



Tema: Estruturas Metálicas e Mistas

## ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS DE AÇO SUPORTES DE MÁQUINAS ROTATIVAS \*

Rafael Marin Ferro<sup>1</sup>

Walnório Graça Ferreira<sup>2</sup>

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani<sup>3</sup>

### Resumo

A análise dinâmica de estruturas de aço suportes de máquinas rotativas, ou equipamentos mecânicos rotativos, é necessária para assegurar, não somente o conforto dos usuários, como também garantir boas condições para o funcionamento dos equipamentos suportados sobre as estruturas. Em recentes estudos de dinâmica estrutural e dinâmica de equipamentos, verifica-se a dificuldade de realização de modelos reais das estruturas suportes de máquinas rotativas. O presente artigo faz uma verificação do desempenho das estruturas, de acordo com modificações em suas ligações, considerando os carregamentos provocados por máquinas rotativas e comparando com os limites de deslocamentos das estruturas, estabelecidos por normas de equipamentos e estruturas. Para tanto, é necessário a utilização de um modelo numérico computacional que represente da forma mais real possível o sistema físico a ser analisado. O objetivo deste artigo é realizar um estudo de aplicação de carregamento dinâmico provocado por equipamentos mecânicos rotativos sobre suas estruturas suportes com diferentes tipos de ligações, utilizando modelos computacionais, realizados com o software STRAP 2012. Serão realizados modelos de estruturas de aço suportes com ligações rígidas, ligações flexíveis (rotuladas) e ligações semirrígidas, onde se aplicam as cargas das máquinas rotativas e visualiza-se qual base suporte tem o melhor desempenho ou maior confiabilidade na relação estrutura versus carregamento dinâmico, de acordo com as suas ligações.

**Palavras-chave:** Análise dinâmica; Vibração; Máquinas rotativas; Estrutura de aço suporte.

### DYNAMIC ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES SUPPORT OF ROTATING MACHINERY

#### Abstract

Dynamic analysis of steel structures supports of rotating machinery or rotating mechanical equipment is necessary to ensure not only the comfort of the users, but also ensure good conditions for the operation of equipment supported on structures. In recent studies of structural dynamics and dynamics of equipment, there is the difficulty of achieving real models of support structures of rotating machinery. This paper is a verification of the performance of structures in accordance with changes in their connections, considering the loads caused by rotating machinery and compared with the limits of displacements of the structures established by standards of equipment and structures. Therefore, the use of a computational numerical model that represents the most real way possible physical system to be analyzed is required. The purpose of this article is a study of the application of dynamic loading caused by rotating mechanical equipment on their steel structures supports with different types of connections using computational models, performed with software STRAP 2012. Structures with connections rigid, pinned or semi-rigid, ranging loads of rotating machinery viewing will be held support that has better performance and greater reliability in relation structure versus dynamic load, according to their connections.

**Keywords:** Dynamic Analysis; Vibration; Rotating Machinery; Steel Structures Support

\* Contribuição técnica ao **Construmetal 2014** – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica – 02 a 04 de setembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Professor Especialista, Coordenação de Mecânica, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES - Campus Aracruz, Aracruz, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil - UFES - ES, Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Tecnológico - Campus de Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira Civil, Professora Doutora, Departamento de Engenharia Civil - UFES - ES, Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Tecnológico - Campus de Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil.

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Análise Dinâmica das Estruturas**

A análise dinâmica das estruturas estuda os movimentos ou deslocamentos dos corpos, provocados por forças a eles aplicadas, e também estuda essas forças que provocam os movimentos nas estruturas. Estruturas de concreto e aço são elementos sujeitos à esforços que devem resistir para que o formato inicial projetado dessas estruturas se mantenha razoavelmente próximo das configurações desejadas durante os movimentos introduzidos. De acordo com Brasil [1] os movimentos de uma estrutura devem ser suficientemente pequenos em torno de uma configuração inicial projetada.

Considerando uma aplicação de cargas e esforços feita de maneira lenta, com velocidades desprezíveis, é considerável não levar em conta o aparecimento de forças de inércia. Com isso, a análise dessas estruturas é feita de forma quase estática, onde na maioria das vezes desconsidera-se o efeito dos movimentos sobre o equilíbrio (análise linear). De outra forma, devemos considerar resultados de movimentos oscilatórios em torno da configuração inicial da estrutura projetada com efeitos que podem ser indesejados. Esses movimentos oscilatórios podem levar a reações e esforços internos solicitantes maiores que os determinados estaticamente e a permanência de seres humanos sobre a estrutura pode se tornar desconfortável. Também, os movimentos podem afetar o funcionamento de equipamentos sobre elas montados ou ainda pessoas e equipamentos nas imediações da estrutura podem ser afetados pelo seu movimento.

Em seus estudos Brasil [1] indica que as características básicas para considerar em uma análise dinâmica de uma estrutura, são:

- Cargas, reações, deslocamentos, deformações e esforços internos que variam com o tempo, com velocidades não desprezíveis;
- Além das cargas aplicadas, reações e esforços internos (que se equilibram numa situação estática) participam também do equilíbrio forças de inércia (relacionadas com a massa da estrutura) e forças que dissipam energia (amortecimento);
- As análises não levam, via de regra, a um resultado único (estático), mas a um histórico de resposta.

Assim, citam-se as situações em que se deve pensar na possibilidade ou necessidade de análise dinâmica de estruturas, entre outras temos:

- Fundações de máquinas e equipamentos;
- Estruturas submetidas ao tráfego de veículos ou público;
- Estruturas submetidas ao movimento rítmico de pessoas;
- Efeito de sismos (terremotos) sobre estruturas;
- Efeito de vento sobre estruturas;
- Efeito de impactos e explosões sobre estruturas;
- Efeito de ondas do mar sobre estruturas.

Para uma análise dinâmica, adequada, inicia-se pela criação de modelos que permitam converter uma entidade pré-estabelecida, de forma complexa, em algo que os recursos atuais possam compreender e modelar. Assim, de acordo com Brasil [1] no princípio, transforma-se a estrutura real em um modelo físico (ou conceitual), por simplificações como barras, placas, apoios idealizados, materiais de comportamento simplificado, massas pontuais, etc. A partir de então, constrói-se um modelo matemático, um sistema de equações relacionando as características da estrutura, introduzindo as leis da mecânica. Na fase final, procura-se resolver essas equações por vias analíticas ou numéricas.

