destrutivo e não destrutivo em estruturas metálicas, madeiras, concreto armado e protendido; Testes e provas de carga em solos, estruturas de fundação e estruturas enterradas; Demais: Desenvolvimento de projeto estrutural de edificações comerciais e residenciais multifamiliares (conjuntos residenciais); Desenho técnico 2D e 3D em softwares CAD, como AutoCAD e ArchiCAD (plataforma BIM). Projetos de estruturas e fundação.

**Márcio Augusto Roma Buzar**  
[marcio.buzar@gmail.com](mailto:marcio.buzar@gmail.com)

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (1994), com mestrado (1996) e doutorado (2004) em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília (UnB). É Professor Associado na UnB, onde coordenou o Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura (PPG-FAU-UnB) de 2013 a 2015. Tem ampla experiência em Engenharia Civil, com destaque para projetos de Segurança Estrutural e participação no Projeto REUNI, no qual projetou e coordenou mais de 250 mil m<sup>2</sup> nos campi da UnB. Desde 2005, leciona no Programa de Pós-Graduação da FAU-UnB nas áreas de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, e sistemas estruturais. É coordenador da Linha de Pesquisa Estrutura e Arquitetura e ministra a disciplina Patologia das Construções na Pós-Graduação. Colabora com a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros do DF, com foco em monitoramento de áreas de risco. Suas pesquisas incluem a reabilitação de Obras de Arte Especial (OAEs) e o estudo de novos materiais como concreto translúcido, leve e colorido, além do uso de resíduos da construção (RCD) e EPS. Investiga a integração entre projetos estruturais e arquitetônicos e estuda a estruturação das obras de Oscar Niemeyer. Recentemente, tem se dedicado à sustentabilidade na construção e à computação gráfica aplicada às estruturas. Com formação em mecânica das estruturas, atua principalmente em análise estrutural de edifícios, análise plástica limite e métodos dos elementos finitos. Foi Diretor do Departamento de Estradas e Rodagens do Distrito Federal (DER-DF) em 2018, coordenando a reabilitação do Viaduto do Eixo Rodoviário Sul (Eixão) e a construção da Saída Norte de Brasília, que inclui mais de 27 viadutos e pontes. Também propôs metodologias para a análise de OAEs, auxiliando na recuperação de patrimônio moderno. Atuou como Diretor de Edificações da NOVACAP (2015-2017), coordenando centenas de obras públicas em Brasília.

Foi agraciado com a Medalha da Defesa Civil do Distrito Federal, o Título de Comendador do Corpo de Bombeiros do DF e a Medalha Mérito Segurança Pública da Secretaria de Estado de Segurança Pública do DF. Atualmente, realiza pós-doutorado na FEUP, Universidade do Porto, Portugal, sob a orientação do Professor Catedrático Humberto Varum.

**Marcos Henrique Ritter de Gregório**

[marcos@ritter.arq.br](mailto:marcos@ritter.arq.br)

MESTRE em Tecnologia pelo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (UnB - 2010). PROFESSOR da Faculdade de Tecnologia do Centro Universitário de Brasília - CEUB. Sócio das empresas "Construtora Ritter", "Victum Manutenção Predial" e "AlugaDF". CONSULTOR da "Projetos Consultoria Integrada" na área de edificações. Possui graduação em ARQUITETURA E URBANISMO pelo Centro Universitário de Brasília (UniCEUB - 2006). Concluiu 50% do curso de graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade de Brasília (UnB - 1998-2001).

**Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro**

[mayraperlingeiro@id.uff.br](mailto:mayraperlingeiro@id.uff.br)

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFRJ) e doutorado em Engenharia Civil pela UFRJ. É professora associada DE, com atuação nos cursos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil da UFF, vice-coordenadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFF desde 2021; Editor-chefe da Revista Científica Engevista desde 2023; professora colaboradora na Escola Politécnica da UFRJ. Participou do Comitê da ABNT/CEE-231 no Projeto de Revisão ABNT NBR 7187:2021 e ABNT NBR 6118:2023. Diretora técnica do IBRACON da Regional Rio de Janeiro biênio 2021-2023 e 2023-2025. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas de Concreto, atuando principalmente nos seguintes temas: projetos de engenharia, análise estrutural, concreto armado, concreto protendido, concretos especiais, reforço estrutural e pontes. Coordenou projeto sobre Comportamento de Elementos Estruturais em Concreto Armado e Protendido na UFF. Suas publicações têm como foco temas relacionados ao comportamento de elementos estruturais em concreto armado e protendido, reforço com materiais compósitos de resina e fibras em elementos estruturais de concreto e dimensionamento de pontes. É membro do projeto de pesquisa Metodologias e Processos Inovadores com Foco na Redução de Patologias e Melhoria do Desempenho dos Materiais de Construção cadastrado na plataforma Sucupira.



