



ERROS DE CÁLCULO NA ENGENHARIA

Giovanna de Souza Florenzano
giovanna.florenzano@aedb.br
AEDB

Hugo Nascimento Barroso
hugo.barroso@aedb.br
AEDB

Júlio César Brasil Júnior
julio.junior@aedb.br
AEDB

Mariana Mattos dos Reis
mariana.reis@aedb.br
AEDB

Ylthar Ramos, Gabriel Gonçalves Pessoa de Castro
ylthar.ramos@aedb.br, gabriel.pessoa@aedb.br
AEDB

Resumo: Ao longo dos anos, foi constatado um grande número de acidentes estruturais em construção civil em todo o mundo, tanto durante a fase de execução, quanto durante o seu uso. A divulgação e disseminação pelo meio técnico e acadêmico são de extrema importância, pois é algo que, em grande parte das ocasiões, não são divulgadas, sendo perdidas informações valiosas para o progresso da engenharia e também para construções e projetos futuros. O artigo em si, abordará acidentes na engenharia causados por erros de cálculo e os momentos específicos em que ocorreram erros nos cálculos.

Palavras Chave: Acidentes - Civil - Engenharia - Acadêmico - Erros de Cálculo



SIMPOSIÓ DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA
XVSEGETK

Indústria 4.0
e o uso de tecnologias digitais

30, 31/10
e 01/11



ERROS DE CÁLCULO NA ENGENHARIA



1. INTRODUÇÃO

O cálculo é um dos ramos mais importantes da matemática e da engenharia, desenvolvido à partir da álgebra e da geometria, dedicando-se aos estudos das taxas de variação de grandezas e a acumulação de quantidades. Desenvolvido por Isaac Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz com a finalidade de ser uma ferramenta que auxilie em várias áreas das ciências exatas, seja na matemática, química, física clássica, moderna e economia e são divididas em três bases; cálculo de limites, cálculo de derivadas das funções e integrais.

Por mais que sejam evitados ao máximo, erros de cálculo são mais frequentes na engenharia do que se esperam. Um simples erro pode fazer com que um projeto de anos venha por água a baixo, sem contar as inúmeras vidas que podem ser perdidas. Inúmeros engenheiros trabalham em um projeto para que ele não venha falhar, seja na execução do projeto, ou no momento em que são feitos os cálculos.

Neste estudo iremos abordar alguns erros de cálculo que aconteceram no ramo da engenharia, apresentando alguns casos que ocorreram e seus impactos causados, mostrando também como poderiam ter sido evitados.



2. DESENVOLVIMENTO

Cálculo, uma ferramenta das ciências exatas, criado em meados do século XVII por múltiplos fundadores. Sua eficácia é inegável, mas, passível de erro humano devido a isso diversos acidentes e catástrofes são registradas.

Devido a necessidade dos cálculos na engenharia, a natureza dessa profissão onde se resume em construir os pilares da vida em sociedade e além de ser a vanguarda evolutiva da mesma, a diversidade de cálculos a serem utilizados é: estrutural; numéricos (séries de MacLaurin e aritmética do ponto flutuante, por exemplo.); físicos; mecânicos ; estatísticos e probabilísticos; dentre outros o engenheiro em muitos momentos se assemelha a uma máquina capaz de trazer a realidade maravilhas da engenharia, porém o ser humano é incapaz de aproximar-se da perfeição.

Com isso casos como: *Tacoma Narrows Bridge* no estreito de Tacoma em Washington no ano de 1940; *Hyatt Regency Hotel* em Kansas City e o foguete Ariane 5. Nos dois primeiros casos o principal relato de erro se devia ao erro de cálculos estruturais, dilatação, tensões e etc. Já em relação ao foguete, um erro de cálculo numérico (*overflow*) foi o grande responsável pelo desastre. Portanto a fim de evitar tais casos uma solução que pode ser aplicada como uma maneira simples, porém eficaz é a efetivação de um sistema onde o time de projetos fiscalize mutuamente as conclusões matemáticas de seus companheiros com isso a colaboração do time aumentaria a redução de erros além de eliminar custos seja em quais áreas sejam aplicadas.

2.1 Tacoma Narrows Bridge

O caso da ponte de Tacoma (Figura 1) se tornou emblemático em todo o mundo, principalmente na engenharia, intrigando cientistas e engenheiros que procuram nas equações diferenciais qual poderia ser a resposta para o acidente que ocorreu no verão de 1940.



