

UTILIZAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO SIMPLIFICADO NA ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRE TRELIÇADA

SIMPLIFIED NUMERICAL MODEL USED IN STRUCTURAL ANALYSIS OF LATTICED STEEL STRUCTURE

UTILIZACIÓN DE MODELO NUMÉRICO SIMPLIFICADO EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE TORRE TRELIZADA

Ricardo da Silva¹

Thiago Bonjardim Porto²

Resumo: Este trabalho teve o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização de processos simplificados na análise estrutural de uma torre treliçada. No estudo de caso apresentado foi possível verificar que as reações de apoio e deformações deram resultados muito próximas, tanto sendo feita em um software para análise tridimensional que utiliza o método dos elementos finitos, quanto em um software acadêmico 2D para análise de barras isotrópicas e homogêneas. Os resultados apresentaram erro relativo na ordem de 2%, demonstrando assim, que a análise simplificada e expedita possibilita bons resultados para uma análise conceitual ou básica de uma estrutura.

Palavras-chave: MEF. Modelagem Numérica. Torre Treliçada. Suporte para Transformador de Corrente Elétrica.

Abstract: This work had the objective of evaluating the feasibility of the use of simplified processes in the structural analysis of a latticed structure. In the case study presented, it was possible to verify that the support reactions and deformations gave very close results, both when done in a software for three-dimensional analysis using the finite element method, as well as a 2D academic software for bar analysis isotropic properties and homogeneous. The results presented a relative error of 2%, thus demonstrating that the simplified and expeditious analysis allows good results for a conceptual or basic analysis of a structure.

Keywords: FEA. Numerical Modeling. Latticed Steel Structures. Current Transformer Support.

Resumen: Este trabajo tuvo el objetivo de evaluar la viabilidad de la utilización de procesos simplificados en el análisis estructural de una torre trezada. En el estudio de caso presentado fue posible verificar que las reacciones de apoyo y deformaciones dieron resultados muy próximos, tanto en un software para análisis tridimensional que utiliza el método de los elementos finitos, como en un software académico 2D para análisis de barras isotrópicas y homogêneas. Los resultados mostraron un error relativo en el orden del 2%, demostrando así que el análisis simplificado y expedita posibilita buenos resultados para un análisis conceptual o básico de una estructura.

Palabras clave: MEF. Modelado numérico. Torre Trenzada. Soporte para Transformador de Corriente Eléctrica.

Envio 07/05/2018

Revisão 03/07/2018

Aceite 30/12/2018

¹ Pós-Graduando Engenharia de Estruturas - IEC PUC MG; Graduado em Engenharia de Energia PUC MG - pro.ricardos@gmail.com

² Doutor em Engenharia Civil – UFOP; Mestre em Engenharia De Estruturas - UFMG
Graduado em Engenharia Civil – UFMG; Professor Colaborador UFOP. porto260285@yahoo.com.br

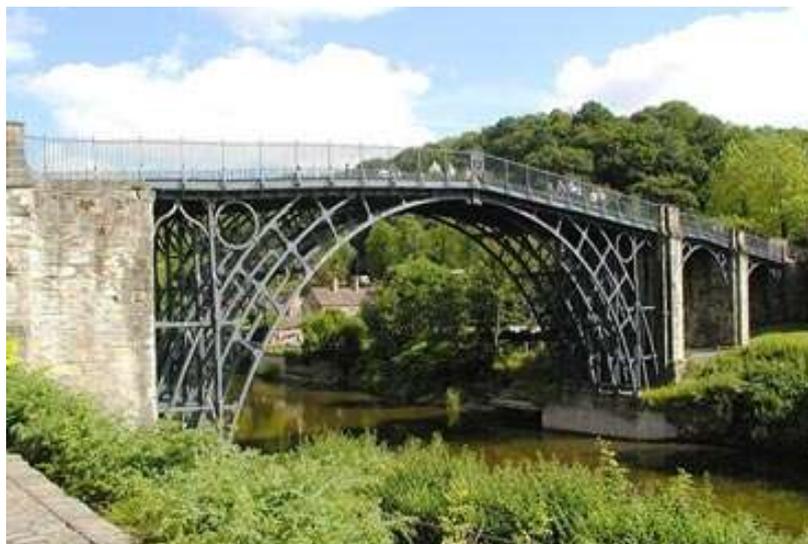


Introdução

Desde os primórdios o homem constrói “estruturas” diversas com os mais variados atributos, sejam estruturas simples de madeira ou bambu, que serviam como moradias, até as grandes estruturas de blocos de pedra sobrepostos que formaram as pirâmides, os arcos romanos, ou as pontes antigas.

Com o domínio pelo homem da produção do metal, este percebeu que o ferro podia fortalecer suas construções e começaram a fazer tirantes, pendurais, pregos e rebites que funcionavam como elemento auxiliar em estruturas de madeira. Então, a partir do momento em que dominaram o dimensionamento, ou a análise estática das estruturas, começaram a substituir estas feitas de madeira ou pedra, por estruturas de metal, feitas com vigas de ferro fundido e construíram pontes e outras estruturas treliçadas. A primeira ponte construída com elementos de ferro fundido treliçada data de 1779, em Coalbrookdale na Inglaterra (Fakury, 2009, p. 2):

Figura 1: Ponte de ferro fundido em Coalbrookdale – Inglaterra



Fonte: Greatbuildings, 2017

Com a Revolução Industrial o uso de metais foi difundido e o aço ganhou destaque, sendo usado maciçamente em estruturas das mais variadas. O metal foi também agregado ao



concreto e diversos outros usos foram possibilitados como por exemplo, a célebre construção da Torre Eiffel em Paris em estrutura metálica treliçada.

