ANÁLISE ESTRUTURAL DA PONTE PÊNSIL: GOLDEN GATE

Palavras-Chave: Golden gate, análise estrutural, concepção estrutural, modelagem paramétrica.

Autores(as):

Rafael Ponciano Rodrigues dos Santos, FECFAU

Prof(ª). Dr(ª). Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol, FECFAU

INTRODUÇÃO:

A ponte Golden Gate foi selecionada como objeto de estudo por ser um marco de engenharia que representou a superação de grandes desafios técnicos e financeiros.

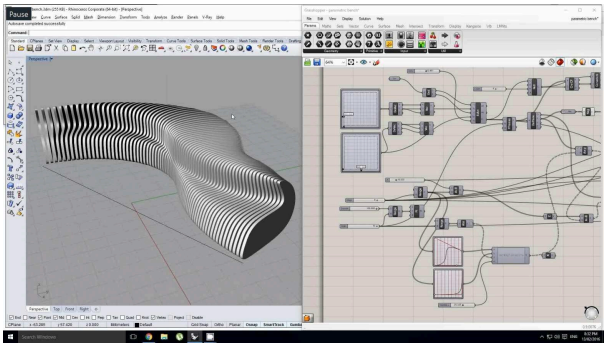
Sua construção pioneira, com um sistema de ponte pênsil, foi uma solução inovadora para os obstáculos impostos pela geografia de São Francisco. O projeto de Joseph Strauss se destaca pela utilização de um sistema de suspensão flexível, projetado para suportar grandes cargas, ventos fortes e sismos.

A complexidade de sua estrutura, que combina vigas treliçadas de aço e lajes de concreto, além da utilização de técnicas avançadas de construção na fundação e nas torres, torna-a um excelente caso de estudo. A recriação digital no Rhinoceros 8 permite uma análise detalhada e aprofundada desses elementos de engenharia, explorando as inovações que garantiram a durabilidade e a resistência da ponte ao longo de quase um século.

METODOLOGIA:

O objetivo da pesquisa foi o aprimoramento das habilidades técnicas com o programa Rhino e Karamba3D, e então a Investigação do comportamento estrutural da Golden Gate a partir da construção de modelo digital paramétrico em 3D no programa Rhinoceros (Computer-Aided Design - CAD) / Grasshopper (Algorithm-Aided Design - AAD) e análise estrutural no plugin de elementos finitos Karamba3D.

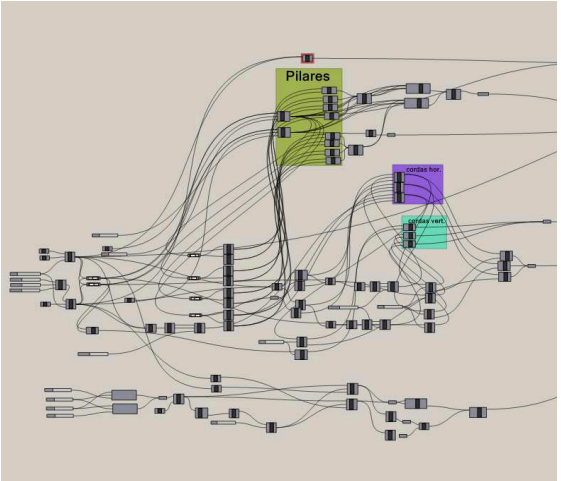
De início, foi feito o estudo e aprendizado dos softwares Rhinoceros e Grasshopper, programas esses que permitem criar formas e estruturas a partir de uma programação visual, como mostrado na imagem a seguir:

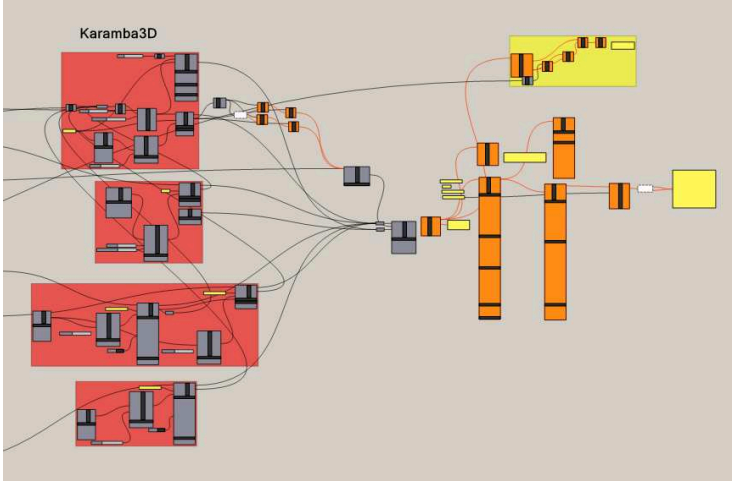


Com isso, foi possível começar os estudos da ponte pênsil de estrutura metálica. Foram coletados os dados iniciais para a modelagem, entre eles suas dimensões, espessura, altura, vão e flecha.

