

A IMPORTÂNCIA DA FORMA ESTRUTURAL: OBRAS DE MAILLART E MENN

The importance of structural forms: Maillart and Menn's works

Tiago Ferreira Campos Neto ¹, Jéssica Faria Brandão ², José Manoel Morales Sánchez ³

Recebido em 08 de fevereiro de 2018; aceito em 20 de maio de 2018; disponível on-line em 02 de agosto de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Robert Maillart;
 Christian Menn;
 Formas estruturais;
 Aspectos projetuais;
 Análise computacional.

KEYWORDS:

Robert Maillart;
 Christian Menn;
 Structural forms;
 Design aspects;
 Computational analysis.

RESUMO: As estruturas fornecem a chave para o renascimento da vida pública. Essa nova visão levou à criação de uma nova classe de profissionais, os engenheiros modernos. Entre eles, destacam-se Robert Maillart e Christian Menn, que produziram obras de arte em concreto armado entre os finais do século XIX e XX. Sabendo que a primeira fase de produção de Menn foi influenciada pela arte e técnica de Maillart, este artigo busca avaliar as semelhanças nas relações forma-função e estética das obras de maior representatividade dos dois artistas estruturais por meio da aplicação de análises computacionais dos aspectos projetuais. A ponte Salginatobel, obra de Maillart, foi construída em 1930 e desde então tem sido reconhecida por sua impressionante nova forma de arte e pela sua eficiência econômica e estrutural. A ponte Ganter, obra de Menn, possui qualidade estética sem violar as considerações técnicas, tendo o maior vão livre das pontes da Suíça. Por meio de análises computacionais simplificadas as duas pontes foram estudadas e notou-se que Menn usa a técnica de caixão perdido criada por Maillart para vencer grandes vãos, entretanto os momentos fletores atingiram valores elevados, exigindo que o artista usasse do sistema de protensão para executar sua obra. Observou-se semelhança na estética entre as obras analisadas e no comportamento dos esforços internos, atestando que Menn, ao projetar sua obra, espelhou-se nas formas estruturais criadas por Maillart.

ABSTRACT: Structures provide the key to revive the public life. This new vision led to the creation of a new class of professionals, the modern engineers. Among them, Robert Maillart and Christian Menn stand out because both produced reinforced concrete works of art between the late nineteenth and twentieth centuries. Considering that the first Menn's production phase was influenced by Maillart's art and technique, this paper aims to evaluate the similarities in the form-function and aesthetic relations between the most representative works of these two structural artists through the application of computational analysis of design aspects. The Salginatobel Bridge, Maillart's work, was built in 1930 and has been recognized for its impressive new art form and its economic and structural efficiency since then. The Ganter Bridge, Menn's work, has aesthetic quality without violating technical considerations and with the largest span of Switzerland bridges. By means of simplified computational analysis the two bridges were studied and it was noticed that Menn uses Maillart's hollow-box technique to overcome large spans, however the bending moments reached high values, requiring the usage of a pretension system. Similarities were observed in the aesthetics between the analyzed bridges and in the behavior of the internal efforts, attesting that Menn's work was mirrored in Maillart's structural forms.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: tiagocampos.eng@gmail.com (T. F. Campos Neto)

Engenheiro civil, Doutorando em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília.

² e-mail: jessicaabrandao@gmail.com (J. F. Brandão)

Arquitetura e Urbanista.

³ e-mail: sanchez@unb.br (J. M. M. Sánchez)

Engenheiro civil, Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas fornecem a chave para o renascimento da vida pública. Essa nova visão surgiu com a Revolução Industrial e seus novos materiais, ferro industrializado, que trouxeram quatro novas utilidades como as ferrovias. Esses eventos levaram diretamente à criação de uma nova classe de pessoas, os engenheiros modernos. As disciplinas da arte estrutural são eficiência e economia, e sua liberdade fundamenta-se no potencial que o designer tem de expressar seu estilo próprio, motivado pela consciência estética em busca da elegância da engenharia. Portanto, os três ideais principais da arte estrutural são eficiência, economia e elegância (BILLINGTON, 1983).

A história da arte estrutural se divide em dois grandes períodos. O primeiro período seguiu os calcanhares da Revolução Industrial, iniciando no final do século XVIII e se desdobrando pelo mundo ao longo dos cem anos seguintes. Durante esse período, o principal material de construção era o ferro. Os engenheiros estruturais começaram a projetar pontes de maior dimensão e mais resistentes, como por exemplo, a Ponte do Brooklyn, projetada e construída por John Augustus Roebling na segunda metade do século XIX. O segundo período iniciou no final desse século e continua até os dias atuais. Ao longo desse período, os materiais mais comumente utilizados são o aço e o concreto, e as formas estruturais tendem a ser visualmente mais simples, a exemplo das obras de Maillart e Menn (HU; FENG e DAI, 2014).

Um dos maiores representantes do segundo período da arte estrutural é Robert Maillart. Graduado pelo Instituto Federal Tecnológico (ETH) de Zurique na Suíça, iniciou sua carreira como projetista de ferrovias e, posteriormente, voltou seus projetos para rodovias e pontes para o serviço público de Zurique. Através de seu relevante trabalho o movimento da arte moderna formou suas ideias sobre engenharia como representação de arte.

Maillart mostrou o caminho para todos os artistas estruturais e um breve olhar sobre seu sucessor na Suíça, Christian Menn, retratará a mesma motivação e progresso à medida em que ele contempla novos designs. Menn nasceu em 1927 em Meiringen e em função do trabalho de seu pai, viveu em várias partes da Suíça. Seu pai, Simon Menn (1891-1948), engenheiro civil, na década de 20 havia trabalhado como engenheiro chefe dos operários nos dois maiores projetos de pontes de Maillart. Simon Menn e Maillart eram grandes amigos assim como sócios na engenharia (BILLINGTON, 1983).

Menn formou-se no Instituto Tecnológico de Zurique como engenheiro civil em 1950. De 1950 a 1953, trabalhou para empresas de engenharia e construção. Em seguida, voltou ao ETH para se tornar assistente de Pierre Lardy, um conhecido professor de engenharia estrutural, e em 1956 foi premiado com o grau de doutor. Ganhou experiência prática de trabalho nas empresas de Paris e Berna antes de iniciar sua própria empresa de consultoria em 1957 (BILLINGTON, 1983).

Christian Menn apresenta em suas pontes forte influência dos projetos e técnicas de Maillart. Sua relação com as obras do artista estrutural é reflexo da proximidade do pai de Menn com Maillart, além do contato com a engenharia estrutural que via Maillart como um profissional inovador e representativo na Suíça.

1.1 OBJETIVO

Sabendo que a primeira fase de produção de Christian Menn foi influenciada pela produção de Robert Maillart, este artigo busca avaliar as semelhanças nas relações forma-função e estética existente entre as duas obras de maior representatividade desses dois artistas estruturais por meio da aplicação de análises computacionais simplificadas dos aspectos projetuais. Conhecer essa relação permite discorrer sobre como a arte estrutural é passada de artista para artista e como ela evolui no universo do avanço das tecnologias e materiais de construção. Além da estética, foi

estudado o comportamento dos esforços internos nas estruturas de maneira a compreender como um artista utilizou da técnica do seu antecessor para criar sua própria forma de arte.

2. FORMAS ESTRUTURAIS DE ROBERT MAILLART

Nascido em Berna em 1872, Robert Maillart foi discípulo de Ritter no Instituto Federal Tecnológico de Zurique e enquanto aluno aprendeu a importância de três princípios básicos lecionados pelo professor, que são: a importância do cálculo como justificação das formas mais eficientes por meio de análise simplificada; a responsabilidade do projetista, que parte desde a concepção do processo construtivo ao produto final completo e; a importância da realização de testes de carga em escala real, como forma de medir o desempenho do objeto completo no seu ambiente natural. Usando dos princípios aprendidos e após graduar-se na Suíça, o engenheiro iniciou sua carreira como projetista de ferrovias e, posteriormente, voltou seus projetos para rodovias e pontes para o serviço público de Zurique. Através de seu relevante trabalho o

movimento da arte moderna formou suas ideias sobre engenharia como representação de arte (BILLINGTON, 1983).