No caso da dinâmica das estruturas, o modelo matemático a que se chega é constituído de sistemas de equações diferenciais em que o tempo tem papel fundamental. Isso é bem diferente do caso estático, em que se recai em sistemas de equações algébricas. Atualmente, os processos de modelagem matemática e de solução numérica foram transformados pelo advento da computação através de programas de modelagem. Outro processo talvez ainda mais importante, que ocorreu em função do desenvolvimento dos computadores, foi o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos. Esse método pode ser melhor verificado em Clough e Penzien [2].

## **1.2 Vibrações Mecânicas em Máquinas Rotativas**

Vibrações causadas por equipamentos mecânicos, como máquinas rotativas, devem ser rigidamente controladas de acordo com a aplicação e os critérios de normas técnicas existentes, e devem ser utilizadas como uma base das condições de funcionamento de equipamentos mecânicos, sobretudo no caso de manutenções preditivas. Em seus estudos Soeiro [3] mostra que a manutenção preditiva é um formato de manutenção onde se considera que em equipamentos ou máquinas, geralmente em regime de operação, deve ocorrer o monitoramento contínuo e programado com o objetivo de detecção falhas como desbalanceamento, desalinhamento, folgas generalizadas, má fixação, campo elétrico desequilibrado, etc.

Desgaste prematuro de seus componentes, quebras inesperadas de peças, fadiga estrutural do equipamento e de sua base suporte, desconexão de partes e até uma possível parada do equipamento não programada, são as falhas nas máquinas que ocasionam vibrações excessivas de partes do equipamento e podem provocar danos aos processos industriais. Assim esse formato de manutenção, a preditiva, permite indicar a operação do equipamento com máxima eficiência durante sua vida útil, minimizando os custos de manutenção. Dentro do pilares da manutenção acima citada, para efetuar o controle dos fenômenos de vibração devem ser seguidos três procedimentos diferenciados, considerando o último como o foco do estudo:

- Eliminação das fontes: balanceamento, alinhamento, troca de peças defeituosas, aperto de bases soltas, etc.
- Isolamento das partes: colocação de um modo elástico amortecedor de modo a reduzir a transmissão da vibração a níveis toleráveis.
- Atenuação da resposta: alteração da estrutura (reforços, massas auxiliares, mudança de frequência natural, etc.).

## **1.3 Justificativa e Objetivos da Pesquisa**

O avanço do desenvolvimento tecnológico e científico, que vem ocorrendo ao longo das últimas décadas na construção civil e industrial, continua evoluindo considerando o conhecimento no desenvolvimento dos materiais, novas técnicas construtivas e novos

modelos de produção, sobretudo no aprimoramento dos processos de cálculo. Assim, o desenvolver de novos projetos, com estruturas de aço, se torna a cada dia mais responsável por promover maior industrialização da construção civil, onde consideramos a utilização de peças pré-fabricadas e pré-montadas, incluindo o maior controle de qualidade, influenciando o aparecimento de obras com grandes vãos e com o tempo de construção reduzido.

Escolas de engenharia e empresas, cada vez mais, desenvolvem soluções estruturais mais leves, com menor custo de produção, com maior velocidade de construção e maior gama de aplicação. Esse desenvolvimento acaba gerando estruturas mais esbeltas, flexíveis e com baixo fator de amortecimento, onde essas estruturas se tornam mais suscetíveis a problemas de dinâmica com níveis de vibração indesejáveis. Considerando a aplicação de ações como de ventos, explosões, terremotos, tráfego de veículos, movimentação de pessoas, ação de equipamentos, ondas, escoamento turbulento de fluidos, onde nessas ações, podem aparecer mais de uma característica, como intensidade, sentido, direção e posição, que são variáveis ao longo da vida útil da estrutura, amplificando a ação dinâmica da estrutura.

Em sua pesquisa, Assunção [4] mostra que as estruturas devem resistir às combinações de carregamentos mais críticas previstas para toda a sua vida útil com certa reserva de segurança. Para os carregamentos mais comuns, consideram-se o peso próprio da estrutura, as ações acidentais, as sobrecargas previstas, os recalques, as variações de temperatura e as ações decorrentes da natureza.

Para que o dimensionamento de estruturas sujeita a vibração, causadas por carregamento dinâmico, fique de acordo com critérios desenvolvidos nas normas técnicas vigentes, uma análise dinâmica estrutural deve ser realizada, ou seja, realizar uma manipulação das propriedades dinâmicas dos sistemas estruturais, tais como massa, rigidez e amortecimento estrutural, considerando os movimentos vibratórios dos equipamentos mecânicos. Em uma análise dinâmica estrutural, é muito importante considerar que o modelo numérico computacional deve representar a forma mais real possível do sistema físico a ser analisado. Assim em projetos industriais, de forma geral, que contenham plataformas ou pórticos de aço, que estão sujeitos a ações dinâmicas provenientes dos mais diversos tipos de equipamentos envolvidos nos processos de produção, onde em sua grande maioria há a necessidade de aplicação de máquinas rotativas, devem ser realizadas análises dinâmicas. Com isso, as máquinas rotativas causam um efeito dinâmico sobre a estrutura, que ocorre pelo desbalanceamento do rotor, ou seja, a concentração de massa fora do eixo de rotação do rotor, onde vibrações harmônicas são causadas pelo desbalanceamento, gerando várias condições dinâmicas na estrutura.

A estrutura suporte deve ser dimensionada de forma a prevenir que vibrações, com limites inaceitáveis, sejam transmitidas às estruturas e outros envolvidos nas proximidades, respeitando as amplitudes e acelerações máximas em função do equipamento e dos critérios, tanto do conforto humano quanto do bom desempenho dos equipamentos e estruturas suportes.

O estudo da análise dinâmica em estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos, como as vibrações geradas por equipamentos mecânicos rotativos, é de forma geral um processo de difícil aplicação pela grande maioria dos engenheiros mecânicos e civis e os que atuam na área de projetos estruturais. Dificuldades como na quantificação do carregamento, na representação da excitação dinâmica, na determinação real das causas e efeitos das vibrações sobre as estruturas, pessoas e equipamentos e ainda a energia necessária para dissipar esta excitação. Considerando estas dificuldades, a maioria dos engenheiros projetistas de

estruturas, geralmente superestimam as estruturas de forma a considerar os carregamentos dinâmicos como carregamentos estáticos multiplicados por fatores de amplificação dinâmica.