Figura 1: Homem na Ponte de Tacoma enquanto ela oscila

A ponte ficava situada no condado de Pierce (Washington, EUA) e tinha um modelo de ponte pênsil com dois pilares, que se caracterizava por possuir um suporte simples de duas vigas em I, paralelas, composta por uma pequena estrutura interna, tendo seu suporte de 2,4 metros de espessura. Durante as correntes de vento não tão intensas, os engenheiros



perceberam que a estrutura da ponte tinha a tendência de oscilar transversalmente, levando a ensaios para se reduzir as vibrações, porém nenhum teve plena eficácia.

As onze horas do dia 07 de novembro de 1940 os primeiros pedaços da ponte começam a cair devido a fortes rajadas de vento que atingiam o local, logo em seguida, cabos de aços são arrancados causando uma queda de uma seção estimada em 600 metros. Finalmente após dez minutos o restante da estrutura da ponte cai sobre a enseada de Puget Sound. A única vítima fatal do acidente foi um cão de um repórter que estava no local.

Dois fatores foram de grande importância para a fragmentação da estrutura do vão (Figura 2): a falta de rigidez transversal e à torção e o perfil aerodinâmico. O ocorrido fez com que se buscasse melhor entendimento sobre os fenômenos ondulatórios, culminando assim em um grande avanço no campo das engenharias, mais precisamente à aerodinâmica de estruturas.



Figura 2: Desestruturação do vão e queda da ponte

A ressonância é um fenômeno linear, como podemos perceber na equação diferencial (Equação 1):

Equação 1: Equação diferencial da ressonância

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x + F_0 \sin \gamma t, \quad x(0) = 0, \quad x'(0) = 0$$

Para haver ressonância, é necessário que o sistema seja livre de amortecimento (fazendo $\lambda = 0$ na equação abaixo) (Equação 2):



Equação 2: Equação diferencial da ressonância

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = F(t)$$

O fenômeno da ressonância não foi o único fator contribuinte para o desastre da ponte de Tacoma.

Uma explicação contundente parece vir dos modelos apresentados por Alan C. Lazer e Patrick J. McKenna. Em seu artigo, [*Large-Amplitude Periodic Oscillations in Suspension Bridges: Some New Connections with Nonlinear Analysis*], Lazer e McKenna teorizam que *efeitos não lineares* foram os fatores principais que ocasionaram a danificação e consequente colapso da ponte *Tacoma Narrows*. Em termos gerais, seriam responsáveis as interações não lineares entre a ponte e as forças externas (gerando vórtices, causados pela ação dos ventos, como previa von Kármán). No modelo proposto, Lazer-McKenna explica que quando cabos verticais (na teoria linear, os cabos atuam como uma mola elástica) estão sob efeito da tensão, agem exatamente desta maneira e a equação diferencial é linear.

Em oscilações provocadas por forças externas os cabos de aço não estarão a todo o momento sob tensão, havendo apenas a força da gravidade atuando no sistema. De acordo com Lazer-McKenna a não linearidade dá-se ao fato de que cabos diferentes podem estar sob tensão em momentos diferentes, consequentemente acarretando em oscilações de grandes amplitudes com atuação de forças externas moderadas.

2.2 Hyatt Regency Hotel

Outro desastre no mundo da engenharia foi o Colapso da passarela do Hyatt Regency (Figura 3) que ocorreu em 17 de julho de 1981 em Kansas City, ocasionando a morte de 114 pessoas e ferindo mais de 200. Foi o colapso estrutural com o maior registro de mortos na história dos Estados Unidos.



Figura 3: Queda da passarela do Hyatt Regency

Suas passarelas eram compostas por estruturas metálicas, contendo também madeira para revestimento e rampa de concreto para ligação com o piso dos blocos. A passarela era sustentada por três vigas transversinas de seção retangular que foram obtidas através da soldagem de duas peças de perfil C e através das transversinas as passarelas eram ligadas por tirantes de aço ao teto.

A tragédia ocorreu quando aproximadamente 2000 pessoas estavam reunidas para uma competição de dança, incluindo uma equipe de televisão local, KMBC TV. Por voltas de 19 horas, as passarelas do segundo e quarto andar entraram em colapso, caindo no chão do átrio do hotel.

Com as imagens obtidas no dia do acidente, determinou-se o número de pessoas que se encontravam na passarela e com os cálculos, o valor de carga que a estrutura estava submetida. De acordo com o projeto original, foram estabelecidas condições de escoramento idênticas para as três passarelas., porém com a análise e realização de cálculos concluiu-se que as passarelas no projeto suportariam apenas 60% da carga mínima exigida pelo Kansas City Building Code. Com as alterações realizadas no projeto, as passarelas do segundo e quarto andar foram construídas suportando apenas 30% da carga mínima.