O avanço da tecnologia metalúrgica com o desenvolvimento de metais nobres e leves, possibilitaram muitas outras aplicações e combinações, em que estruturas “leves” suportam grandes cargas, ou estruturas especiais são montadas desde o fundo do mar, nas plataformas petrolíferas, até o espaço nas estações espaciais.

Portanto o uso massivo de estruturas metálicas nas construções atuais permitiu não somente a redução de peso, bem como a criação de belas formas, por vezes ousadas como as criações arquitetônicas contemporâneas, fazendo atualmente do aço o principal material, junto com o concreto, de uso nas construções e edificações modernas.

Na indústria o uso do metal em estruturas além dos já citados justifica-se ainda por outros benefícios, como a rapidez na montagem, a possibilidade de se desmontar aquela estrutura e transferir para outro local, bem como reaproveitar aqueles perfis para outras estruturas.

Estruturas Metálicas em Subestações de Energia

Na área de energia, as fontes de geração nem sempre são próximas dos centros de consumo, necessitando então de equipamentos específicos que controlem o fluxo de energia entre estes 2 pontos, caracterizando as subestações de energia (Muzy, 2012, p. 4). Nas subestações de energia, os cabos de energia saem, ou chegam a esta, em alturas em torno de mais de 8m para possibilitarem o trânsito abaixo deles e distanciar os cabos de pessoa ou animais. Sendo assim, os cabos aéreos são interligados aos diversos equipamentos da subestação que estarão instalados no piso com os cabos descendo até eles, ou estarão instalados em suportes que elevam estes equipamentos até o nível dos cabos de energia. Estes suportes tanto dos cabos, quanto dos equipamentos da subestação, na maioria dos casos são construídos em estruturas metálicas treliçadas, objetivando redução de peso, rapidez na montagem em campo e durabilidade estando expostos ao ambiente.



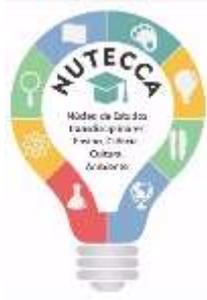
Figura 2: Estruturas diversas em subestação de alta tensão



Fonte: Muzy, 2012

Objetivos do Trabalho e Justificativa

A indústria e conseqüentemente a engenharia contemporânea, exigem cada vez mais produtividade, menores custos de produção e menores tempos de execução. Para obter tais resultados, ou se trabalha com engenheiros experientes, que são mais caros, ou com recursos que auxiliem os engenheiros em suas tomadas de decisão. Arantes (2014, p. 9) cita: “Nas empresas que fazem engenharia [...] premidas pela urgência em atender prazos contratuais e reduzir custos, procuram ávidas, profissionais tecnicamente mais experientes e produtivos [...]” Em todas as áreas da engenharia um grande aliado neste sentido de aumento de produtividade são os softwares computacionais, que auxiliam os engenheiros na criação, avaliação, modelamento e simulação de seus projetos com capacidades cada vez mais poderosas. Tamietti (2009, p. 515) defende: “Com a evolução e o uso dos softwares, agiliza-se o tempo de execução e reduz os custos de desenvolvimento, planejamento e operação dos serviços prestados no âmbito da engenharia [...]”. Estes recursos auxiliam o engenheiro, todavia, exigem conhecimento, pois os softwares simplesmente aceleram o processamento de dados lançados pelo engenheiro, não “fazem” o projeto. A inteligência e o conhecimento do profissional é ainda necessária para se obter resultados fidedignos, que por vezes vão se tornando tão detalhados ou específicos, demandando muito tempo de modelamento, com um operador do software tão especializado que acabam sendo onerosos.



Nas etapas de projeto conceitual ou básico, não há disponibilidade de tempo ou recursos para análises aprofundadas dos equipamentos e o engenheiro se vê na obrigação de pré-determinar um tipo de estrutura em que caso não tenha uma grande experiência que o permita estimar com boa proximidade a provável constituição de uma estrutura, pode incorrer em erros de estimativa que inviabilizem futuramente o projeto. Averiguar e proporcionar a possibilidade de aproximação de resultados por um método simplificado se tornou o objetivo deste trabalho, através da comparação entre dois métodos de análise computacional: um simplificado e de execução rápida utilizando um software didático 2D e outro método detalhado, embasado nas normas vigentes, por meio de um software mais poderoso de análise numérica 3D foram os recursos utilizados neste trabalho.

Metodologia

O dimensionamento de estruturas visa estabelecer os parâmetros adequados para que esta seja segura, atenda a função destinada com o uso eficiente e econômico de materiais para atender tais características. Estes parâmetros são ditados por norma que vai determinar um método adequado para o cálculo da estrutura.

Cada tipo de estrutura, bem como o material a qual é construída, determina uma norma a ser seguida. Para projetos de estruturas metálicas em geral no Brasil, utiliza-se a Norma da ABNT - NBR 8800:2008: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

No caso de torres treliçadas de transmissão de energia, não há na ABNT uma norma específica para tal dimensionamento. Nos Estados Unidos a ANSI através de seu membro a ASCE – American Society of Civil Engineers (Associação Americana de Engenheiros Civis), edita a ASCE 10-97: Design of Latticed Steel Transmission Structures, que trata do projeto específico de estruturas treliçadas de transmissão em aço.

A NBR 8800-2008 dimensiona estruturas executadas com perfis laminados, soldados e tubulares, com ligações parafusadas ou soldadas, à temperatura ambiente, referenciada para dimensionamentos de edifícios públicos, para habitação, usos comercial ou industrial, passarelas e **suportes de equipamentos**, portanto, também adequada ao suporte deste estudo de caso.