Diante da facilidade de acesso a computadores com alto desempenho e softwares computacionais cada vez mais avançados, a capacidade de análise dos sistemas estruturais foi ampliada, gerando soluções mais rápidas e precisas. Por outro lado, ainda os fabricantes de máquinas preocupam-se de forma geral somente com o bom desempenho e funcionamento de seus equipamentos, e ainda omitem ou não têm dados suficientes, como alguns dados necessários para o cálculo das estruturas que suportam estes equipamentos, como as forças dinâmicas reais geradas por estas máquinas. Assim, as estruturas suportes, se não projetadas adequadamente, podem causar falhas no equipamento e na própria estrutura. Com isso, os danos geram paradas da produção para manutenções, como troca de componentes mecânicos e de reforço da estrutura, o que acarreta em custos para as empresas. O fato de as estruturas apresentarem custos muito inferiores quando comparados aos custos dos equipamentos é um fator muito comum para o não dimensionamento dinâmico efetivo.

No período de desenvolvimento desta pesquisa, percebe-se que a análise de vibração de estruturas de aço suportes de máquinas rotativas é um assunto pouco estudado. A maioria das pesquisas encontradas é ainda considerando a análise dinâmica de estruturas constituídas totalmente em concreto ou estruturas mistas.

Esse trabalho visa à análise do efeito do carregamento dos equipamentos mecânicos rotativos sobre estruturas de aço suportes presentes no ambiente, principalmente, industrial. Assim, parâmetros iniciais serão estabelecidos para os três tipos de ligações (rígidas, rotuladas ou semirrígidas) entre perfis metálicos que podem ser considerados no projeto dessas estruturas de aço que suportam os equipamentos e verificando qual base têm o melhor desempenho em relação ao carregamento dinâmico provocado pelos equipamentos nas estruturas suportes.

O Estudo faz a análise de um modelo numérico computacional de uma estrutura metálica suporte de bombas centrífuga movidas por motores elétricos, ou conjunto moto-bomba, considerando que a sua ocorrência, ou de equipamentos com suas características, é muito comum na indústria em geral.

A Figura 01 apresenta um conjunto moto-bomba utilizado em projetos industriais.

Figura 01 - Conjunto moto-bomba. Fonte: KSB Bombas.



## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Considerações Para o Projeto de Estruturas de Aço Suportes – Recomendações**

Conforme pesquisas passadas, considerava-se que o efeito das cargas dinâmicas sobre as estruturas, poderia ser considerado através de majoração das cargas estáticas. Contudo em pesquisas recentes, verifica-se que a os trabalhos passados não representavam, de forma correta, o efeito das cargas dinâmicas na estrutura, visto que a análise dos efeitos causados por uma carga dinâmica difere muito da análise dos efeitos causados por uma carga estática. Assim, características inerentes a cada tipo de atividade que geram uma excitação dinâmica, devem ser consideradas como carregamentos que possuem frequência, amplitude e forma, levando os sistemas estruturais a diferentes tipos de perturbações.

A seguir serão apresentadas normas que se referem à análise de estruturas submetidas a ações dinâmicas e critérios relativos à análise do conforto humano e o bom desempenho dos equipamentos mecânicos.

#### **2.1.1 Norma Brasileira – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: NBR 8800 (2008)**

A norma brasileira, NBR 8800 [5], indica que estruturas de pisos formadas por grandes vãos e baixo amortecimento podem resultar em vibrações que provocam desconforto durante as atividades humanas normais e causar prejuízo no bom funcionamento de equipamentos. A NBR 8800 [5] recomenda que em nenhum caso a frequência natural da estrutura do piso seja inferior a 3 Hz e para estruturas com problemas de vibração em pisos, o projetista deverá recorrer a uma análise dinâmica que leve em conta os seguintes fatores:

- a) As características e a natureza das excitações dinâmicas, como por exemplo, as decorrentes do caminhar de pessoas, de atividades rítmicas, de máquinas com partes rotativas, etc.;
- b) Os critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso;
- c) A frequência natural da estrutura do piso;
- d) A razão de amortecimento modal;
- e) Os pesos efetivos do piso.

A NBR 8800 [5] indica e recomenda, para análises mais precisas, algumas normas e especificações nacionais e internacionais, além de bibliografia especializada.

#### **2.1.2 Deutsche norm - Vibrations in buildings - part 3: Effects on structures: DIN 4150-3 (1999)**

A norma alemã DIN 4150-3 [6] fornece valores limites de velocidade de vibração de partícula em mm/s, levando em consideração o tipo de estrutura e o intervalo da frequência em Hz. As três classes de edificações a que a norma se refere são:

- a) Edifícios industriais;
- b) Habitações;
- c) Monumentos de construções delicadas.

As frequências são analisadas em três intervalos, a saber: valores inferiores a 10 Hz, valores entre 10 e 50 Hz e valores entre 50 e 100 Hz. A norma DIN 4150-3 [6] recomenda que, para frequências acima de 100 Hz, a estrutura suporta níveis altos de vibração.

Para estruturas de instalações industriais, a DIN 4150-3 [6] admite velocidades de até 50 mm/s para frequências entre 50 e 100 Hz, no nível da fundação, para que não ocorram danos estruturais, enquanto que para o pavimento mais elevado da edificação admite-se até 40 mm/s em qualquer frequência, sem riscos de danos.

Na avaliação dos danos estruturais provocados pelas vibrações do terreno, os valores limites de velocidade admissíveis para diversos tipos de construção, em função da frequência são apresentados na Tabela 01.

Tabela 01: Velocidade permissível para vibrações transientes em edifícios - DIN 4150-3 (1999)

Velocidades Permissíveis (mm/s)				
Tipo de Estrutura	Nível da Fundação			Nível mais alto da Edificação
	Frequências			Qualquer Frequência
	< 10 Hz	10 – 50 Hz	50 – 100 Hz	
Industrial	20	20 – 40	40 – 50	40
Residencial	5	5 – 15	15 – 20	15
Construções mais sensíveis a vibrações (Ex.: monumentos)	3	3 – 8	8 – 10	8

Valores de frequências superiores a 100 Hz podem ser aceitos nas partes mais elevadas das edificações. Outros valores, medidos abaixo dos limites especificados anteriormente são considerados não danosos à estrutura. A DIN 4150-3 [6] é reconhecida e aceita por toda a comunidade europeia como norma padrão. Diversos países europeus desenvolveram normas próprias, baseadas ou relacionadas à DIN 4150-3 [6].

### 2.1.3 British Standard – Evaluation and measurement for vibration in buildings - part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings: BS 7385-1 (1990)

A norma britânica BS 7385-1 [7] define três tipos de danos em edificações: danos estéticos, danos menores e danos maiores ou estruturais. Esses valores são baseados em termos de velocidade máxima e frequência.

A norma BS 7385-1 [7] admite um limite de velocidade de 50 mm/s (medido na base do edifício) em qualquer frequência para que não ocorram danos em estruturas industriais aperticadas sujeitas a vibração contínua, em que se observa amplificação dinâmica na resposta.