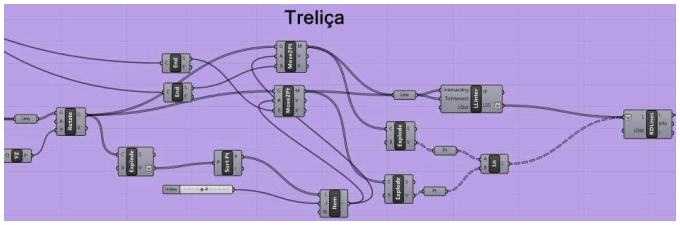
A Partir disso, começamos a modelagem e programação da Golden Gate de forma paramétrica no software Rhino usando a programação visual Grasshopper. Programamos as estruturas da ponte e separamos as mesmas em grupos, para melhor aproveitamento e facilidade posterior para as pesquisas. Foi separado de forma a se simplificar as estruturas do projeto, que foram: Tabuleiro; Pilares; Cabos verticais; Cabos horizontais; Treliças. Como pode ser visto nas imagens:

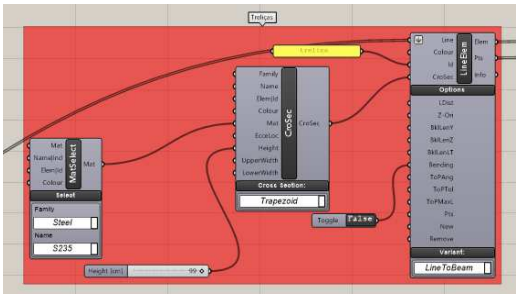
Programação Completa:



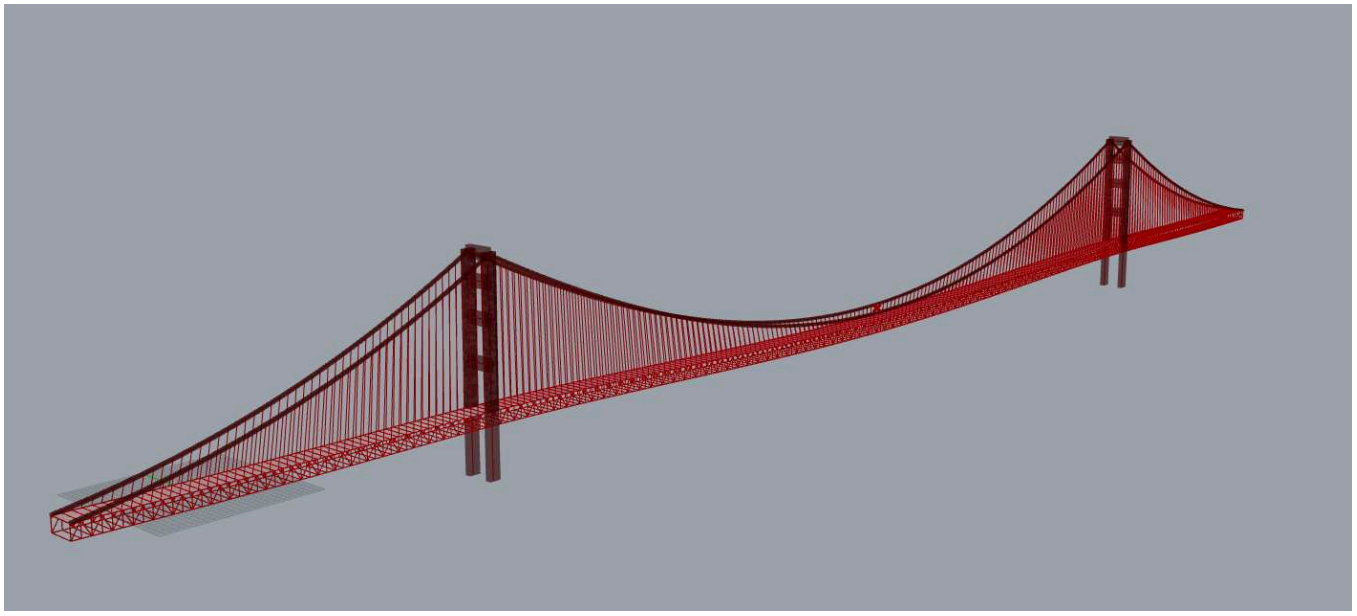


Exemplo de Grupo estrutural usado (Treliça):