Sendo assim foram seguidas as seguintes normas neste trabalho:

- ABNT NBR 6120:1980, Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR 6123:1988, Forças devido ao vento em edificações;
- ABNT NBR 8800:2008, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Dimensionamento por Estados Limites

A mecânica clássica dimensionava estruturas pelo Método das Tensões Admissíveis, onde as cargas de projeto eram deterministicamente admitidas como valores máximos que poderiam atuar ao longo da vida útil das estruturas. As máximas tensões nas estruturas não poderiam ultrapassar os valores das correspondentes tensões do material, dividida por um coeficiente de segurança interno, gerando então a tensão admissível.

Contudo este método se mostrou ineficaz, pois somente a análise de tensões não é suficientemente abrangente a ponto de garantir a segurança da estrutura, já que não leva em conta a simultaneidade de ações, de forma a abranger situações não previstas, como por exemplo situações de serviço da estrutura, deformações, fissuração, desgastes, entre outros. Por outro lado se mostra anti-econômica ao super dimensionar a estrutura já que usa a carga máxima, sem contudo informar a capacidade máxima da estrutura.

Sendo assim, foi desenvolvido na Rússia o Método dos Estados Limites, SÁLES et al (2004), onde novos critérios de verificação da segurança com bases probabilística foram adotados. Neste método é estipulado um limite de carregamento, sob ação de várias ações combinadas, acima da qual a estrutura não poderá ser utilizada. Quando o limite for ultrapassado e a estrutura for considerada insegura é caracterizado um ESTADO LIMITE ÚLTIMO. Se acima de um dado limite, não for possível o uso da estrutura, mesmo ela não sendo considerada insegura, fica caracterizado o ESTADO LIMITE DE SERVIÇO.

Os **estados limites últimos** (E.L.U.) estão relacionados ao colapso da estrutura e devem apresentar probabilidade pequena, pois podem resultar em perda de vidas humanas. Está relacionado ao esgotamento da capacidade de sustentação da estrutura. Podem ocorrer por:



- Ruptura de seções;
- Colapso da estrutura;
- Perda de estabilidade;
- Deterioração por fadiga.

Já os **estados de limite de serviço** (E.L.S.) estão relacionados a utilização normal da estrutura e sua durabilidade, podendo ter uma probabilidade maior, já que não apresentam risco de vida. Está relacionado a durabilidade, aparência, conforto de uso e desempenho da estrutura. Podem ocorrer por:

- Deformações ou deslocamentos excessivos no uso normal;
- Fissuração excessiva;
- Vibrações excessivas.

Ações

Ação é a influência ou conjunto de influências capazes de produzir estados de tensão, ou deformação, ou movimento de corpo rígido na estrutura. Para projetos estruturais são de três tipos:

- Ações PERMANENTES (g);
- Ações VARIÁVEIS (q);
- Ações EXCEPCIONAIS (exc).

As **ações permanentes** são aquelas praticamente invariáveis ao longo da vida útil da estrutura, exemplos:

- Peso próprio da estrutura e de componentes da construção tais como pisos, revestimentos, equipamentos fixos, etc;
- Protensão;
- Recalques de apoio;
- Fluência e retração de materiais.

As **ações variáveis** são aquelas que variam ao longo do tempo, podendo atuar ou não durante certo tempo na estrutura, mas com magnitude não desprezível:

- Sobrecargas de uso tais como equipamentos móveis, cargas não permanentes, veículos;



- Vento (ABNT NBR 6123:1988 Forças devido ao Vento em Edificações);
- Variações de temperatura.

As **ações excepcionais** também variam no tempo, com valores significativos, mas com curta duração e baixa probabilidade de ocorrência. Dependendo do projeto, ou do local de instalação devem ser consideradas, exemplos:

- Explosões ou choques de veículos;
- Ventos extraordinários (furacões, tornados);
- Efeitos sísmicos;
- Incêndios (Normas ABNT NBR 1443:2000 Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações e ABNT NBR 14323:1999 Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio).

A Norma ABNT NBR 6120:1980 Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações, fornece os valores de cargas permanentes e sobrecargas para dimensionamento.

Dimensionamento E.L.U.

Esforço Solicitante de Cálculo

O dimensionamento por E.L.U. será satisfatório se atender a relação:

$$S_d \leq R_d$$

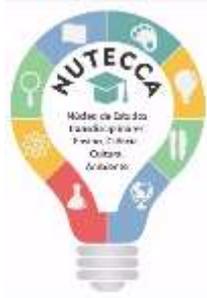
- S_d : esforço solicitante de cálculo (causa o estado limite);
- R_d : esforço resistente de cálculo (combate o estado limite).

O esforço solicitante de cálculo será obtido da combinação de ações pela fórmula:

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{qi} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \omega_{0j} F_{Qj,k})$$

Onde:

- $F_{Gi,k}$: valores característicos das ações permanentes;
- $F_{Q1,k}$: valores característicos da ação principal para combinação;
- $F_{Qj,k}$: valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitante com a ação variável principal;
- γ_{gi} : coeficiente de ponderação das ações permanentes;
- γ_{qi} : coeficiente de ponderação das ações permanentes;



Na busca do maior esforço solicitante de cálculo, devem ser feitas tantas combinações últimas de ações quantas forem as ações variáveis (uma combinação para cada ação variável considerada principal). Na Tabela 1 da página 18 da norma NBR 8800:2008 são apresentados os Coeficientes de ponderação das ações e na Tabela 2 da página 19 da norma NBR 8800:2008 são apresentados os valores dos fatores de combinação.

