

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE DEPARTAMENTO DE CICIENTAS E TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

dec

HENRIQUE SOUZA SANTOS

ANÁLISE DE EFEITOS DE VIBRAÇÕES EM PISOS MISTOS DE AÇO E CONCRETO DEVIDO AO CAMINHAR HUMANO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÃO NUMÉRICA E METODOLOGIA DO ANSI/AISC 360-16

> ARACAJU 2022

HENRIQUE SOUZA SANTOS

ANÁLISE DE EFEITOS DE VIBRAÇÕES EM PISOS MISTOS DE AÇO E CONCRETO DEVIDO AO CAMINHAR HUMANO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÃO NUMÉRICA E METODOLOGIA DO ANSI/AISC 360-16

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Higor Sérgio Dantas de Argôlo

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

SANTOS, Henrique Souza.

ANÁLISE DE EFEITOS DE VIBRAÇÕES EM PISOS MISTOS DE AÇO E CONCRETO DEVIDO AO CAMINHAR HUMANO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÃO NUMÉRICA E METODOLOGIA

DO ANSI/AISC 360-16

Henrique Souza Santos

São Cristóvão, 2020

63 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

I. Universidade Federal de Sergipe / Sergipe. CCET

II. Análise de efeitos de vibrações em pisos mistos de aço e concreto

Dedico esse trabalho aos meus pais Mércia e José Djalma, pelo suporte incondicional a minha jornada acadêmica e por nunca desistirem de me proporcionar a melhor educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar forças nos momentos mais difíceis dessa longa caminhada.

Aos meus pais Mércia Souza Santos e José Djalma dos Santos, por sempre estarem ao meu lado, nunca me pressionarem e por todo o amor e luta que por mim realizaram. Sem eles nada disso seria possível.

A minha namorada Adrielle, por sempre me incentivar nos meus objetivos pessoais e profissionais com gentileza e compaixão.

Ao meu professor e orientador Higor Sérgio, sempre solicito a me ajudar com qualquer assunto acadêmico e portador de grande conhecimento em estruturas metálicas.

A instituição Universidade Federal de Sergipe, por abrir oportunidades para um jovem do interior alcançar objetivos jamais imaginados.

Ao professor Leandro Favacho do Departamento de Matemática da UFS, por demonstrar que há esperança e beleza no estudo.

A psicóloga Jeane, por me ensinar como lidar com a vida e me mostrar esperança em seguir em frente.

A todos os amigos e colegas que fiz na universidade, por dividir comigo momentos e histórias que para sempre levarei na memória.

A todos os professores e profissionais do Departamento de Engenharia Civil da UFS, por dividirem comigo um pouco do seu conhecimento e aconselhamento no caminho da engenharia.

SANTOS, H. S. Análise de vibrações em pisos mistos de aço e concreto devido ao caminhar humano: uma comparação entre solução numérica e a metodologia do ANSI/AISC 360-16. 2022

RESUMO

Os efeitos dinâmicos gerados em estruturas mistas de aço e concreto, devido a ações de caminhar humano, são fontes de desconforto para os usuários de edifícios, sendo, portanto, necessária a realização de análises visando evitar tais efeitos, que podem até mesmo inviabilizar o uso da estrutura. Este trabalho tem como foco contribuir com o aprimoramento destas análises por meio do estudo da modelagem computacional em softwares de cálculo estrutural que são usados em escritórios de engenharia. Para isso realizou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos a partir de modelagens tridimensionais no software Robot Strucutral Analysis com a metodologia da ANSI/AISC 360 – 16. A princípio foi elaborado um modelo teórico de um piso misto de aço e concreto, verificado para o estado limite último, e submetido a metodologia da ANSI/AISC 360 – 16 para análise de vibração. Em seguida, foram também executadas duas modelagens no software Robot, utilizando dois tipos de abordagens que se baseiam na inserção da geometria da viga mista no software e na aproximação da condição mista por deslocamento nos eixos dos elementos. Ao final do trabalho conclui-se que o resultado do modelo da ANSI/AISC 360 - 16 é mais conservador que o modelo numérico, por considerar uma rigidez reduzida do piso e uma simplificação da distribuição das cargas. Além disso, os resultados numéricos diferem entre si, pela modelagem ou não da laje, o que indica uma interferência na rigidez do modelo.