Em 1937, Maillart foi eleito membro honorário o Instituto Real de Arquitetos Britânicos (LAFFRANCHI e MARTI, 1997). Após suas primeiras experiências como projetista de pontes, Maillart fundou sua primeira empresa de construção em Zurique em 1902. Primeiramente, devido ao seu inovador método de construção em lajes planas de concreto, ele expandiu seus negócios até a França, Espanha e Rússia. No início da Primeira Guerra Mundial, o projetista e sua família passavam uma temporada em Riga, Letônia e ao ser impedido de retornar à Suíça, ele continuou atuando como empreiteiro no Leste Europeu. Em 1916, sua esposa acaba falecendo e, como resultado da Revolução Russa, ele perde toda sua fortuna. Como refugiados, Maillart e seus três filhos retornam a Suíça em 1919, onde começou uma nova carreira como consultor. Ao longo das duas décadas seguintes, Maillart foi extremamente produtivo e criativo tanto como projetista quanto autor de publicações científicas. A Figura 1 apresenta a linha do tempo das obras do artista.

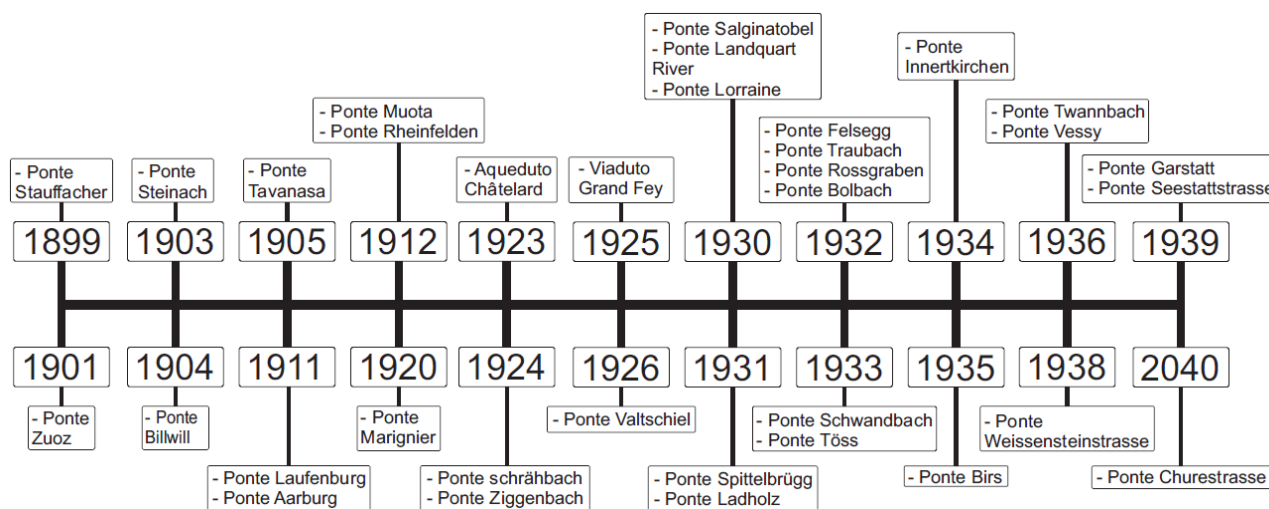


FIGURA 1: Linha do tempo das obras de Robert Maillart.

FONTE: A autoria própria.

A estrutura mais conhecida de Robert Maillart é a Ponte Salginatobel, construída em 1930. O projeto foi baseado no sistema de arco com caixão-perdido utilizado na Ponte Tavanasa em conjunto com o sistema de arco com tabuleiro rígido utilizado na Ponte Valterschielbach, porém com melhorias: o engenheiro eliminou certas referências a estilos antigos, como por exemplo os contrafortes em pedra romanos.

2.1 PONTE SALGINATOBEL (1930)

A Ponte Salginatobel foi um projeto de Maillart submetido ao concurso lançado no verão de 1928 para ligar os vilarejos de Schuders e Schiers no cantão suíço de Graubünden (Figura 2). Desde sua construção em 1930, a ponte de 90,0 m de vão construída a 80,0 m de altura acima do ribeiro Salgina, tem recebido considerável prestígio: enquanto uns têm celebrado sua impressionante nova forma de arte, outros têm enfatizado sua brilhante eficiência econômica e estrutural (FIVET e ZASTAVNI, 2011). Maillart venceu a competição porque seu design era o mais barato dos dezenove projetos submetidos – a ponte e a pista de rolamento custaram apenas 700.000,00 francos suíços. Em 1991, a obra-prima de Maillart foi declarada como um marco histórico internacional da engenharia civil pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis (LAFFRANCHI e MARTI, 1997).



FIGURA 2: Ponte Salginatobel.
FONTE: STRUCTURAE (2017).

Para Gauvreau (2007), o impacto visual da Salginatobel é forte o suficiente para garantir que a significância estética da ponte seria mundialmente reconhecida, independentemente do quanto ela custaria. O fato de que ela nunca teria sido construída se não fosse o custo de execução enriquece sua significância e a transforma de uma ponte meramente bela em um símbolo vivo da forma do espírito criativo do ser humano. O fato de ela ter sido projetada sem a intervenção de nenhum arquiteto a torna uma obra particularmente relevante para todos os engenheiros civis.

Esta obra reúne os três critérios que fazem dela uma obra de arte estrutural, e foi inspirado nos princípios aprendidos em seus trabalhos anteriores que Maillart pensou essa obra. A Figura 3 apresenta um desenho aparentemente feito pelo próprio Robert Maillart em 1928 durante a concepção da obra.

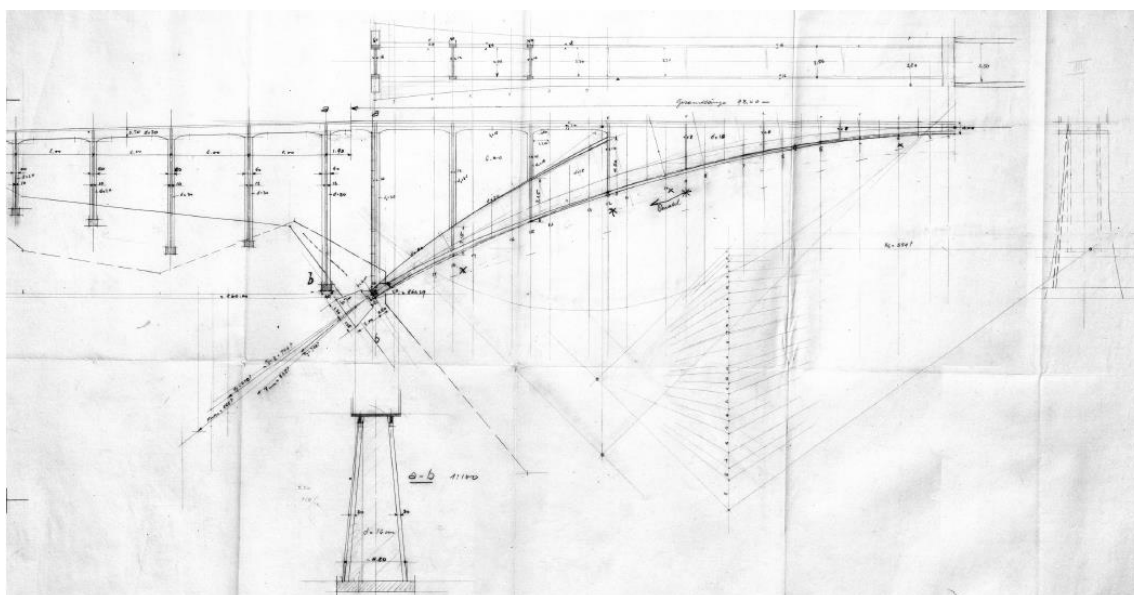


FIGURA 3: Primeiros croquis realizados por Robert Maillart em 1928.
FONTE: FIVET e ZASTAVNI (2011).

Começando a partir de uma página em branco, o primeiro passo do processo do projeto foi definir as principais características morfológicas da ponte de acordo com os dados iniciais que consistiam na geometria do desfiladeiro e do comportamento mecânico e a altura estimada do tabuleiro. De acordo com Heinrich (2000), o desfiladeiro de Salgina é muito íngreme e as paredes rochosas de arenito são frágeis, portanto por esse motivo, foi feita a escolha de um arco tri articulado. Essa técnica permite um pequeno movimento nos apoios sem produzir fissuras consideráveis na estrutura. Entretanto, a altura do tabuleiro e a ligeira inclinação do desfiladeiro do lado do vilarejo de Schiers sugeriu que o tabuleiro fosse suportado por paredes transversais regularmente intercaladas que conectassem o arco ao tabuleiro. Esse recurso já havia sido usado por Maillart nas suas pontes anteriores.