Esforço Resistente de Cálculo

O esforço resistente de cálculo será dado por:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_a} \quad (2.3)$$

Onde:

- R_k : Esforço Resistente Nominal;
- γ_a : coeficiente de ponderação da resistência, que pode ser:
 - γ_{a1} : E.L.U. relacionados a Escoamento e Flambagem = 1,10
 - γ_{a2} : E.L.U. relacionados a Ruptura = 1,35

Dimensionamento E.L.S.

Para não ocorrerem os estados limites de serviço, os deslocamentos da estrutura não podem exceder valores máximos estabelecidos na ABNT NBR 8.800:2008, a partir de uma combinação de ações de serviço.

As combinações de ações de serviço são determinadas pelo período de atuação destas em:

Combinações quase permanentes: atuam da ordem da metade da vida útil da estrutura (geralmente suposto 50 anos), para situações em que os deslocamentos não provoquem danos a outros componentes da construção:

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n (\omega_{2j} F_{Qj,k})$$

Combinações frequentes: se repetem por volta de 105 vezes na vida útil da estrutura com duração de 5% desse período, sendo reversíveis, isto é, não causam danos permanentes, como por exemplo vibrações excessivas, movimentos laterais, empoçamentos ou abertura de fissuras:

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \omega_1 \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\omega_{2j} F_{Qj,k})$$



Combinações raras: atuam no máximo algumas horas na vida útil da estrutura, são irreversíveis, causando danos permanentes, por exemplo fissuras e danos aos fechamentos:

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\omega_{1j} F_{Qj,k})$$

Obs. Os valores de ω_1 e ω_2 são dados na Tabela 2 pagina 19 da NBR 8800:2008

Os valores aceitáveis de deslocamentos pela NBR 8800:2008 estão na tabela C-1 da página 117.

Apresentação do Estudo de Caso

A torre em estudo trata-se de uma estrutura treliçada para suportar um equipamento elétrico de subestação de energia elétrica, o transformador de corrente. Segundo Muzy (2012), estes “são equipamentos que fornecem valores de corrente e tensão, que se adequam e respeitam os limites máximos dos demais instrumentos utilizados na subestação, como os de medição e de proteção [...]”. Na fotografia da subestação da figura 2 pode-se observar um transformador de corrente em 1º plano, repetida a seguir com o destaque para ele:

Figura 3: Destaque para o transformador de corrente na subestação



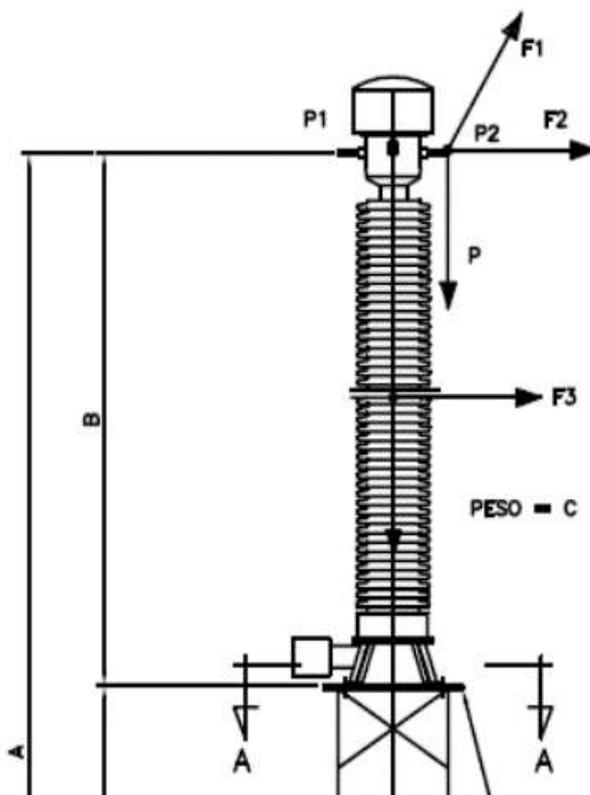
Fonte: Muzy, 2012



Este equipamento é construído em metal, com isoladores cerâmicos e enrolamentos de cobre. No caso deste estudo é um transformador de corrente de 5000kV da fabricante ALSTON com 6 enrolamentos, modelo CTH 550, que pesa 1800kg e tem 4,4m de altura.

Os cabos elétricos ficam a 8m do chão, portanto é necessário projetar uma estrutura de suporte que o eleve a esta altura, o que resulta neste caso em um suporte de 3,6m. Porém uma subestação não possui somente um transformador e dependendo do perfil do terreno, estes podem ter alturas variadas, sendo assim o suporte em questão precisava ter uma variação da altura de +/- 300mm, onde então ele foi dimensionado para a maior altura que seria de 3,9m. Segue esquemático de cargas do transformador em seu suporte:

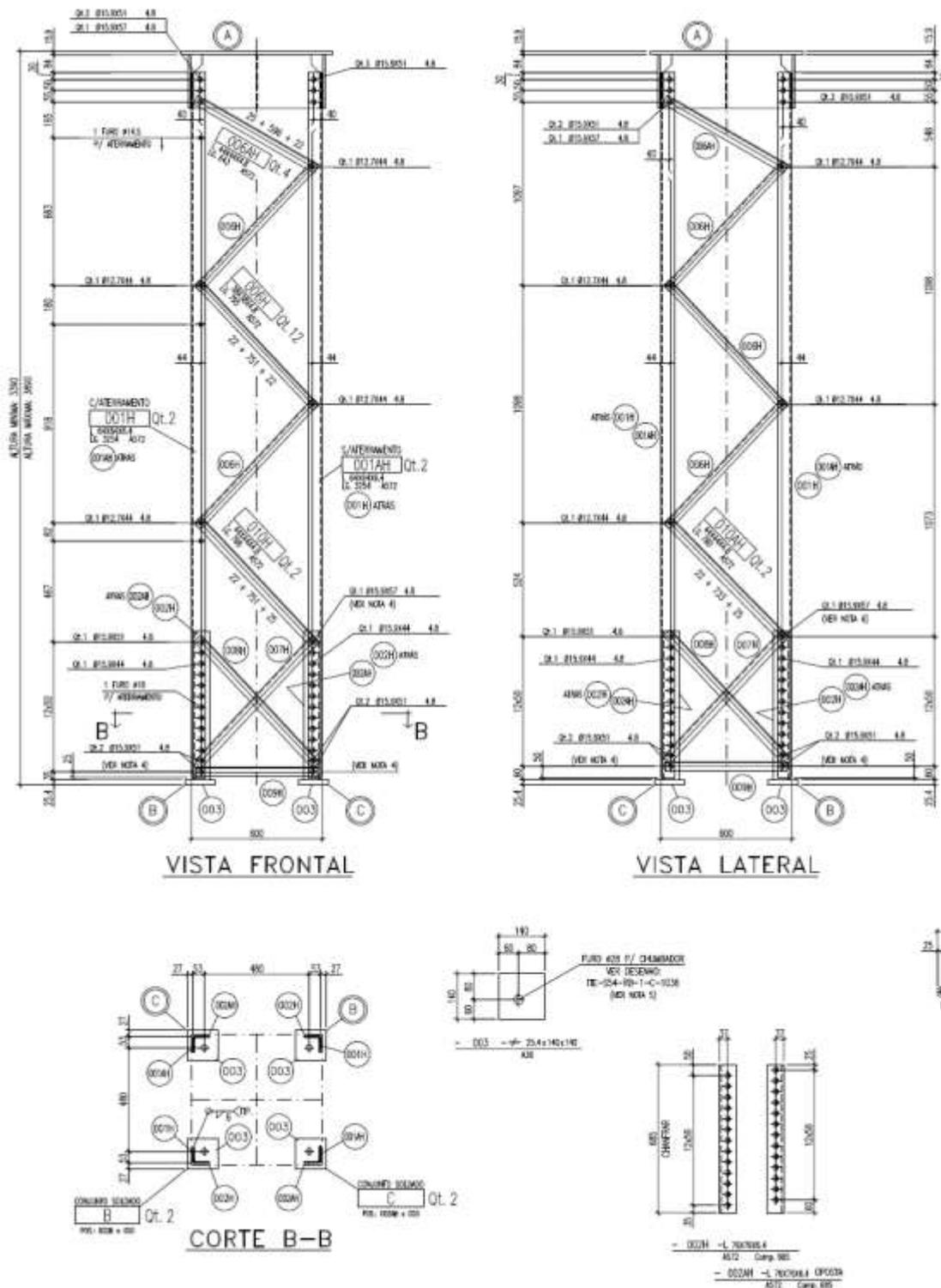
Figura 4: Diagrama de cargas do transformador



Fonte: Arquivo técnico projetos SNEF



Figura 5: Detalhamento da Torre suporte



Fonte: Arquivo técnico projetos SNEF



Cálculo Dos Esforços De Vento (NBR 6123)

Conforme preconiza a ABNT NBR 6123:1988, sobre os esforços devido ao vento nas estruturas, obteve-se as seguintes cargas finais para vento a 90° e a 45°:

- **Vento a 90°:** $F_a = 120,42$ [kN]

- **Vento a 45°:** $F_{Ca} = 139,68$ [kN]

Cargas Na Torre

Ações Permanentes

- Normais:

. Peso próprio da estrutura (Pp): calculado pelo software

. Peso de equipamentos: (Pe): peso do transformador

(Pc): peso do cabo

. Tração no cabo: (Tc)

Ações variáveis

- Normais:

. Vento 45° na estrutura (Fv45)

. Vento 90° na estrutura (Fv90)

. Vento no equipamento (F3)

. Vento no cabo (F1)

- De construção ou manutenção

. 1 Montador (Fm)

Valores das cargas e dos coeficientes de ponderação das ações:



Tabela 2: Cargas e coeficientes de ponderações

Carga	eixo	Valor (kgf)	Valor (kN)	Distancia (m)**	Momento (kN.m)	δ_g	δ_q	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Pp	-z	*				1,25				
Pe	-z	1800	18			1,50				
Pc	-z	30	0,3			1,50				
Tc (F2)	x	150	1,5	4,44	6,66	1,20				
Fv45	x/y	139,7	1,4				1,40	0,6	0,3	0,0
Fv90	x	120,4	1,2				1,40	0,6	0,3	0,0
F3	x	250	2,5	2,22	5,55		1,40	0,6	0,3	0,0
F1	y	50	0,5	4,44	2,22		1,40	0,6	0,3	0,0
Fm	-z	70	0,7				1,30	0,5	0,4	0,3

Fonte: Elaboração própria

* peso próprio da estrutura a calcular automaticamente pelo software

** esforços no equipamento transferidos para o centro da base superior da torre

Combinações de Ações

Combinações Últimas

Combinações últimas normais - CUN

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k})$$

1- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4Fv45) + [1,4,0,6.(F3+F1)]$

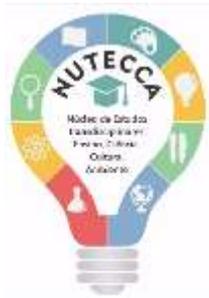
2- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4Fv90) + [1,4,0,6.(F3+F1)]$

3- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4F3) + [1,4,0,6.(F v45+F1)]$

4- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4F3) + [1,4,0,6.(F v90+F1)]$

5- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4F1) + [1,4,0,6.(F v45+F3)]$

6- $(1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,4F1) + [1,4,0,6.(F v90+F3)]$