## 2.2 Considerações Sobre Dinâmica de Rotores de Máquinas Rotativas

### 2.2.1 Fundamentos da dinâmica de rotores

Na simulação numérica da dinâmica de rotores, a formulação de um modelo matemático que represente um sistema rotativo requer o conhecimento prévio de parâmetros de projeto,

como dimensões e dados dos materiais. O sucesso de um projeto de uma máquina rotativa consiste principalmente em:

- Evitar velocidades críticas, se possível;
- Minimizar a resposta dinâmica nos picos de ressonância, caso seja necessário;
- Passar por uma velocidade crítica;
- Evitar instabilidade;
- Minimizar as vibrações e as cargas transmitidas à estrutura da máquina durante todo o intervalo de operação.

As velocidades críticas pelas quais uma máquina pode passar até atingir sua rotação de trabalho, tornam-se um dos grandes inconvenientes na dinâmica de rotores. Nestas velocidades, o eixo da máquina pode atingir grandes amplitudes de vibração que podem causar danos irreversíveis nos mancais e demais componentes do rotor.

No caso de um rotor com o eixo em material convencional, os caminhos possíveis para reduzir a amplitude nas velocidades críticas são:

- Balancear o rotor, que significa ir direto à fonte do problema, contudo, dificilmente se consegue balancear um rotor com perfeição.
- Alterar a velocidade de rotação da máquina, distanciando-a das velocidades críticas, ou alterar a velocidade crítica através da variação da rigidez dos mancais.

Se a máquina opera próximo da velocidade crítica e esta velocidade é imprescindível, a solução é adicionar amortecimento externo ao rotor. Esta propriedade pode ser utilizada na dinâmica de rotores, onde se necessita reduzir as amplitudes de vibração quando este é excitado em uma de suas velocidades críticas. É ainda necessário dispor de hipóteses simplificadoras que viabilizam o modelo numérico, sem, contudo, descaracterizar o seu comportamento.

### **2.2.2 NBR 8008 (1983) – Balanceamento de corpos rotativos**

A Norma NBR 8008 [8] fornece o desbalanceamento residual admissível para rotores em função do tipo de máquina (quanto maior for a massa do rotor, tanto maior é o desbalanceamento admissível) e da rotação nominal (o desbalanceamento residual admissível varia inversamente com a velocidade de operação).

### **2.2.3 EUROCODE 1, Parte 3: Ações induzidas por guindastes e máquinas (2002).**

A norma europeia EUROCODE 1, PARTE 3 [9], na seção de ações induzidas por máquinas, auxilia nas características destas informações a serem requeridas e determina, para os casos mais simples, a força dinâmica gerada por máquinas com partes rotativas conforme a Equação 1.

$$F = m_{rt} \cdot e \cdot \Omega^2 = m_{rt} \cdot (e\Omega) \cdot \Omega \quad (1)$$

Onde:

F = força excitante

$m_{rt}$  = Massa do rotor

$\Omega$  = frequência circular do rotor

e = excentricidade da massa do rotor

$e\Omega$  = Qualidade de Balanceamento (Fornecido por ISO 1940-1 [10])

### **2.2.4 International Standard – Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s – Basis for specifying evaluation standards: ISO 2372 (1974)**



Para o bom funcionamento das máquinas rotativas, a ISO 2372 [11] estabelece limites de vibração que dependem da potência da máquina e do tipo de fundação. As vibrações são medidas em pontos das superfícies das máquinas que operam com frequência na faixa de 10 a 1000 Hz. A Tabela 02 apresenta as faixas de classificação:

Tabela 02: Critérios de severidade das vibrações de máquinas. ISO 2372.

Faixas de severidade de vibração	Classe das máquinas				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	
Velocidades em mm/s					
0,28	Bom	Bom	Bom	Bom	
0,45					
0,71					
1,12	Permissível	Permissível	Permissível	Permissível	
1,8					
2,8	Tolerável	Tolerável	Permissível	Permissível	
4,5					
7,1	Inaceitável	Inaceitável	Tolerável	Permissível	
11,2			Tolerável		
18			Inaceitável	Inaceitável	Tolerável
28					Inaceitável
45					Inaceitável

Onde:

Classe I - máquinas pequenas de até 15 kW;

Classe II - máquinas médias de 15 kW a 75 kW quando rigidamente montadas, ou acima de 300 kW com fundações especiais;

Classe III - grandes máquinas com fundação rígida e pesada, cuja frequência natural não exceda a velocidade da máquina;

Classe IV - grandes máquinas que operam com velocidade acima da frequência natural da fundação, como as turbo-máquinas.

### 2.2.5 Handbook of machine foundations (1976)

Outra referência encontrada na literatura técnica disponível sobre o tema, Srinivasulu e Vaidyanathan [12] fornece uma tabela mais simples de valores limites de amplitudes de vibrações para diversos tipos de máquinas. A Tabela 03 apresenta os valores propostos por Srinivasulu e Vaidyanathan [12]. Onde essa tabela será usada para validação dos modelos propostos nesta pesquisa.

Tabela 03: Amplitudes admissíveis de vibração de acordo com a velocidade do equipamento. Srinivasulu e Vaidyanathan (1976)

Tipo de máquina	Amplitude permissível (cm)
Máquina de baixa velocidade (até 500 rpm)	0,02 a 0,025
Fundações de martelos	0,1 a 0,12
Máquinas de alta velocidade:	
a) 3000 rpm	
i. Vibrações verticais	0,002 a 0,003
ii. Vibrações horizontais	0,004 a 0,005
b) 1500 rpm	
i. Vibrações verticais	0,004 a 0,006
ii. Vibrações horizontais	0,007 a 0,009

## 2.2.6 Forças desbalanceadas em máquinas rotativas

Conforme Brasil [1], modelar uma força desbalanceada, girando em torno de um eixo como uma força atuando no plano vertical (x1-x2), apontando “todas” as direções, deve-se aplicar esta força em duas direções ortogonais entre si, uma na direção horizontal (x1) com fase  $t_0$ , igual a zero, e outra na direção vertical (x2) com fase  $t_0$ , igual a  $\frac{1}{4}$  do período de vibração desta força desbalanceada. Assim, à medida que o tempo avança, teremos uma variação de duas forças de modo que a composição destas resultará na força desbalanceada, pois uma estará sendo multiplicada por  $\text{sen}(wt)$  e a outra por  $\text{sen}(wt+\pi/2)$ , e enquanto uma for máxima a outra será nula, e vice-versa.