Palavras-chave: Vibração, Caminhar Humano, Estruturas Mistas de Aço e Concreto, ANSI/AISC 360 – 16, Robot Strucural Analysis.

SANTOS, H. S. **Vibration analysis in composed steel and concrete floors due to human walking**: a comparison between numerical solution and the ANSI/AISC 360-16 methodology. 2022

ABSTRAC

The dynamic effects generated in composed steel and concrete structures, due to human walking actions, are sources of discomfort for building users, therefore, it is necessary to carry out analyzes in order to avoid such effects, which may even make the use of the structure unfeasible. This work aims to contribute to the improvement of these analyzes through the study of computational modeling in structural calculation software that are used in engineering offices. For this, a comparative analysis was carried out between the results obtained from threedimensional modeling in the Robot Structural Analysis software with the ANSI/AISC 360 - 16 methodology. At first, a theoretical model of a composed floor of steel and concrete was elaborated, verified for the ultimate limit state, and submitted to the methodology of ANSI/AISC 360 – 16 for vibration analysis. Then, two models were also performed in Robot software, using two types of approaches that are based on the insertion of the geometry of the composed beam in the software and in the approximation of the mixed condition by displacement in the axes of the elements. At the end of the work, it is concluded that the result of the ANSI/AISC 360 – 16 model is more conservative than the numerical model, considering a reduced floor stiffness and a simplification of the load distribution. In addition, the numerical results differ from each other, depending on whether or not the slab is modeled, which indicates an interference in the rigidity of the model.

Keywords: Vibrational Analysis, Human Walking, Composed Steel and Concrete Structures, ANSI / AISC 360 - 16, Robot Structural Analysis.

Lista de Figuras

Figura 1 - Limites máximos recomendados pela AISC (Fonte: ANSI/AISC 360 – 16 – ADAPTADO) 5
Figura 2 - Representação dos painéis de borda e centro (Fonte: Autor)
Figura 3 - Representação de vigas secundárias e principais (Fonte: Autor)7
Figura 4 - Parâmetros geométricos usados para o cálculo do centro geométrico da seção da viga secundária (Fonte: Autor)
Figura 5 - Representação da continuidade da nervura sobre a viga principal (Fonte: Autor)14
Figura 6 - Parâmetros geométricos usados para o cálculo do centro geométrico da seção da viga principal (Fonte: Autor)
Figura 7 - Representação de um painel formado por vigas metálicas e uma laje em concreto (Fonte: Autor)
Figura 8 - Representação do piso usado como exemplo (Fonte: Autor)
Figura 9 - Janela de definição de lajes no Robot (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)28
Figura 10 - Janela de configuração e lançamento de <i>Claddings</i> (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)
Figura 11 - Ambiente e janela de resultados do <i>Section Definition</i> (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)
Figura 12 - Indicação das vigas principais, secundárias intermediárias e de bordo (Fonte: Autor)30
Figura 13 – Janela de configuração do comando <i>Member Section</i> (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)
Figura 14 – Detalhe das vigas sob a laje (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)
Figura 15 – Janelas de configuração do comando <i>Offsets</i> (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)
Figura 16 – Dimensões da <i>steel deck</i> (Fonte: Metform)
Figura 17 – Modelo 1 utilizando Claddings (Fonte: Robot Sctrucutral Analysis – ADAPTADO)40
Figura 18 – Modelo 2 utilizando laje Steel Deck (Fonte: Robot Sctrucutral Analysis – ADAPTADO) 40
Figura 19 – Gráfico aceleração de pico relativa vs frequência, modelo 1 (Fonte: Robot Sctrucutral Analysis – ADAPTADO)