Combinações últimas especiais - CUE

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k})$$

Não aplicável

Combinações últimas de construção – CUC

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k})$$

$$1- (1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,3Fm) + [1,4,0,6.(Fv45+F1+F3)]$$

$$2- (1,25Pp+1,5Pe+1,5Pc+1,2Tc) + (1,3Fm) + [1,4,0,6.(Fv90+F1+F3)]$$

Combinações últimas excepcionais - CUX

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k})$$

Não aplicável

Combinações de Serviço

Combinação quase permanente de serviço - CPS

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

Não aplicável

Combinações frequentes de serviço - CFS

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

$$1- (Pp+Pe+Pc+Tc)+(0,6Fv45)+[0,0(F3+F1)]$$

$$2- (Pp+Pe+Pc+Tc)+(0,6Fv90)+[0,0(F3+F1)]$$

$$3- (Pp+Pe+Pc+Tc)+(0,6F3)+[0,0(Fv45+F1)]$$

$$4- (Pp+Pe+Pc+Tc)+(0,6F1)+[0,0(Fv45+F1)]$$



Combinações raras de serviço - CRS

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Qj,k})$$

1- $(P_p + P_e + P_c + T_c) + F_m + [0,3(F_v45 + F_3 + F_1)]$

2- $(P_p + P_e + P_c + T_c) + F_m + [0,3(F_v90 + F_3 + F_1)]$

Estes são os parâmetros e combinações de cálculo utilizados para o dimensionamento da torre pelo método de Estados Limites.

Modelagem Numérica Utilizando o Ftool

Criado pelo Professor Luiz Fernando Martha, do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), o “*Ftool*” é uma das mais difundidas ferramentas didáticas de cálculo de estruturas bidimensionais utilizadas no Brasil. Sua interface é simples e intuitiva, fazendo análises estruturais de elementos de barras isotrópicas homogêneas com bastante precisão.

Sabendo-se que a torre do estudo forma uma figura retangular simétrica, cujas laterais são formadas de mesmos perfis em posições opostas dos contraventamentos para obter o travamento, para o modelo matemático no Ftool adotou-se um dos perfis laterais, lançando neste a metade da carga total da torre. Neste caso, sendo a figura 2D, não se atribuiu a este modelo as cargas de Vento a 45°, ou do vento no cabo que atuam no sentido perpendicular ao plano do modelo e também não foram aplicados a este os coeficientes de ponderação da Norma NBR8800:2008, justamente de forma a obter um resultado simples e rápido para comparação com o modelo detalhado.

Desta forma as cargas lançadas no modelo Ftool foram:



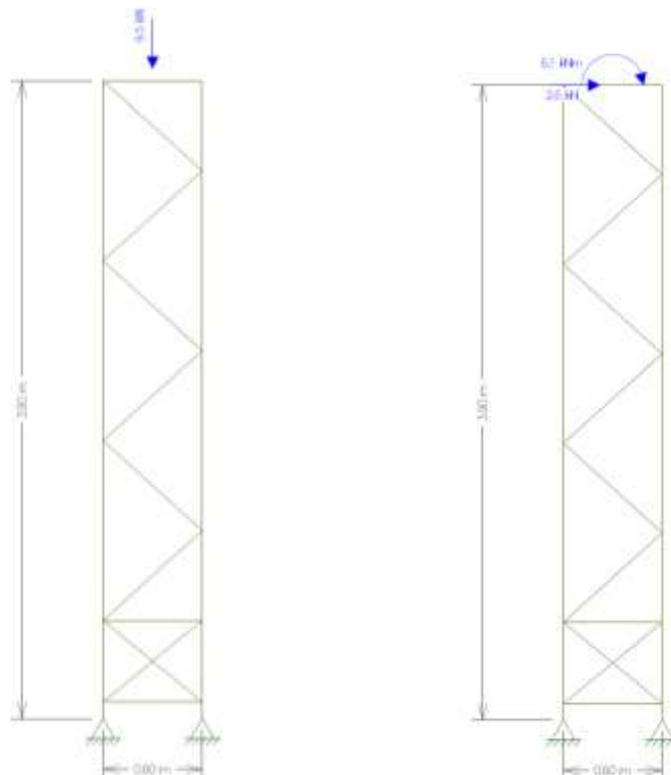
Tabela 3: Cargas para Ftool

Carga	eixo	Valor (kN)	Distancia (m)**	Momento (kN.m)	Carga Ftool (kN)	Momento Ftool (kN.m)
Pp	-z				desconsiderada	
Pe	-z	18			9,0	
Pc	-z	0,3			0,125	
Tc (F2)	x	1,5	4,44	6,66	0,75	3,33
Fv45	x/y	1,4			desconsiderada	
Fv90	x	1,2			0,6	
F3	x	2,5	2,22	5,55	1,25	2,75
F1	y	0,5	4,44	2,22	desconsiderada	
Fm	-z	0,7			0,35	