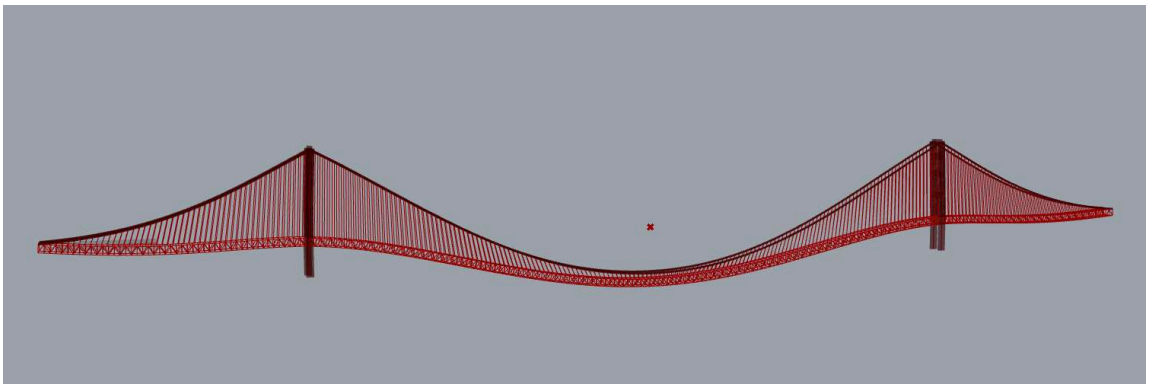


Com isso, foi possível modelar a ponte Golden Gate com suas dimensões reais a fim de analisá-la e estudá-la. Com toda programação chegamos no seguinte resultado prático da modelagem da ponte:

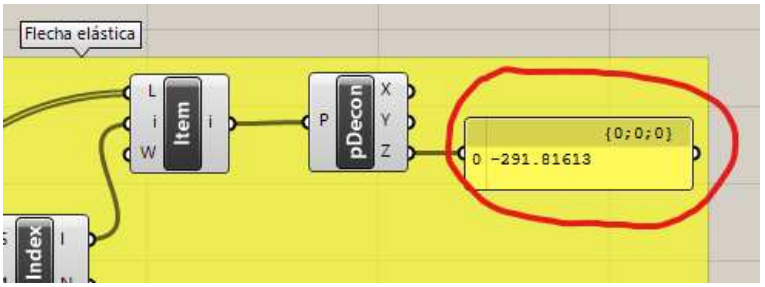


Com toda modelagem feita foi possível começar a analisar o comportamento da ponte usando o plug-in Karamba3D. Com ele, é possível analisar as deformações da ponte, seus carregamentos, e flecha obtido a partir do modelo criado. Assim, esperamos ter resultados realistas para comprovar a modelagem correta da ponte.

Figura **exagerada** da deformação gerada pelo Karamba3D utilizando uma carga elevada apenas para efeito visual:



Utilizando o programa Karamba3D, junto com o Rhino e Grasshopper, analisamos a estrutura da ponte e adicionamos uma carga real (peso da própria ponte + carga distribuída em seu tabuleiro). E chegamos em um valor aproximado de **290 cm** de deformação (flecha elástica).



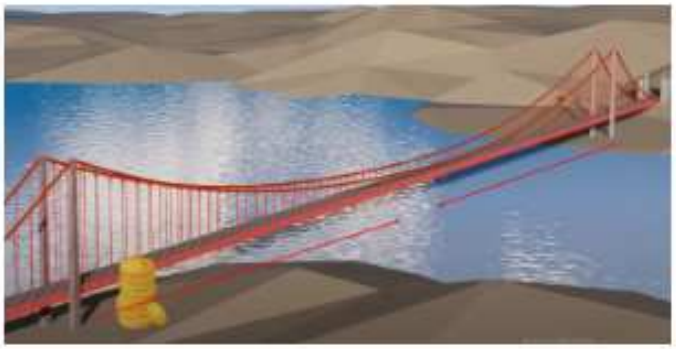
Flecha limite pelas normas brasileiras vigentes (ABNT NBR 7187:2003):