Após longas investigações foi concluído que a mudança do projeto dobrou a carga suportada pelas vigas e as conexões da passarela do quarto andar, um erro que jamais poderia ter sido cometido.

2.3 Foguete Ariane 5

Foi no dia 04 de junho de 1996 que a França lançou o primeiro foguete não tripulado da série Ariane 5 (Figura 4), porém seu lançamento não durou muito tempo. Menos de um minuto após sair do chão o foguete francês se autodestruíu. A falha no lançamento foi causada por um erro no *software* de controle.

O erro de *overflow* ocorre quando se tem um valor atribuído a uma variável que é maior do que o maior valor que esta variável consegue representar. Havendo um sistema decimal, que representa os valores de 0 a 9, se tentássemos atribuir o resultado da operação



5+5 em uma variável deste tipo, o resultado seria um *overflow*, resultando em falhas na execução de uma programação.

[A anomalia interna de *software* do SRI ocorreu durante a execução de uma conversão de dados de um número de 64 *bits* em ponto flutuante para um inteiro de 16 *bits* com sinal. O valor do número em ponto flutuante era maior do que poderia ser representado pelo inteiro de 16 *bits* com sinal. O resultado foi um operando inválido. A instrução de conversão de dados (em código ADA) não estava protegida contra erros de operando, embora outras conversões de variáveis equivalentes no mesmo segmento de código estivessem protegidas.

O erro ocorreu num segmento do *software* que controla apenas o alinhamento da plataforma inercial. Os resultados fornecidos por este segmento do código são relevantes apenas antes da decolagem. Após a decolagem esta função não serve para nada. A função de alinhamento opera por 50 segundos após o início do modo de vôo dos SRIs (3 segundos antes da decolagem para o Ariane 5). Consequentemente, após a decolagem a função continua atuando por aproximadamente 40 segundos de voo. Esta sequência temporal é baseada num requisito do Ariane 4 que não faz parte da especificação do Ariane 5.

O erro de operando ocorreu devido a um valor inesperadamente elevado de uma função de alinhamento interno, denominada BH (horizontal *bias*), que está relacionada com a componente horizontal da velocidade monitorada pela plataforma. Este valor é calculado como um indicador de precisão de alinhamento ao longo do tempo. O valor de BH foi muito maior do que o previsto porque o segmento inicial da trajetória do Ariane 5 difere da trajetória do Ariane 4 e resulta em valores consideravelmente altos para a componente horizontal da velocidade.

Os eventos internos do SRI que originaram a falha foram reproduzidos por simulação computacional. Além disso, ambos os SRIs foram recuperados durante a investigação da comissão e o contexto da falha foi determinado com precisão por meio da leitura dos dados na memória. Tendo a comissão examinado o código do software, concluiu que este é consistente com o cenário da falha.]. (trecho retirado do boletim da sbmac).



Figura 4: Foguete Ariane 5



3. CONCLUSÃO

Um simples erro de cálculo pode vir a acarretar um desastre de consequências inimagináveis, saber o que está fazendo e como está fazendo é de grande importância para evitar situações como as que vimos acima. No caso da Ponte de Tacoma vimos que o erro no cálculo da ressonância e os efeitos não lineares foram os principais motivos de sua queda, já no caso do hotel, a capacidade máxima de pessoas no local não suportaria e por fim, um erro numérico no cálculo do foguete fez com que ele se autodestruísse.



4. REFERÊNCIAS

McKenna, P. Joseph e Walter W., Nonlinear oscillations in a suspension bridge, Arch. Rational Mech. Anal., 98 (1987), pp. 167-177.

Alan C. Lazer e Patrick J. McKenna. Large-Amplitude Periodic Oscillations in Suspension Bridges: Some New Connections with Nonlinear Analysis.

Amann, O. H., T. von Karman, e Woodruff, G. B. The Failure of the Tacoma Narrows Bridge. Federal Works Agency, 1941.

von Karman, T. *The Wind and Beyond*, Theodore von Karman, Pioneer in Aviation and Pathfinder in Space, Boston: Little, Brown, 1967.

Cavalcanti. Ponte Tacoma Narrows, 1940 – Um estudo dos efeitos não-lineares.

Henry Petroski. To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design, Vintage Books, 1992.

Boletim SBMAC. Versão condensada do relatório sobre a falha no primeiro lançamento do Ariane 5, em parte baseada no texto do SIAM NEWS, V29 N. 8, out/96.