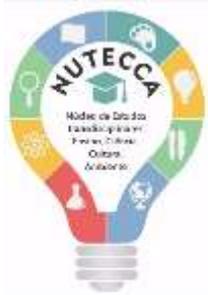
Fonte: Elaboração própria

Totalizando: eixo -z: 9,5kN eixo x: 2,6kN - 6,1kN.m

figura 7: Torre modelada no FTOOL



Fonte: Modelamento FTOOL

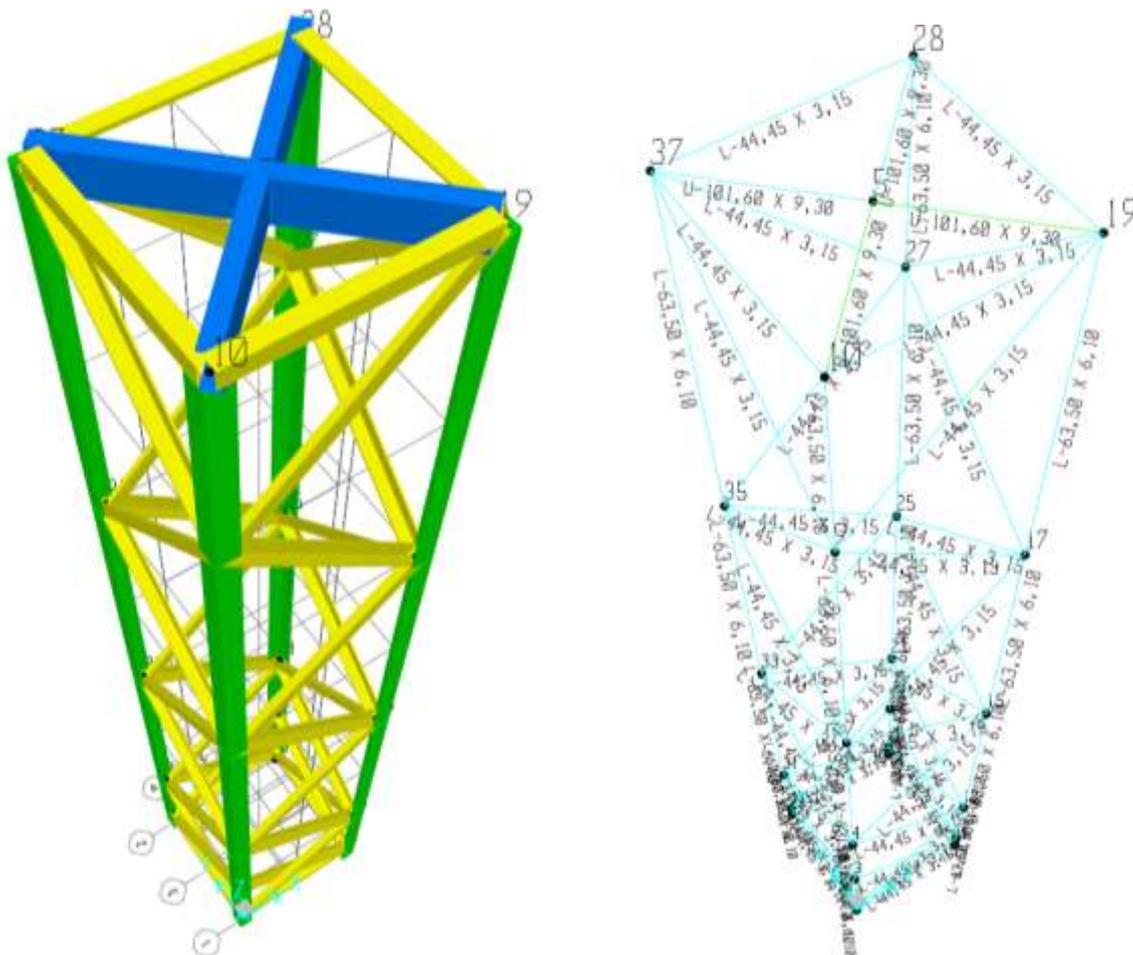


Modelagem Numérica Utilizando o SAP 2000

Para a análise no software SAP2000, conforme descrito anteriormente foi construído o modelo matemático simplificado da torre constante da Figura 6. Neste software são dadas entradas além das cargas, a todos os coeficientes de ponderação descritos na Tabela 2, bem como as combinações de cargas de E.L.U. e E.L.S. descritas anteriormente como preconiza a norma NBR8800:2008.

Sendo assim, o modelo matemático virtual ficou assim construído:

figura 8: Torre modelada no SAP 2000



Fonte: Modelamento SAP 2000

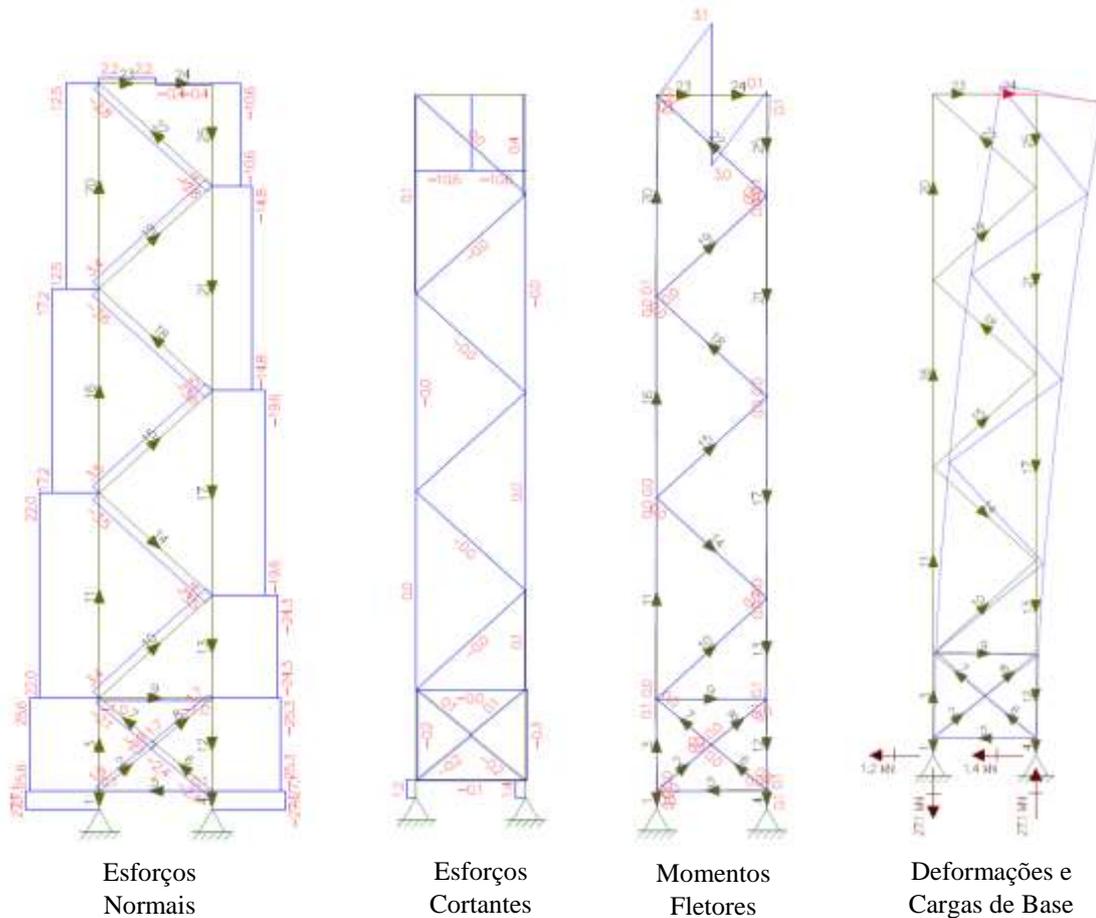


Resultados e Análises

Resultados Ftools

Para o Ftool obteve-se os seguintes resultados:

figura 9: Resultados Ftool

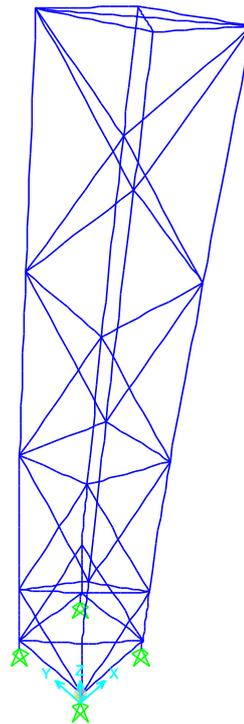


Fonte: Modelamento FTOOL

A tela de print da deformação do software não apresenta o valor numérico, mas o resultado da deformação para o nó direito superior extraído do software é de: Dx: 3,947mm e Dy: -4,825mm



figura 11: Resultado SAP 2000: Deformação Global



Fonte: Modelamento SAP 2000

No SAP os resultados são apresentados em tabelas, com valores para cada um dos nós e para cada caso de carga e combinação. Portanto apresentam-se a seguir os extratos das tabelas com os dados que são relevantes a este trabalho:

Reações na Base:

Tabela 4: Reações na base (SAP)

CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
max	-1,5	-3,785E-14	26,53	1,8053	-13,3307	1,7889
min	-6,383	-1,806	20,496	-6,7711	-34,4444	0,36

Fonte: Modelamento SAP 2000



Deslocamentos:

Tabela 5: Deslocamentos (SAP)

CaseType	U1 (x)	U2 (y)	U3 (z)
Text	m	m	m
max	0,00329	0,000048	0,000495
min	0	-0,00214	-0,00082

Fonte: Modelamento SAP 2000

Conclusões

Comparando os resultados apontados pelos 2 softwares temos o seguinte:

Reações Na Base:

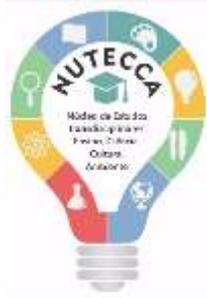
Ftool: 27,1kN eixo z;	1,4kN eixo x
SAP: 26,53kN eixo z;	1,5kN eixo x
Diferença relativa: 2,1%	6,7%

Deslocamentos:

Ftool: -4,825mm eixo z;	3,947mm eixo x
SAP: -0,82mm eixo z;	3,29mm eixo x
Diferença relativa: 83,0%	16,6%

As diferenças relativas para as reações de base são menores que 10%, já os deslocamentos foram mais significativos, pois o software tridimensional tem mais elementos para retornar o resultado com maior precisão que o software bidimensional.

Isto posto, pode-se concluir que a análise bidimensional pode não ser determinística para definição dos perfis da estrutura, porém dão um resultado bem aproximado, podendo ser muito útil nos casos em que é preciso estimar as características básicas de uma estrutura sem gasto de muitas horas ou recursos, como por exemplo em projetos conceituais, básicos ou para pré-orçamentos.



Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a empresa SNEF Brasil pela disponibilização do estudo de caso. Agradecem também ao IEC e a PUC Minas pelo apoio indireto à realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 10-97: Design of Latticed Steel Transmission Structures**. Virginia, USA 1998

ARANTES, Paulo Roberto. Apostila do Curso: **Comercialização e Elaboração de Propostas de Serviços de Engenharia**. IEC PUC Minas. Março 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1980

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008

FAKURY, Ricardo Hallal. Apostila do Curso: **Dimensionamento Básico de Elementos de Estruturas de Aço**. UFMG. Versão 3. Março 2009

MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

PONTE COALBROOKDALE. **Greatbuildings**. Imagem. Disponível em: <http://www.greatbuildings.com/buildings/Iron_Bridge_at_Coalbrookdale.html> Acesso em Julho 2017.

SÁLES, J. J.; MALITE, M.; GONÇALVES, R. M. (2004). **Segurança nas estruturas**. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

TAMIETTI, Ricardo Prado. Apostila do Curso: **Engenharia de Projetos Industriais**. IEC PUC Minas. Julho 2009