## 2.3 Modelagem do Carregamento Dinâmico

O modelo utilizado neste trabalho é composto por 2 conjuntos moto-bombas (Motor elétrico e um bomba hidráulica) montados sobre uma plataforma (Pórtico Espacial), um deles com seu eixo orientado transversalmente ao pórtico e o segundo com seu eixo orientado longitudinalmente.

Dados do Motor Elétrico:

Massa Total:  $M_{Tm} = 9.448 \text{ kg}$

Qualidade do desbalanceamento:  $Q = 2,5 \text{ mm/s}$

Frequência de Operação:  $f = 60 \text{ Hz}$

Dados da Bomba KSB RDLO 350 575:

Massa Total:  $M_{Tb} = 2.600 \text{ kg}$

Dados da Estrutura:

Pilares e Vigas Principais: Perfil W410x38,8.

Contraventamentos e Vigas Secundárias: Perfil W380x44,5.

Motor: Perfil Geométrico Retangular com propriedades do aço com o peso total do conjunto.

Coefficiente de amortecimento: 0,8%.

Figura 02: Indicação dos Nós da estrutura.

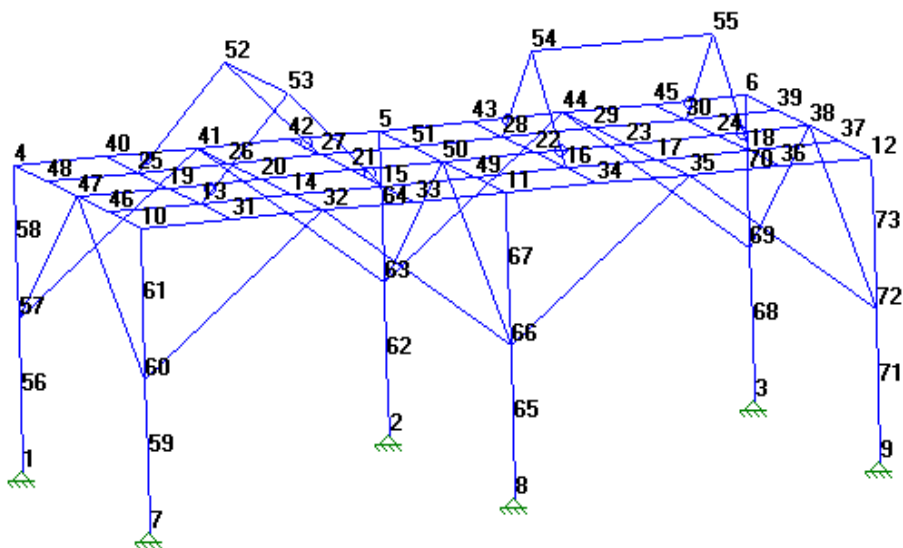
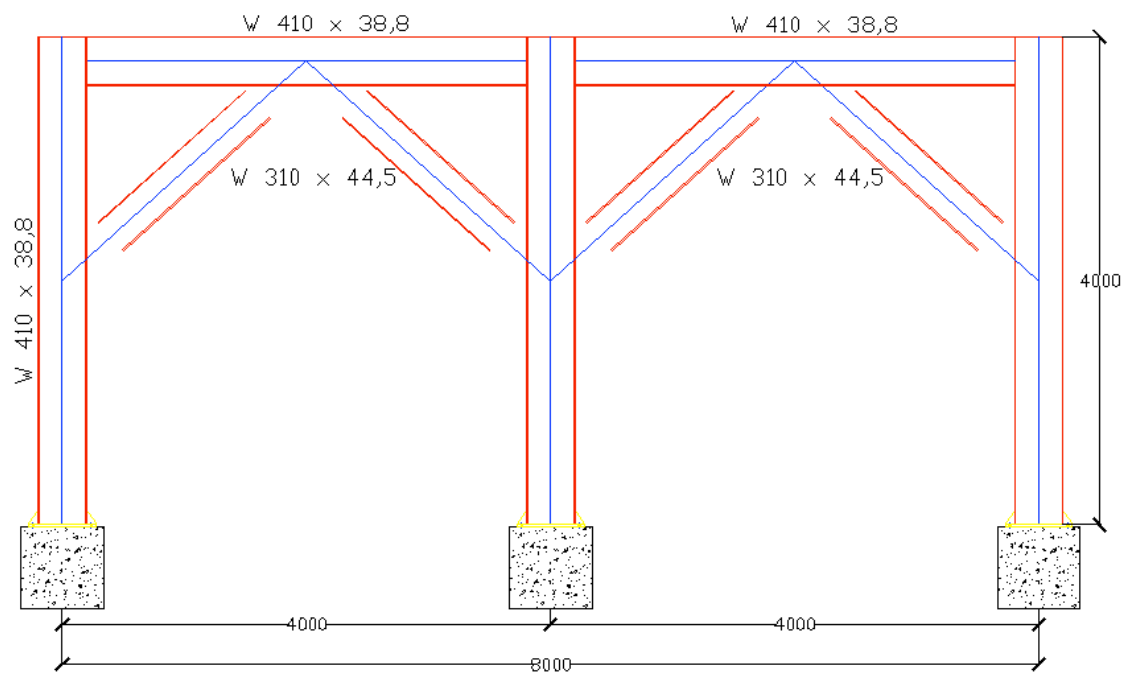
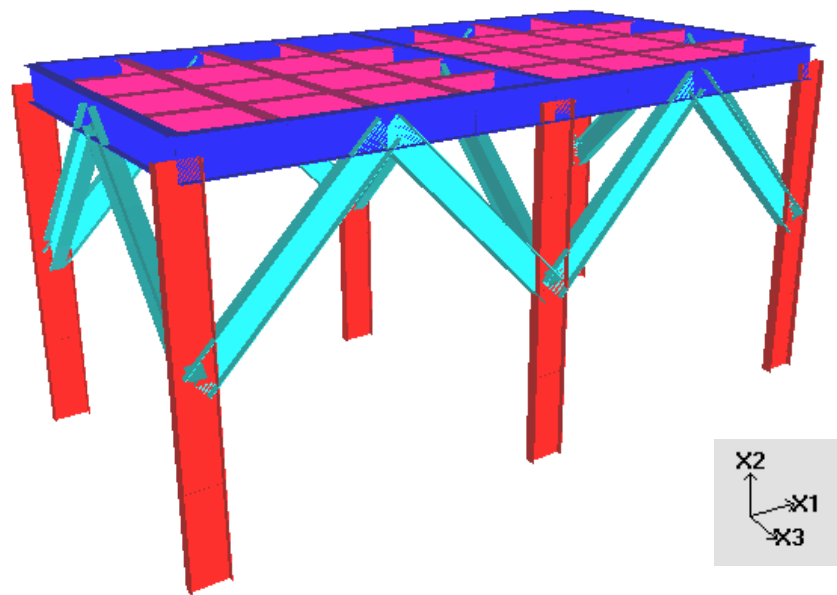
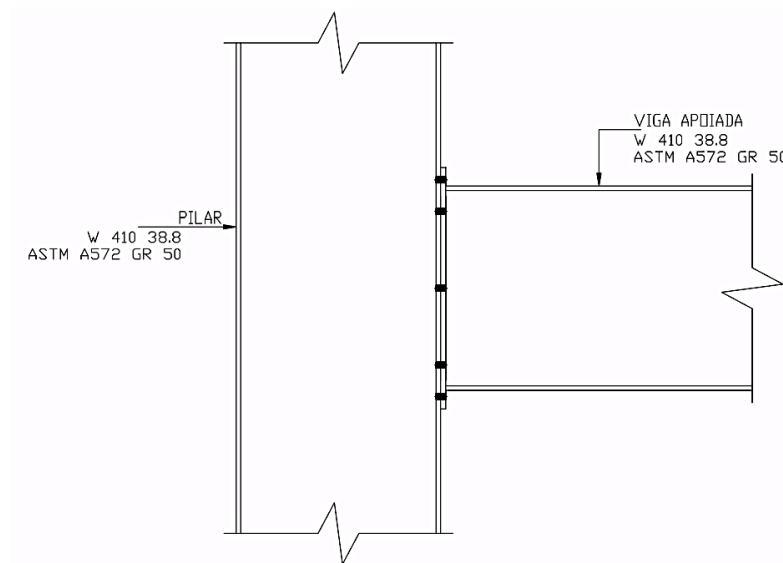