O sistema de arco em caixão-perdido utilizado na Ponte Tavanasa do ano de 1905 constituído de seções variáveis em formato de “U” também foi utilizado na Salginatobel (Figura 4). Inicialmente, Maillart reproduziu a mesma relação vão/altura da ponte anterior (51,0/5,5 m) no novo projeto (96,4/10,4 m), conforme apresentado na Figura 5. Entretanto, essas proporções foram rapidamente substituídas por uma relação menos esbelta de 90,0 m por 13,0 m. Essa proporção se adequa ao relevo do desfiladeiro também ficando

harmônico com o intervalo de 6,0 m entre as paredes transversais. A escolha desse intervalo, duas vezes maior do que os utilizados anteriormente por Maillart, foi aparentemente definida pela influência estética, além de controlar as seções das lajes, a espessura do tabuleiro, o número de colunas sobre o arco e os locais onde as paredes longitudinais encontram as lajes.

Segundo Fivet e Zastavni (2011), a escolha de uma ponte com arco tri articulado tem influência sobre o processo de concepção, pois desse modo a estrutura pode ser estaticamente calculada por simples equações de equilíbrio de forças em uma de suas metades. Outro problema desse tipo de ponte é o ajuste necessário da geometria, a fim de reduzir os momentos de flexão no arco. Esses momentos são resultantes das excentricidades existentes entre a linha de compressão e a linha dos centroides das seções transversais. A linha de compressão é a linha de ação da força resultante dos esforços de compressão de cada seção transversal – ela representa o fluxo de cargas ao longo do arco. As excentricidades são intencionalmente reduzidas até produzirem o mínimo de flexão no arco. Ao eliminar as excentricidades, há a garantia de que o concreto será igualmente comprimido em qualquer lugar das seções e, considerando apenas os critérios da compressão, o volume de concreto poderia ser otimizado.

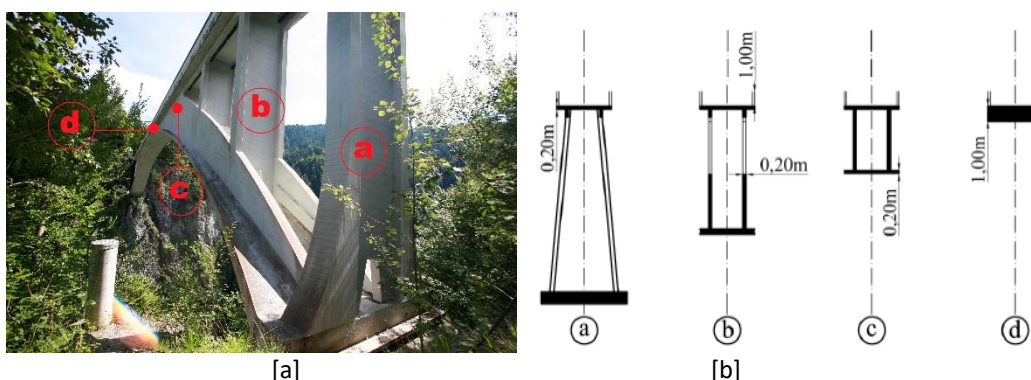


FIGURA 4: [a] Seções variáveis em forma de “U” da Ponte Salginatobel e [b] sua representação gráfica.

FONTE [a]: Adaptada de WIKIMEDIA (2009).

FONTE [b]: FIVET e ZASTAVNI (2011).

Como de costume, Maillart usou de métodos grafostáticos para atingir esse objetivo. A linha de compressão é obtida por meio da construção simultânea de dois diagramas recíprocos: o diagrama espacial, responsável por garantir o equilíbrio rotacional; e o diagrama de forças, garantindo o equilíbrio dos esforços de translação. Cada fora de um diagrama tem uma correspondente paralela no outro diagrama (Figura 6).

3. FORMAS ESTRUTURAIS DE CHRISTIAN MENN

Christian Menn foi fortemente influenciado pelas obras de Maillart, pois seu pai Simon Menn (1891-1948), foi engenheiro civil na década de 20 e havia trabalhado como engenheiro chefe dos operários nos dois maiores projetos de pontes de Maillart. Simon Menn e Maillart eram grandes amigos assim como sócios na engenharia. Menn trabalhou em estreita

colaboração com Pierre Lardy durante o início de sua carreira, com ênfase na concepção de estruturas baseadas em estética e economia (BILLINGTON, 1985).

O turismo na economia suíça tem uma forte influência sobre os tipos de pontes que são construídas. Ao escolher um projeto de ponte, os líderes suíços priorizam as características estéticas. As pontes visualmente atraentes desenhadas por Menn foram vistas como uma grande oportunidade.

Christian Menn é membro da Sociedade Suíça de Engenheiros Cívicos (SIA), do Grupo de Comércio Suíço de Ponte e Engenharia de Construção, da Associação Internacional de Pontes e Engenharia Estrutural (IABSE) e da Comissão Suíça de Estruturas de Concreto armado e protendido. Sua obra, apresentada na Figura 7, é mundialmente admirada, sendo Menn o último e único vivo artista estrutural reconhecido por David Billington.

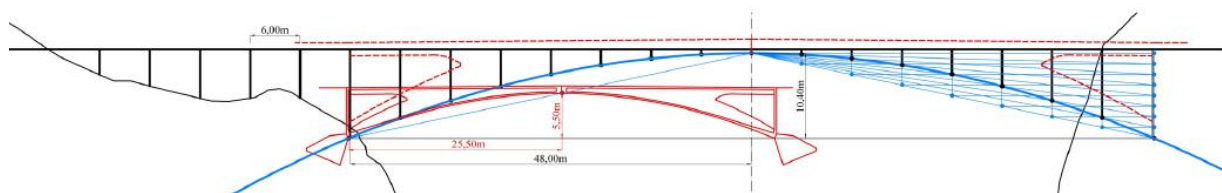


FIGURA 5: A Ponte Tavanasa (em vermelho) e a relação altura/vão inicial da Ponte Salginatobel (em azul).
FONTE: FIVET e ZASTAVNI (2011).

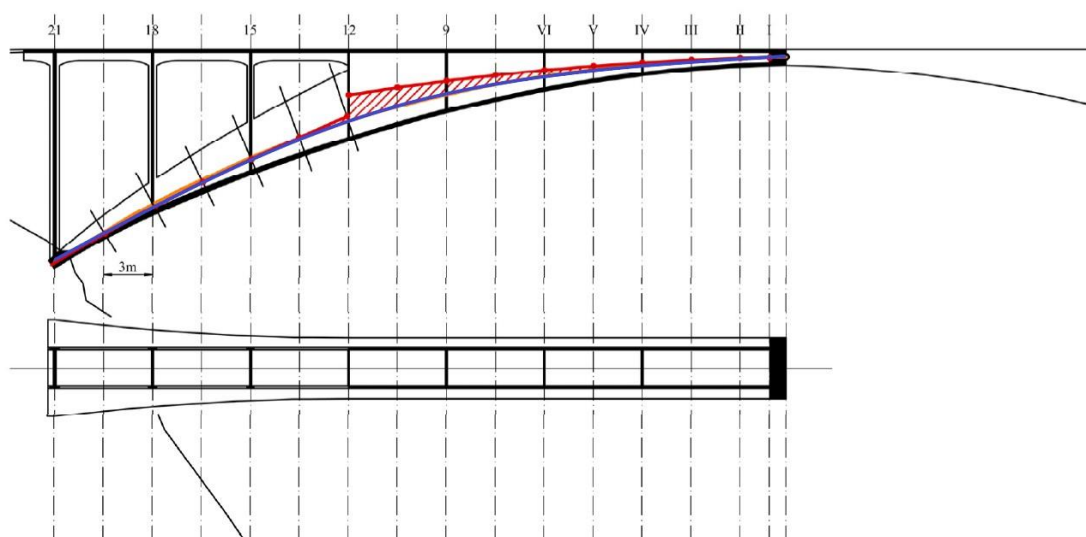


FIGURA 6: Linha dos centroides em vermelho, linha de compressão em azul e excentricidades em hachura vermelha.
FONTE: Adaptada de FIVET e ZASTAVNI (2011).