$$flecha_{limite,\text{ABNT}} = \frac{L}{350}$$ = 196600cm / 350 = **561,7cm**

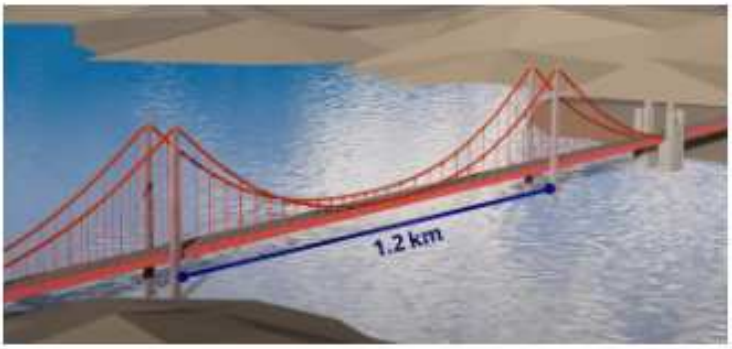
Norma Coreana (Korean Bridge Design Code):

$$flecha_{limite,\text{Korean Code}} = \frac{L}{400} =$$ 196600cm / 400 = **491,5cm**

Como o modelo foi feito de forma paramétrica, foi possível aproximar os pilares da ponte e confirmar a genialidade de Joseph Strauss, que pensou na possibilidade de aproximar a distância dos pilares da ponte a fim de reduzir os custos da mesma.



muito caro



mais viável

Com isso, foi possível testar o mesmo princípio utilizando a flecha como medida de custo. Assim, com uma redução de 16% no comprimento entre os pilares, que era 1966 metros, a flecha obtida foi de 119 cm, uma redução de mais de 58% da flecha, que resultaria em um custo muito mais baixo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com os resultados coletados, podemos concluir que a construção da ponte foi um sucesso, obtivemos um resultado satisfatório em relação a flecha, parâmetro crucial para medir a saúde de uma ponte dessa dimensão. Chegamos em uma flecha de 290 centímetros, e ao comparar com as normas Brasileiras e Coreanas, chegamos a conclusão de que a ponte se adequa às medidas de segurança e conforto previstas pela lei.

Em adição, por termos feito a ponte de forma paramétrica, podemos analisá-la depois de pronta de formas diferentes, e com isso, resolvemos testar uma das ideias do engenheiro chefe da obra que fizeram a ponte ser possível de ser construída com o orçamento disponível na época, que antes era vista como inviável e muito cara. A ideia era que ao aproximar os pilares das pontes, poderíamos

diminuir os custos necessários para sua construção, utilizamos a flecha da ponte como base para medir esse aspecto. Exemplo: Flecha original = X , Flecha após a aproximação X-10%, isso nos mostra que com a aproximação, para conseguir a flecha inicial X, seria necessário menos materiais e sustentação, ou seja, menos gastos. Com isso, chegamos no seguinte resultado:

Flecha inicial = 290cm - Distância das torres = 196600 cm.

Aproximação de 16% entre as torres - Distância das torres = 165000 cm

Com isso, chegamos a uma flecha de **119 cm**. Ou seja, uma aproximação de apenas 16% gerou uma flecha 58% menor, uma pequena aproximação cortaria muito os custos. Assim, foi possível comprovar a ideia de Strauss na prática e ver sua genialidade da época que fez ser possível a criação da famosa ponte Golden Gate.

CONCLUSÕES:

Assim, chegamos a conclusão de que a pesquisa foi um sucesso. Foi possível aprender sobre os softwares Rhinoceros, Grasshopper e Karamba 3D, fazer um modelo paramétrico de uma das pontes mais famosas do mundo, comprovar sua eficácia e coerência com a versão real, e ainda por cima testar e validar a teoria de Joseph Strauss, engenheiro chefe da obra, e comprovar sua eficácia.

BIBLIOGRAFIA

MOTA, Joaquim E. *et al.* **Flecha Limite para Pontes Estaiadas – Estudo de Caso.** Ceará, XII CBPE.

POLONINI, Flávia Biccas da Silva. **A Modelagem Paramétrica na concepção de formas curvilíneas da Arquitetura Contemporânea.** 2014. 288 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

PEREIRA, Tainara. **Comportamento estrutural da golden gate bridge em decorrência de fenômenos naturais.** Faculdade Anhanguera Polo Caxias do Sul, 2021.

LIMA, Rochelle et. al. **Golden gate: Projeto, Reforma e Considerações Históricas.** Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2013.

HORTEGAL, Ivar Ribeiro. **Contribuição ao estudo das pontes pênseis de madeira.** 1979. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1979.