Figura 03: Estrutura suporte dimensionada.



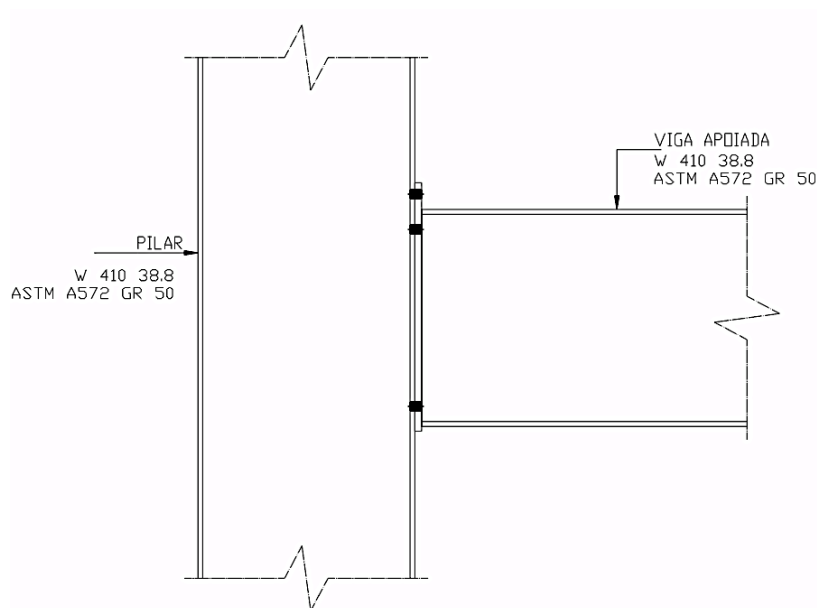
### 2.3.1 Modelo das ligações Rígidas (Modelo I)

Figura 4: Modelo de ligação rígida



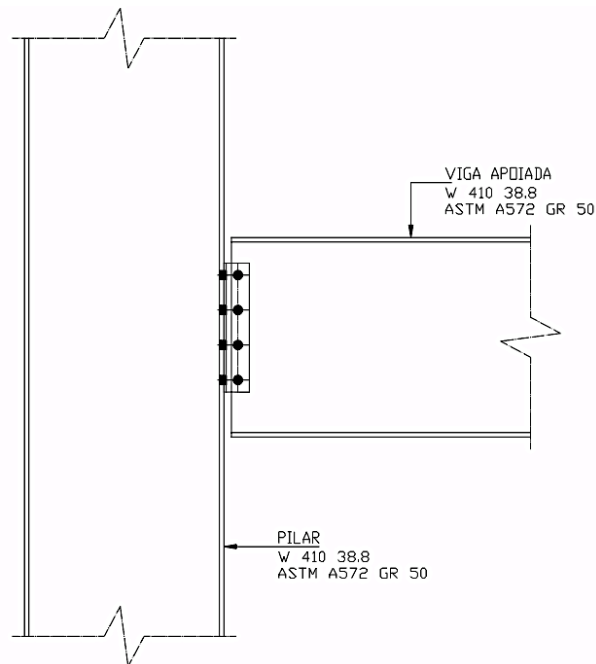
### 2.3.2 Modelo das ligações Semirrígidas (Modelo II)

Figura 5: Modelo de ligação semirrígida



### 2.3.3 Modelo das ligações Flexíveis (Modelo III)

Figura 6: Modelo de ligação flexível



Os modelos de ligação foram definidos conforme o estudo de BARBOSA [13] e modificados de acordo com os perfis utilizados nesse estudo .

A ligação semirrígida foi estabelecida de acordo com os estudos de JONES e KIRBY (1980) [14]. Assim consideramos a ligação semirrígida uma aproximação com mola de 3000 (tf.metro)/rad.

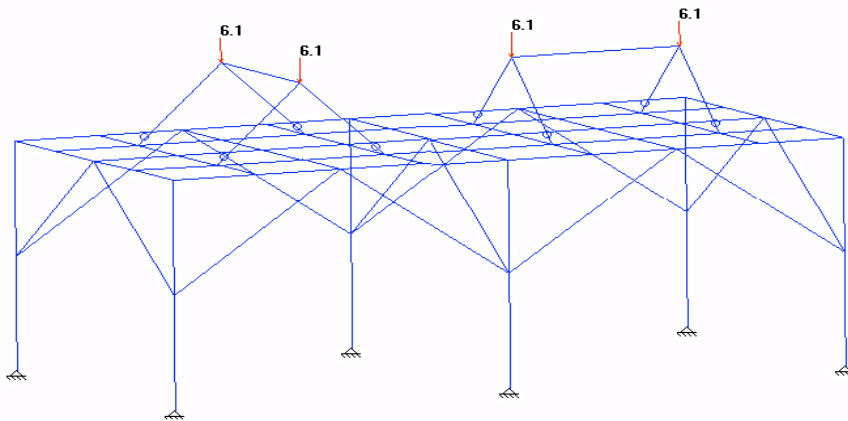
### 2.3.4 Considerações iniciais – aplicação dos pesos nodais

A distribuição das massas dos equipamentos depende da posição dos centros de gravidade dos equipamentos, dos rotores e da forma como estes equipamentos estão apoiados sobre a estrutura. No modelo, a massa total de cada Conjunto Moto-Bomba é considerada de 12.200kg e foi inteiramente aplicada nos pontos de apoio de seu eixo. A massa da estrutura foi aplicada em seus Nós na forma de Pesos Nodais, conforme a figura 07 (O peso Próprio dos Perfis é considerado, contudo não esta visualizado).