Menn afirma que a ponte deve ser compatível com seu ambiente e visualmente agradável. Como engenheiro, ele sente que uma responsabilidade do design da estrutura para que ela se adeque ao seu ambiente em vez de dar-lhe somente uma forma. Um projeto que seja compatível com o meio ambiente em termos de forma, material, procedimento de construção e caráter terá um impacto negativo muito reduzido no entorno. Menn exibiu esse conceito no projeto da Ponte Ganter.

Para ele a economia, facilidade de manutenção e segurança giravam em torno da estética. Desse modo, o engenheiro se torna capaz de alcançar segurança e facilidade de manutenção por meio da compreensão dos princípios científicos subjacentes, já a economia e a elegância são alcançadas através de ideias não científicas.

Menn descreve suas pontes com modelos teóricos e abstratos que lhe permitem analisar pontes e encontrar tensões e distribuição das forças dentro da estrutura. Com base neste quadro, ele é capaz de elaborar cálculos numéricos que podem eventualmente ser utilizados em modelos de computador das estruturas.

3.1 PONTE GANTER (1980)

A ponte Ganter é uma estrutura estaiada de 678,0 m de comprimento construída em 1980 no Estado Soberano de Valais na Suíça. A ponte possui qualidade estética, sem violar as

considerações técnicas, e tem o maior vão de qualquer outra ponte no país.

A ponte Ganter, situada na Estrada Nacional N-9, forma parte da passagem de Simplon a dez quilômetros ao sul de Brig, estando a uma altitude de 1.450,0 m acima do nível médio do mar. Sua construção sobre o rio Ganter permitiu que dois quilômetros do trecho da estrada velha pudessem ser ignorados (ROSSITER, 2008). Nessa obra, Menn pôde explorar novas formas utilizando o concreto armado. Os cabos de aço escondido dentro de uma viga caixão podem substituir os arcos e suportar o tráfego permitindo que as estruturas da ponte ficassem mais leves. Seu projeto anterior tinha sido a ponte Felsenau constituída por um vão de 150,0 m. O artista ficou surpreso com os valores de momento distribuídos pela ponte, pois a Ganter produzira momentos inaceitáveis que exigiam uma nova abordagem. Era preciso encontrar um projeto que atendesse às limitações de uma inclinação instável no lado sul, elevadas forças de vento acima do vale e a curva da estrada entre os dois lados. A ponte escolhida permitiu um layout de plano curvo, reduzido, fornecendo suportes intermediários de estais e era sensível às condições de declive. Apesar de ter sido fortemente impulsionado pela estética, as considerações técnicas e os requisitos estruturais se tornaram proeminentes. A Figura 8 apresenta os detalhes das dimensões da estrutura em vista e as curvaturas em planta.

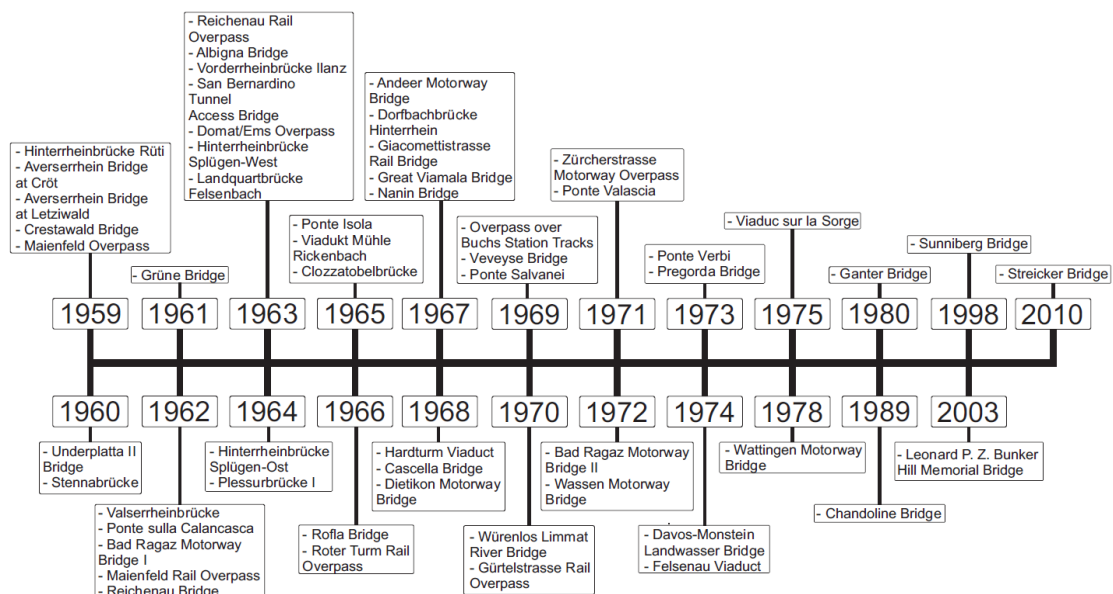


FIGURA 7: Linha do tempo das obras de Christian Menn.

FONTE: Autoria própria.

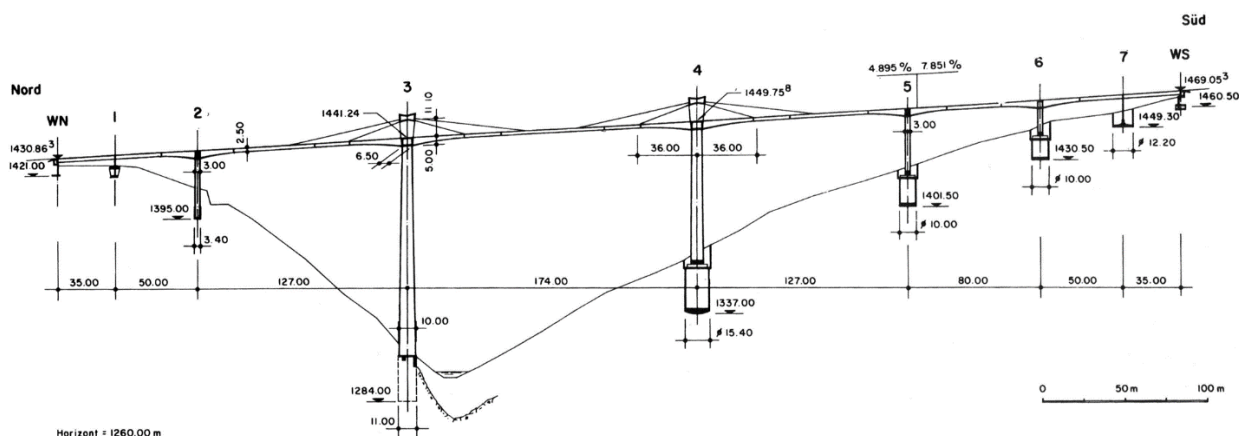


FIGURA 8: Dimensões da Ponte Ganter.

FONTE: SRP INGENIEUR AG (2017).

A opção de Menn pela construção estaiada permitiu uma curvatura plana, no entanto era preciso ser cuidadosamente elaborada para garantir que a mesma não expressasse desconforto. Pequenos vãos se encaixam bem em vales profundos, acentuando a altura das aberturas e produzindo boa proporção entre estrutura e aberturas. As difíceis condições do solo da base do vale Ganter colaboraram com as dificuldades impostas ao designer e encorajaram vãos mais longos, buscando evitar pilares na inclinação do vale (BILLINGTON, 1983).

Pilares mais perto uns dos outros facilitam o alcance do equilíbrio entre a altura e o vão da ponte. Por meio das aberturas no perfil é possível manter a mesma inclinação proporcionando a repetição ao longo do comprimento da ponte – levando em conta que o lado curvo se estende pelas diagonais. As aberturas abaixo dos “painéis estaiados” trabalham de maneira a compensar a região oculta proporcionando melhor equilíbrio e enfatizando a estética da ponte. A pista de rolamento é apoiada em uma única viga-caixão com paredes verticais que permitem os pilares apresentarem continuidade em torno da plataforma (Figura 9). Todos os serviços executados dentro da plataforma estão ocultos de modo a criar uma superfície visualmente lisa. O sistema de viga-caixão utilizado na Ganter foi claramente inspirado na forma estrutural criada e largamente utilizada por Robert Maillart em suas obras.

A ponte é forte e graciosa e, ao mesmo tempo em que é honesta em termos de fluxo de forças, lubrifica o observador, pois elementos que parecem fornecer suporte encobrem os que realmente fornecem. Menn criou uma estrutura monolítica emoldurada por montanhas com linhas nítidas e suaves. O concreto tem conotações de solidez e emparelhado com a aparência robusta da ponte se apresentando como o material mais adequado para as montanhas.