**Naiara Guimarães de Oliveira Porto**

[naiara.porto@aluno.unb.br](mailto:naiara.porto@aluno.unb.br)

Doutoranda na área de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, financiada, parcialmente, pela FAP/DF. Possui mestrado em Reabilitação Estrutural de Edifícios pela Universidade de Coimbra (2020). Especialização em Reabilitação Ambiental e Sustentável Arquitetônica e Urbanística (em andamento). Graduação em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de Brasília (2016). Atua na área de engenharia civil, com ênfase em análise e reabilitação estrutural, patologias das estruturas e engenharia diagnóstica, com a realização de perícias, inspeções especializadas e elaboração de laudos e projetos. Realizou trabalhos e publicações relacionados aos estudos de concreto armado, metodologias de análise de danos em edificações e em patrimônios culturais. Atualmente faz parte como pesquisadora colaboradora do Laboratório de Reabilitação do Ambiente Construído (LabRAC) da Universidade de Brasília.

**Olímpia Loures Vale Pujatti**

[olimpia.ufop@gmail.com](mailto:olimpia.ufop@gmail.com)

Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2020), MBA em Gerenciamento de Projetos pela FGV (2015) e Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (2010). Trabalhou durante 6 anos na área de planejamento e qualidade em obra de construção de estação metroviária. Atualmente é professora do curso de Engenharia Civil na Universidade Potiguar.

**Patrícia Caroline Souza da Rocha Vieira**

[patriciavieira88@yahoo.com.br](mailto:patriciavieira88@yahoo.com.br)

Engenheira civil formada desde 2016; pós graduada em Auditoria, Avaliações e Perícias de Engenharia em 2019; pós graduada em Construções Sustentáveis e Ecurbanismo em 2020; Pós graduada em Patologia das construções em 2021; Pós graduanda em BIM Management; Atualmente trabalhando com obras de pequeno e médio porte em concreto armado e estrutura metálica; Obras executadas e serviços executados: Galpões em estrutura metálica Prédio em estrutura mista (concreto armado e estrutura metálica) Prédio residencial em concreto armado Laudos técnicos Serviços de manutenção predial.

**Paulo Robert Santos Machado**

[robertsm@gmail.com](mailto:robertsm@gmail.com)

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Paulista (2010) e Mestrado em Arquitetura e Urbanismo pela universidade de Brasília (2024). Atualmente é analista de gestão e fiscalização rodoviária - Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Rodoviária, Projetos e Construções.

**Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva**

[salenojure@hotmail.com](mailto:salenojure@hotmail.com)

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (2009), com Mestrado e Doutorado em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília. Trabalhou como Gerente de Projetos na VALEC por 8 anos. Atualmente, é Professor Adjunto no curso de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UnB), onde leciona Mecânica dos Sólidos, Teoria das Estruturas e Projeto de Pontes. É membro do Comitê Brasileiro de Normalização Metroferroviário (CB-06) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e participou de 18 congressos e seminários científicos no Brasil e no exterior. Atua como revisor para revistas como a Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (RIEM), Applied Mathematical Modelling e Frattura ed Integrità Strutturale. Tem experiência em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas Metálicas, Ferrovias, Dinâmica, Estruturas de Concreto, Pontes, Problemas Inversos e BIM. É membro do IABMAS (International Association for Bridge Maintenance and Safety) e do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto). É autor de artigos e periódicos científicos apresentados em congressos nacionais e internacionais.

**Ricardo Valeriano**

[eduardovalerianoalves@gmail.com](mailto:eduardovalerianoalves@gmail.com)

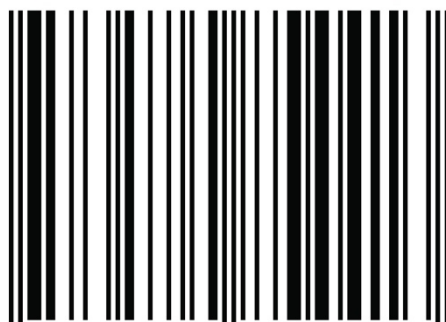
Professor associado da Escola Politécnica da UFRJ. Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (1985). Possui Mestrado (1989) e doutorado (1995) em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ no programa de Estruturas. Atuação em Mecânica das Estruturas, Pontes, Concreto Protendido e Estabilidade Elástica.

**Rodrigo Barros**  
[barrosrn@ufrn.edu.br](mailto:barrosrn@ufrn.edu.br)

Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo (2009) e Doutorado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela mesma instituição. Foi bolsista da CAPES e do CNPq durante o Mestrado e o Doutorado no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Atualmente é Professor Adjunto IV da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Projetos de Estruturas e Projetos de Fundação. Foi professor do curso de Engenharia Civil das Faculdades Integradas de Araraquara, do curso de Especialização em Engenharia de Estruturas da UNILINS e do curso Especialização em Estruturas de Concreto e Fundações do INBEC - Instituto Brasileiro de Educação Continuada até o ano de 2013. Como pesquisador, atua principalmente nos seguintes temas: modelo de Bielas e Tirantes, Fundações, Bloco sobre estacas e Modelos de Cálculo para Força Cortante.

ISBN: 978-65-84854-41-3

**CR**



9 786584 854413