Tabela 04: Aplicação de Massa nos Nós dos Conjuntos Moto-Bomba.

Conjunto	Ponto de aplicação	Massa
CMB1	Nós 52 e 53	12.200 kg
CMB2	Nós 54 e 55	12.200 kg

Figura 07: Indicação da aplicação dos Pesos Nodais dos Conjuntos no modelo.



### 2.3.5 Descrição do carregamento dinâmico - Cálculo das forças dinâmicas do equipamento

O desbalanceamento do conjunto moto-bomba gera uma força centrífuga, a qual depende da massa total do conjunto distribuída nos dois pontos do eixo, da excentricidade entre o centro de gravidade do rotor e o eixo geométrico de rotação, e da velocidade angular do conjunto.

$$F_T = M_{cmb/2} \cdot Q \cdot \Omega = 6100 \cdot (0,0025) \cdot (60 \cdot 2\pi) \approx 0,58 \text{ tf}$$

Tabela 05: Carregamentos Dinâmicos aplicados aos Nós.

Carregamentos	Força - Nós	Direção
CMB1-X1 - f=60Hz - T=0.016s - t0=0.00s	0,29 tf - 52/53	X1
CMB1-X2 - f=60Hz - T=0.016s - t0=0.004s	0,29 tf - 52/53	X2
CMB2-X3 - f=60Hz - T=0.016s - t0=0.00s	0,29 tf - 54/55	X3
CMB2-23 - f=60Hz - T=0.016s - t0=0.004s	0,29 tf - 54/55	X2

Abaixo se mostra nas Figuras 08 e 09 a aplicação dos carregamentos no Conjunto Moto-Bomba 1. A aplicação no Conjunto Moto-Bomba 2 é idêntica.

Figura 08: Força Dinâmica 1 aplicada ao modelo.

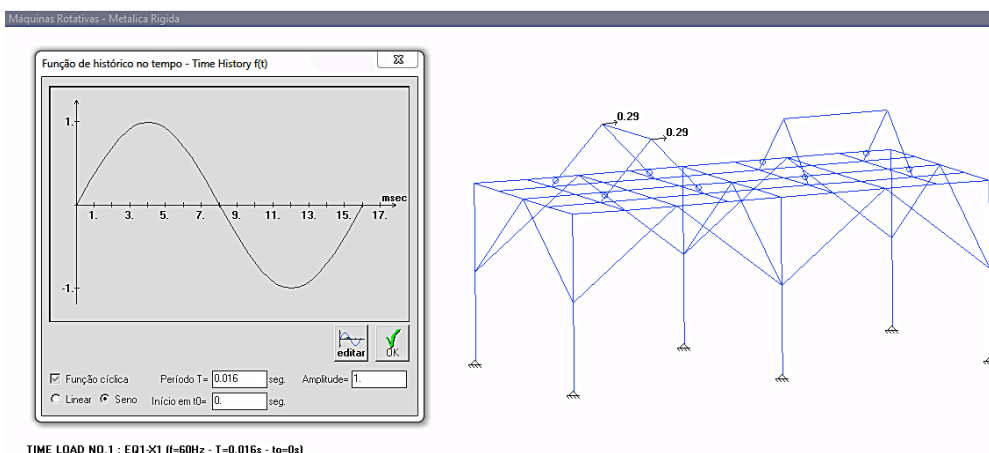
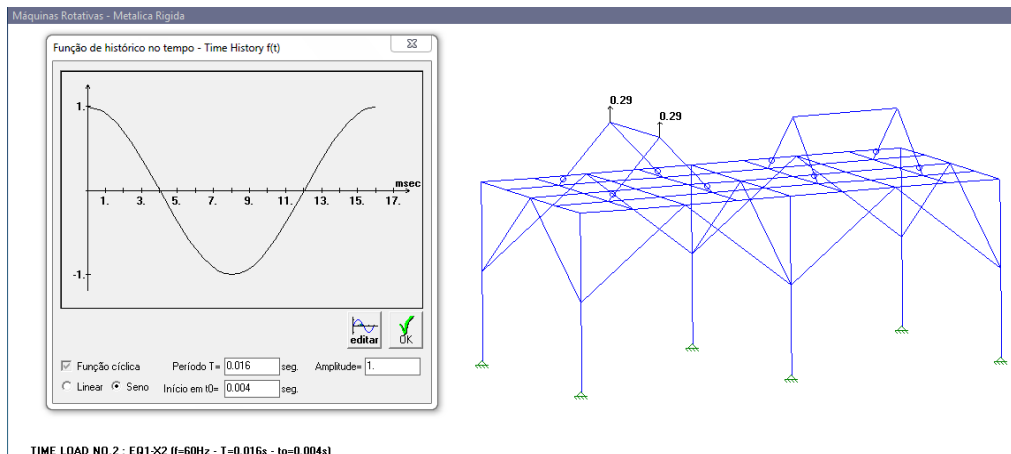


Figura 09: Força Dinâmica 2 aplicada ao modelo.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise Dinâmica da Estrutura

Definidos os dois carregamentos (forças) ortogonais para cada Equipamento, deve-se combiná-los no módulo análise dinâmica do STRAP 2012, de modo que os resultados sejam somados instante a instante de tempo, de cada um dos carregamentos dinâmicos, e jamais somados os resultados máximos deles, tomado como carregamentos separados. Após o carregamento dinâmico aplicado, no Módulo "Time History", pode-se visualizar as amplitudes nodais máximas em regime permanente de operação, com as respostas, no regime permanente, no período de 10,0 a 10,1 segundos, nos nós 52 e 54, assim verificando qual estrutura tem o melhor desempenho na relação carregamento e deslocamento nodal. Vale ressaltar que os fabricantes de máquinas têm seus limites de deslocamentos baseados, de maneira geral, no Handbook of Machine Foundations de SRINIVASULU e VAIDYANATHAN [12].