FIGURA 9: Pilares contínuos em torno da plataforma.

FONTE: CHRISTIAN MENN CONSULTING ENGINEER (2018).

A importante proporção tridimensional do espaço faz a obra sofrer, pois ela exhibe uma escala de perfil longitudinal e outra na seção transversal. A pista é particularmente estreita com apenas 10,0 m de largura, mas quando olhada ao longo do comprimento, a ponte parece pesada. Esta aparência é produzida pela alta escala das paredes e da viga transversal que une os dois pilares, comparada com a da plataforma. A ponte

é composta por três componentes visuais formados por linhas simples que operam em apenas três direções: pilares que se elevam verticalmente; plataforma que segue uma linha horizontal e quatro painéis estaiados simétricos e diagonais à plataforma de ancoragem (Figura 10).



FIGURA 10: Perfis transversal e longitudinal constituindo os três componentes visuais.

FONTE: STRUCTURAE (2016).

4. MÉTODOS

De forma a avaliar os critérios utilizados pelos artistas em seus projetos, a modelação computacional simplificada foi o método selecionado para analisar as obras de maior representatividade de cada artista. Uma análise simplificada do comportamento das obras mais importantes desses artistas foi realizada de maneira a compilar a forma como Menn usou da técnica de Maillart para criar sua própria arte estrutural.

A obra de maior impacto de Robert Maillart é a Ponte Salginatobel que, segundo Fivet e Zastavni (2011), após a definição a forma geométrica predominante, Maillart aplicou três técnicas distintas: a primeira enfatiza o modo

produtivo com que Maillart controlou graficamente as linhas do arco; a segunda consistiu na definição estrutural da ponte que governa a geometria do arco e seu respectivo peso e; a terceira detalha como as características dos blocos de fundação foram vetorialmente ajustados para garantir o equilíbrio. A aplicação dessas três técnicas gerou como resultado o reconhecimento dessa obra como marco histórico internacional da engenharia.

Ao tratar de Christian Menn, a obra de maior representatividade de sua primeira fase, período de produção em que o artista se inspirou nas obras de Maillart, é a ponte Ganter, que possui o maior comprimento de todas as pontes suíças. Sua forma estrutural foi definida por meio de observações das técnicas utilizadas por Maillart, principalmente no que diz respeito à sua geometria global.

Buscando facilitar a compreensão deste estudo, serão apresentadas as modelagens computacionais das pontes de Maillart; em seguida as modelagens da obra de Menn; por fim, será apresentada uma análise comparativa das estruturas que mostrará a semelhança existente entre as técnicas aplicadas pelos artistas. Suas respectivas interpretações e comentários serão apresentados no tópico de resultados e discussões.

4.1 PONTE SALGINATOBEL: MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem da obra de Robert Maillart foi realizada por meio da simulação de cargas em elementos lineares com as dimensões de altura e vão da estrutura original e algumas variações. A geometria foi propositalmente alterada com o objetivo de se desvendar alguns dos motivos que levaram o artista estrutural a optar pela relação altura/vão original. Em todas as modelagens estruturais, a carga fictícia foi considerada como distribuída por toda a extensão do tabuleiro da ponte, onde estão dispostas as longarinas. Por se tratar de uma análise simplificada, as cargas de efeito dinâmico e horizontais não foram consideradas, visto que o objetivo é determinar

alguns dos motivos que levaram o artista a optar pela geometria já descrita. As seções em “U” foram simuladas com linhas que representam os elementos responsáveis por conectar o tabuleiro ao arco, posicionados respeitando a distância de 6,0 m, conforme projeto original. Por fim, o arco foi modelado considerando-se as condições de contorno reais, isto é, bi apoiado e tri articulado, conforme apresentado na Figura 11.

De forma a avaliar a geometria definida por Maillart (relação altura/vão) ainda na década de 20, estão apresentados na Figura 12:

i) diagrama dos esforços internos normais, e;

ii) diagrama dos esforços internos cortantes. Todas essas modelagens foram realizadas em cima da geometria original da ponte.

Para complementar a análise, a ponte foi modelada com duas diferentes proporções além do original: i) diagrama de momentos fletores da ponte em proporção original (Figura 13a), ou seja, 90,0 m de vão e 13,0 m de altura; ii) diagrama de momentos fletores da ponte com 90,0 m de vão e 26,0 m de altura (Figura 13b); iii) diagrama de momentos fletores da ponte com 90,0 m de vão e 6,5 m de altura (Figura 13c).

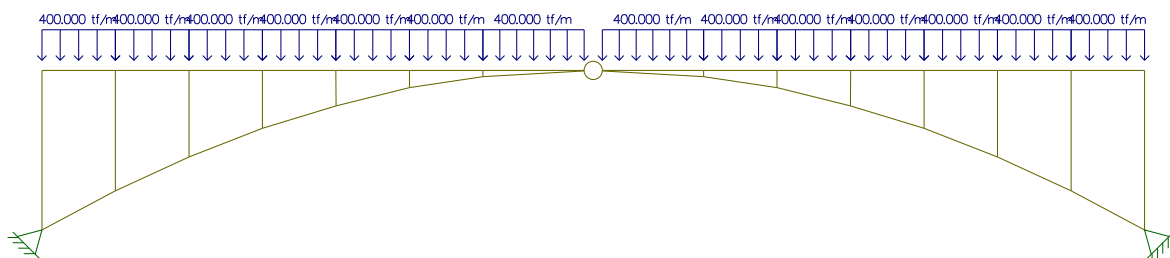


FIGURA 11: Modelagem computacional da Ponte Salginatobel: cargas e condições de contorno.

FONTE: Autoria própria.

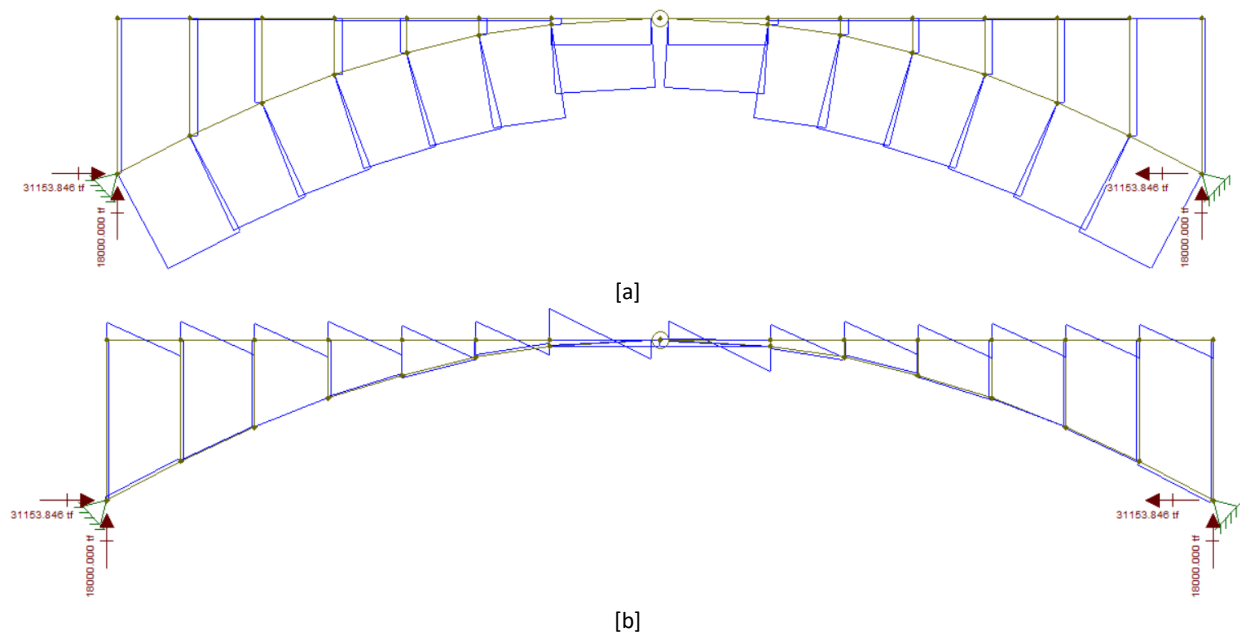


FIGURA 12: [a] Diagramas de esforços normais e [b] cortantes.

FONTE: Autoria própria.