#### 3.2 Análise das Amplitudes

Cada modelo foi analisado em seus planos horizontais (x1 e x3) e verticais (x2) e gerado um gráfico das amplitudes, ou deslocamentos, máximos e mínimos, conforme a figura 10. Assim, observa-se na Tabela 06, que os deslocamentos gerados nos três modelos têm uma variação pequena entre as estruturas e todas dentro dos padrões permitidos conforme a Tabela 3 do Handbook of Machine Foundations de SRINIVASULU e VAIDYANATHAN [12].

Figura 10: Deslocamentos, no período de 10 a 10,1 segundos, em X1 da combinação 1 no Nó 52 (metros\*1000 = milímetros).

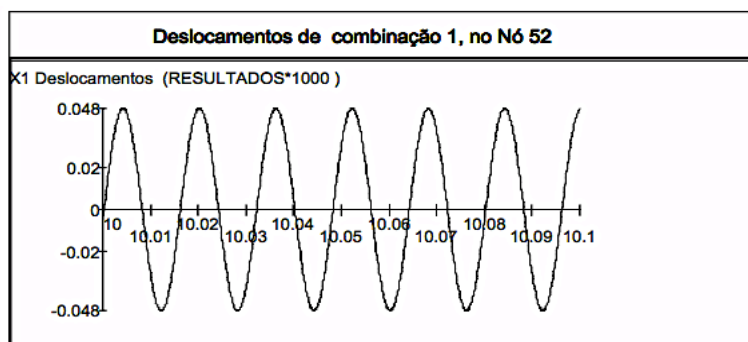


Tabela 06: Deslocamentos dos Modelos gerados no STRAP (mm).

Deslocamentos por Modelo gerado no Strap	Deslocamentos em X1 da combinação 1 no Nó 52 (mm)	Deslocamentos em X2 da combinação 1 no Nó 52 (mm)	Deslocamentos em X3 da combinação 2 no Nó 54 (mm)	Deslocamentos em X2 da combinação 2 no Nó 54 (mm)
Análise Dinâmica do Modelo I - Com ligações Rígidas:	0,048	0,0031	0,0238	0,0029
Análise Dinâmica do Modelo II - Com ligações Semirrígidas:	0,0483	0,0031	0,0244	0,0029
Análise Dinâmica do Modelo III - Com ligações Rotuladas:	0,0507	0,0031	0,0253	0,0029

Nos deslocamentos em X1 da combinação 1 no nó 52, a estrutura Rígida apresentou melhor desempenho e a estrutura semirrígida o segundo melhor desempenho e a rotulada o pior desempenho.

Nos deslocamentos em X2 da combinação 1 no nó 52, as estruturas rígida, rotulada e semirrígida apresentaram o mesmo desempenho, igual nesse caso.

Nos deslocamentos em X3 da combinação 2 no nó 54, a estrutura Rígida apresentou melhor desempenho e a estrutura semirrígida o segundo melhor desempenho e a rotulada o pior desempenho.

Nos deslocamentos em X2 da combinação 2 no nó 54, as estruturas rígida, rotulada e semirrígida apresentaram o mesmo desempenho, igual nesse caso.

#### 4 CONCLUSÃO

O trabalho mostra que o modelo estrutural analisado tem sua rigidez adequada para a condição dinâmica aplicada. O que se observa na prática, é que intuitivamente a utilização de estruturas totalmente rígidas, pode ser a melhor solução do ponto de vista estrutural dinâmico. Contudo, verifica-se que nos três modelos todas as amplitudes estão de acordo com a Tabela 3 do Handbook of Machine Foundations de SRINIVASULU e VAIDYANATHAN [12], e ainda por outra análise do programa STRAP, os resultados relacionados às velocidades, que não foram mostrados nesse trabalho, também estão de acordo com a Tabela 01 DIN 4150-3 [6].

O presente artigo mostra que quando há uma base teórica bem fundamentada e ferramentas computacionais adequadas, a realização do efetivo cálculo dinâmico da estrutura e do equipamento pode ser certa forma simples e com maior capacidade do engenheiro estrutural indicar qual a melhor estrutura considerando suas ligações. Assim considerando um software como o STRAP 2012, onde há uma praticidade na sua utilização dentro da pesquisa, os cálculos de dinâmica estrutural podem ser mais confiáveis. Por fim o artigo é sugerido como referência para futuros cálculos de estruturas suportes de máquinas rotativas e como sugestão fica a construção real dos modelos.

#### Agradecimentos

Agradeço os colegas André e Humberto da SAE (Sistemas de Análise Estrutural Ltda) pela licença do Software STRAP 2012 para o período de pesquisas. E ainda agradeço os colegas do



IFES pelo apoio incondicional e o IFES como fonte indireta de financiamento desta pesquisa, devido o autor 1 ser professor efetivo do IFES e utilizar seus próprios recursos como fonte de financiamento desta pesquisa. Por fim agradeço a atenção dos Orientadores.

## REFERÊNCIAS

- 1 BRASIL, REYOLANDO M. L. R. F., SILVA, MARCELO ARAUJO DA – Introdução à dinâmica das Estruturas para a Engenharia Civil – São Paulo: Blucher (2013).
- 2 CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. Third Edition. University Avenue Berkeley, California 94704 - USA.: Computers and Structures, Inc., (1995).
- 3 SOEIRO, N. S. Curso de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores. Notas de aula. Universidade Federal do Pará. Pará, PA, Brasil, (2008).
- 4 ASSUNÇÃO, T. M. R. C. Considerações sobre efeitos dinâmicos e carregamentos induzidos por fontes de excitação em estruturas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, MG, Brasil, (2009).
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. (2008).
- 6 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 4150-3: Vibration in buildings - Part 3: Effects on structures. (1999).
- 7 BRITISH STANDARD. BS-7385: Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 1 - Guide to measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. (1990).
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 8008: Balanceamento de Corpos Rígidos Rotativos – Balanceamento – Procedimentos. (1983).
- 9 EUROCODE 1: ACTIONS ON STRUCTURES - Part3: Actions induced by cranes and machinery; European Committee for Standardization, CEN, Brussels, second draft, (2002).
- 10 ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1940-1: Balance quality of rigid bodies (1986).
- 11 ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2372: Mechanical Vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards (1974).
- 12 SRINIVASULU, P.; VAIDYANATHAN, C. V. Handbook of Machine Foundations. New Delhi, Índia, (1976).
- 13 BARBOSA, G. D., Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas, Dissertação de mestrado – UFRS – Porto Alegre, (2006).
- 14 JONES, S. W., KIRBY, P. A., Effect of Semi-Rigid Connections on Steel Column Strength. In: Journal of Construction Steel Research: Vol.1, Nº1. (1980).