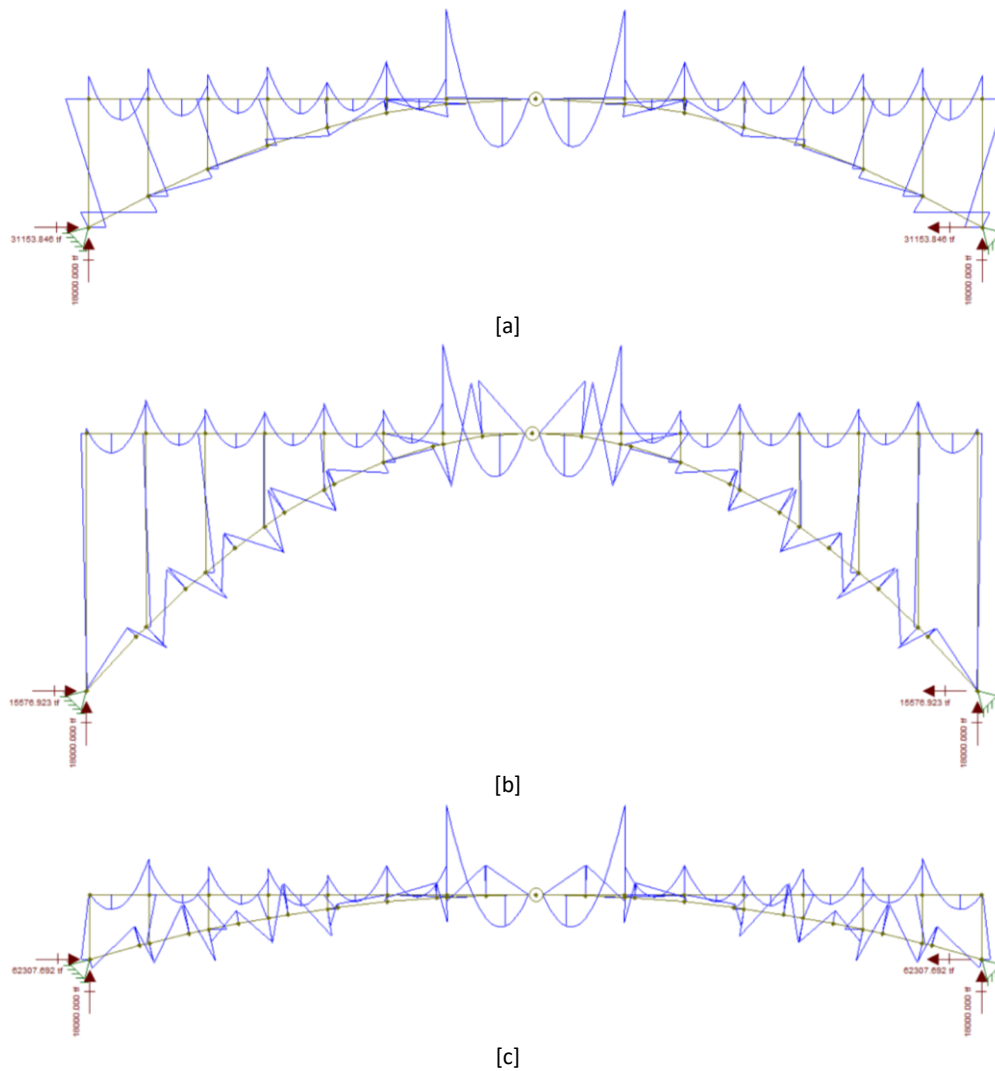


FIGURA 13: [a] Diagramas de momentos fletores das diferentes modelagens: proporções originais; [b] vão original e dobro da altura, e; [c] vão original e metade da altura.

FONTE: Autoria própria.

4.2 PONTE GANTER: MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem da obra de Christian Menn também foi realizada por meio da simulação de cargas em elementos lineares com as dimensões de altura e vão da estrutura original e algumas variações. Assim como na modelagem apresentada anteriormente, foi considerada uma carga fictícia e as peças, como a viga-caixão e os tirantes, foram representados como elementos estruturais lineares com seção padrão (Figura 14). Em todas as modelagens estruturais, as condições

de contorno foram simuladas conforme executado, os vãos foram mantidos constantes, sendo alteradas apenas as alturas dos pilares acima do tabuleiro e, conseqüentemente, os pontos de ancoragem dos tirantes dos mesmos.

Assim como na obra da Maillart, a obra de Menn passou por uma modelagem computacional traçando os esforços normais e cortantes existentes em todos seus trechos. A geometria original foi utilizada nessas modelagens e os diagramas estão apresentados na Figura 15.

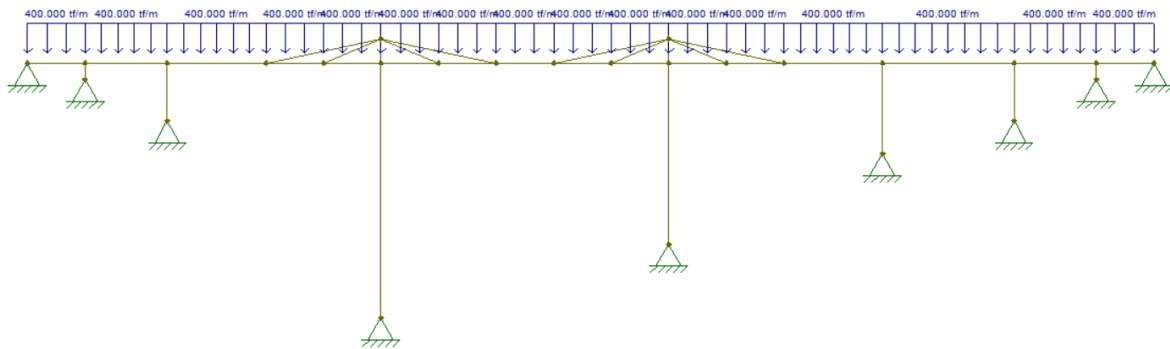


FIGURA 14: Modelagem computacional da Ponte Garter: cargas e condições de contorno.
FONTE: Autoria própria.

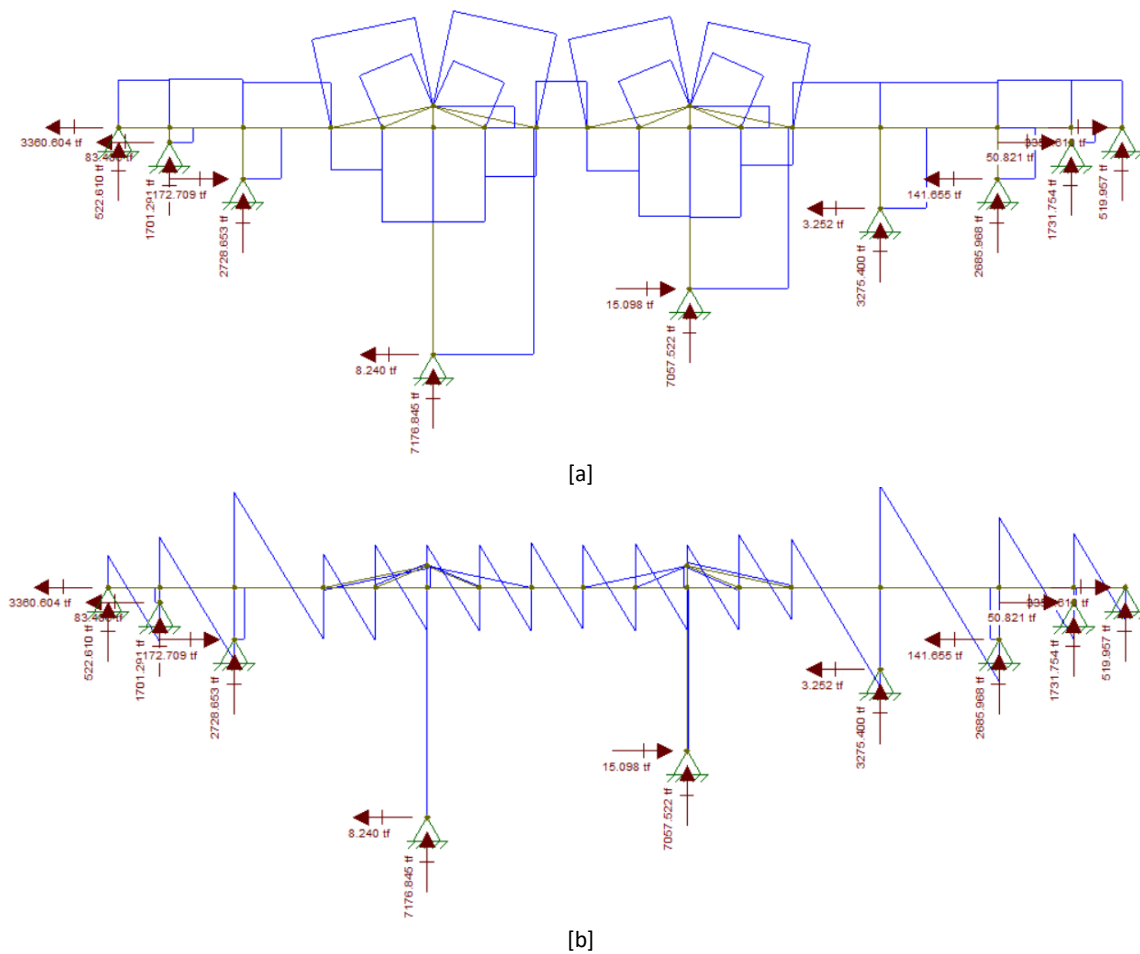


FIGURA 15: [a] Diagramas de esforços normais e [b] cortantes.
FONTE: Autoria própria.

Buscando avaliar a geometria e a influência de Maillart nas obras da primeira fase de Menn, a ponte Garter passou por modelagens computacionais (diagramas de momentos fletores) elaboradas de acordo com os seguintes critérios: i) modelo original com vão principal de 174,0 m, vãos imediatamente laterais ao principal de 127,0 m, vãos subsequentes de 80,0 m, 50,0 m e 35,0 m

à medida que se aproxima das extremidades e altura dos pilares acima do tabuleiro de 17,43 m (Figura 16a); ii) modelo com mesmas dimensões de vão do original e altura acima do tabuleiro de 34,86 m (Figura 16b); iii) modelo com mesmas dimensões de vão do original e altura acima do tabuleiro de 8,72 m (Figura 16c).

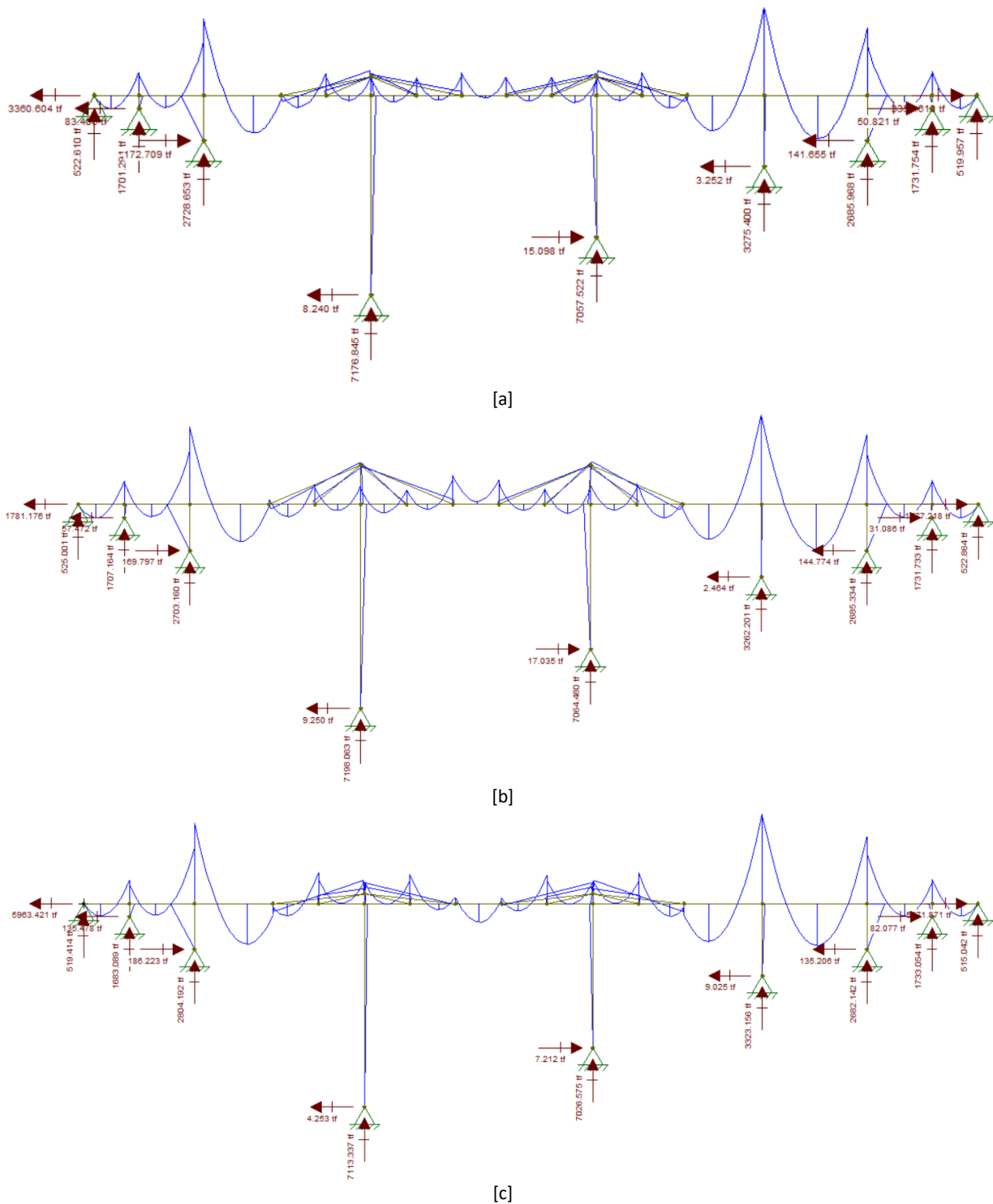
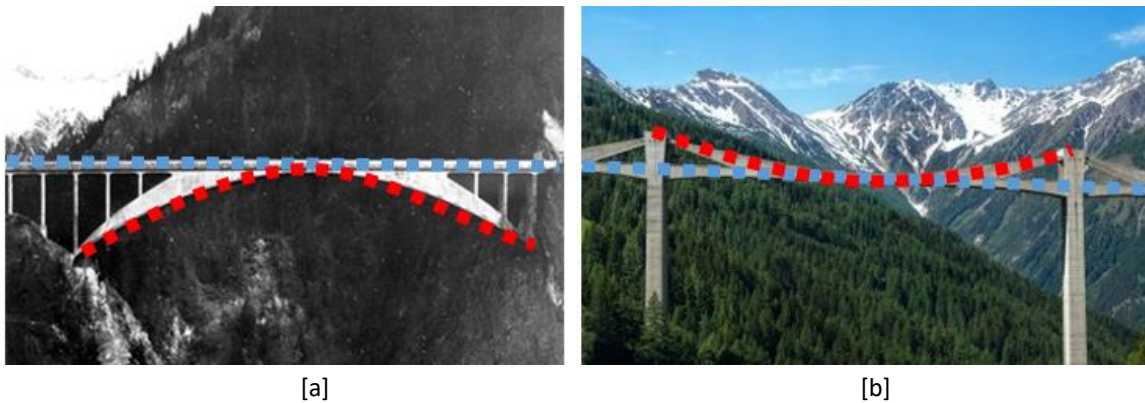


FIGURA 16: [a] Diagramas de momentos fletores das diferentes modelagens: proporções originais; [b] vão original e dobro da altura dos pilares, e; [c] vão original e metade da altura dos pilares.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A melhor maneira de se iniciar a análise comparativa que busca inferir a importância dos trabalhos de Maillart nas obras de Menn é apresentando a semelhança estética entre as duas pontes analisadas computacionalmente. Essa

semelhança, já apontada por David Billington em uma palestra ao departamento de engenharia civil de Princeton, pode ser notada pela relação entre os maiores (principais) vãos das duas pontes. A Figura 17 apresenta imagens das duas pontes com os tabuleiros e os arcos destacados em traços pontilhados azul e vermelho, respectivamente.



[a]

[b]

FIGURA 17: [a] Pontes Salginatobel e [b] Ganter.**FONTE [a]:** ATLAS OF PLACES (2017).**FONTE [b]:** JOHNSTON (2015).

O arco situado abaixo do tabuleiro na Ponte Salginatobel apresenta concentração de esforços internos normais de compressão (Figura 12a), enquanto que na Ponte Ganter, Menn inverte a posição do arco reposicionando-o na região acima do tabuleiro, transformando os esforços de compressão em tração (Figura 15a). Por esse motivo, o “arco invertido” na ponte de Menn, na verdade não desempenha função estrutural, atuando apenas como elemento de proteção para as cordoalhas de aço que sustentam o tabuleiro da ponte, simulando o arco da ponte de Maillart.

A Figura 12a apresenta o diagrama de esforços normais da Salginatobel que, por sua vez, deixa clara a predominância dos esforços no arco e a quase nula ação desse tipo de esforço no tabuleiro. Na Figura 12b, o diagrama de esforços cortantes mostra que o artista, usando da grafostática, soube praticamente eliminar o cisalhamento no arco, deixando apenas o tabuleiro submetido a esse tipo de esforço.

Conforme ilustrado na Figura 13a, o modelo com as dimensões originais apresenta os menores valores de momentos fletores no arco. Fica clara a conclusão de Fivet e Zastavni (2011), que traça a geometria idealizada por Maillart como a mais adequada para a Salginatobel, pois os momentos fletores se concentram no tabuleiro, deixando o arco submetido principalmente a esforços normais de compressão. Maillart aplicou o arco em sua plena forma e função estrutural –

predominância dos esforços de compressão – utilizando do, até então, recente material concreto armado que, por ser uma rocha artificial, possui boa resistência a esse tipo de esforço.

Ao modelar a estrutura da ponte com o dobro da altura (Figura 13b), a incidência de esforços de momento no arco aumentou e seu valor máximo chegou a triplicar. Um benefício atingido pela geometria em questão foi a redução do empuxo nos apoios, entretanto considerando-se que a ponte foi apoiada em montanhas com solo rochoso, a carga de empuxo não seria o principal desafio a ser vencido pelo artista. Ao tratar do modelo com a metade da altura (Figura 13c), o aumento dos valores dos momentos existentes no arco é notável, pois o valor máximo chega a dobrar. E nesse caso, o empuxo dobrou em relação ao valor apresentado pela geometria original.

Assim como na Salginatobel, Menn utiliza caixões perdidos para projetar a superestrutura (tabuleiro) de sua ponte. Ao analisar os diagramas da Figura 16a, é possível elencar que o artista inseriu os tirantes no vão principal e nos laterais como forma de reduzir os valores dos momentos. Caso houvesse considerado maiores alturas dos pilares acima do tabuleiro (Figura 16b), os momentos máximos negativos e positivos incidentes no vão principal atingiriam valores maiores do que o projetado. Cogitando a possibilidade de reduzir as alturas dos pilares

acima do tabuleiro (Figura 16c), Menn teria gerado valores de momentos maiores no topo dos pilares e o momento negativo no meio terço do vão principal atingiria valores muito mais elevados, acabando por elevar o custo de execução ou talvez inviabilizando sua execução em função do grande vão.

Menn faz uso da técnica de caixão perdido criada e aplicada por Maillart para vencer os grandes vãos da Ganter, entretanto devido ao grande comprimento dos vãos, os momentos atingiram valores elevados acabando por exigir que o artista usasse do sistema de protensão para executar sua obra. Fica claro, diante da análise dos diagramas de momento fletor, que a superestrutura (tabuleiro) da Ganter não poderia ser executada em concreto armado, para tanto Menn usou concreto protendido, mantendo apenas os pilares e a fundação em concreto armado.

Pode-se dizer que Menn, ao projetar a ponte Ganter, espelhou-se no modelo da Salginatobel, inserindo os tirantes de forma a combater os momentos nos vãos assim como Maillart usou o arco. No entanto, os tirantes por estarem sustentando o tabuleiro estando acima dele, acabam sendo submetidos principalmente a esforços normais de tração, enquanto o arco é submetido a esforços normais de compressão. A Figura 15 ilustra a predominância dos esforços normais nos tirantes da ponte enquanto que os esforços cortantes se concentram no tabuleiro. Ao comparar as Figuras 12 e 15, nota-se que esse comportamento dos esforços normais e cortantes se assemelham, ilustrando a influência de Robert Maillart nos aspectos projetuais de Christian Menn.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise dos diagramas de esforços das pontes foi possível constatar algumas semelhanças projetuais entre a obra de Robert Maillart e a primeira fase de Christian Menn. Suas obras de maior representatividade deixam clara esta relação tanto nos aspectos comportamentais

das estruturas de concreto quanto no aspecto estético. As pontes ao mesmo tempo que se dessemelham à primeira vista, quando observadas sob a ótica dos aspectos de projeto, se tornam estruturas próximas e que trabalham de maneiras correlativas.

Maillart projetou suas pontes e criou seu próprio estilo projetual e sua própria forma estrutural. A maior prova de que sua obra como engenheiro é reconhecida pelos seus sucessores está findada, por exemplo, nas tentativas – sejam bem-sucedidas ou não – de se tentar aplicar sua técnica de caixões perdidos em estruturas de concreto armado. Uma técnica concebida no final do século XIX e utilizada quase um século depois por Menn na ponte com o maior vão livre da Suíça.

Dessa forma, nota-se a importância da transferência de conhecimento dos profissionais antecessores para os atuais engenheiros civis. Mesmo sem o auxílio da tecnologia atualmente disponível no mercado da construção, as intenções e conceitos aplicados pelos engenheiros do século passado são fundamentais para que os profissionais de hoje possam não só replicar suas técnicas, mas também as aperfeiçoar com o uso dos recursos tecnológicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATLAS OF PLACES. **Salginatobel Brücke**, Robert Maillart. fev. 2017. Disponível em: <<http://atlasofplaces.com/filter/landscape/Salginatobel-brucke-Robert-Maillart>>. Acesso em: 07 fev. 2018.
- BILLINGTON, D. P. **The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering**. Princeton: Princeton University Press, 1985. 316 p.
- BILLINGTON, D. P. The Revolutionary Bridges of Robert Maillart. **Scientific American**, p. 84-91, jul. 2000.
- CHRISTIAN MENN CONSULTING ENGINEER. **Ganter Bridge**. 2018. Disponível em: <<http://www.christian-menn.ch/>>. Acesso em: 12 jan. 2018.
- DYM, C. L.; WILLIAMS, H. E. Stress and Displacement Estimates for Arches. **Journal of Structural Engineering: ASCE**, v. 137, n. 1, p. 49-58, jan. 2011.
- FIVET, C.; ZASTAVNI, D. Robert Maillart's Key Methods from the Salginatobel Bridge Design Process (1928). **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS**, v. 53, n. 1, p. 39-47, mar. 2012.

GAUVREAU, P. Innovation and Aesthetics in Bridge Engineering. **Canadian Civil Engineer**: Canadian Society for Civil Engineering, v. 23, n. 5, 2007.

HEINRICH, F. Rehabilitation of the Salginatobel Bridge. In: **Structural Engineering International**, v. 10, n. 1, p. 21-23, fev. 2000.

HU, N.; FENG, P.; DAI, G. L. Structural art: Past, present and future. **Engineering Structures**: Elsevier Ltd., v. 79, p. 407-416, set. 2014.

JOHNSTON, F. **Ganter Bridge**, Simplon Pass. 2015. Disponível em: <<http://www.gigapan.com/gigapans?tags=Simplon+Pass>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

LAFFRANCHI, M.; MARTI, P. Robert Maillart's Curved Concrete Arch Bridges. **Journal of Structural Engineering**: ASCE, v. 123, n. 10, p. 1280-1286, out. 1997.

MENN, Christian. **Ganter-Bridge**: 1980. 2016. Disponível em: <<http://www.christian-menn.ch/>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

ROSSITER, Jack. A critical analysis of the ganter bridge switzerland. In: PROCEEDINGS OF BRIDGE ENGINEERING CONFERENCE, 2. ed., 2008, Bath. **Conference**. Bath: University of Bath, p. 16 – 23, 2008.

SRP INGENIEUR AG. **Ganter Brücke**. 2017. Disponível em: <<https://www.srp.ch/de/referenzen/hochbau-und-tragkonstruktion/ganterbruecke,-simplon>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

STRUCTURAE. **Ganter Bridge**. 2016. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/ganter-bridge/photos>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

STRUCTURAE. **Salginatobel Bridge**. 2017. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/salginatobel-bridge>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

WIKIMEDIA. **Salginatobel Bridge**. 2009. Formato JPEG. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Salginatobel_Bridge_mg_4049.jpg>. Acesso em: 07 fev. 2018.