Figura 20 - Gráfico aceleração de pico relativa vs frequência, modelo 2 (Fonte: Robot Sctrucu	tral
Analysis – ADAPTADO)	.41
Figura 21 – Gráfico comparativo entre os resultados de frequência natural (Fonte: Autor)	.43
Figura 22 – Gráfico comparativo entre os resultados de aceleração de pico relativa (Fonte: Autor)	.43

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores Recomendados para o coeficiente de amortecimento (Fonte: ANSI/AISC 360 - 16 -
ADAPTADO)
Tabela 2 – Limites máximos para atividades rítmicas recomendados pela AISC (Fonte: ANSI/AISC 360 - 16 – ADAPTADO)
Tabela 3 - Ações permanentes e seus respectivos coeficientes de ponderação
Tabela 4 - Ações variáveis e seus respetivos coeficientes 33
Tabela 5 - Carregamento e momento fletor solicitante de cálculo máximos
Tabela 6 – Momentos resistentes de cálculo34
Tabela 7 - Resultados da verificação pela ANSI/AISC 360 -16 37
Tabela 8 - Resultados da análise numérica
Tabela 9 - Resultados finais agrupados

Lista de Abreviações e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;				
AISC	American Institute Of Steel Construction;				
ANSI	American National Standarts Institute;				
ELS	Estado Limite de Serviço;				
ELU	Estado Limite Último;				
FRF	Função Resposta de Frequência;				
MF-50	Tipo de <i>steel deck</i> , com altura da nervura de 50 milímetros;				
NBR	Norma Brasileira;				
Inc.	Incorporated				
3D	Três Dimensões				
ISO	International Organization for Standardization				
RSA	Robot Structural Analysis				
W460X82	Perfil metálico estrutural fabricado pela GERDAU				
W360X44,6	Perfil metálico estrutural fabricado pela GERDAU				
BIM	Building Information Modeling				

Lista de Símbolos

E _a	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
f _{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
E _{cs}	Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto
E _c	Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto
S	Espaçamento entre as vigas secundárias
L _{cs}	Comprimento da viga secundária
B _e	Largura da laje que efetivamente resistirá junto a viga
B _{tr}	Largura em aço equivalente a laje colaborante de concreto
A _s	Área da seção do perfil metálico
d	Altura da seção do perfil metálico
D _e	Profundidade de concreto considerada na laje steel deck
α	Razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto considerado
C _j	Constante que depende da posição da viga no painel, ela assume o valor de 2 na maioria
L_{cp}	Comprimento da viga principal
Ν	Número de painéis adjacentes na direção das vigas principais ou secundárias
B _{jlim}	Largura efetiva limite da viga secundária
W _{js}	Carregamento atuante na viga secundária
B _j	Largura efetiva da viga secundária
S _p	Espaçamento entre vigas principais
е	Comprimento que a laje ultrapassa o eixo da viga principal, em direção à borda

W_{gp}	Carga atuante na viga principal
PP _{gp}	Peso próprio da viga principal
Es	Módulo de elasticidade do aço
I _{tr}	Momento de inércia da seção mista transformada de uma viga
D_j	Momento de inércia da viga secundária transformada por unidade de comprimento
D_g	Momento de inércia por unidade de comprimento da viga principal
D _s	Momento de inércia da laje steel deck por unidade de comprimento
Cg	Constante que para o sistema composto por viga principal e secundária, assume o valor de 1,8
B_g	Largura efetiva da viga principal
g	Aceleração da gravidade
δ_{vs}	Flecha da viga secundária
δ_{vp}	Flecha da viga principal
<i>f</i> _n	Frequência natural
W	Peso total do piso
Wj	Peso do painel da viga secundária
W_{g}	Peso do painel da viga principal
β	Amortecimento do piso
Р	Carga equivalente a um passo humano definida pela ANSI/AISC 360 – 16
γ_{gi}	Coeficientes de majoração das ações permanentes
F _{gi}	Ações permanentes
F_{qj}	Ações variáveis

Υ _{qj}	Coeficientes de majoração das ações variáveis
Ψ _{0j}	Coeficientes de redução das ações variáveis
Ψ_1	Coeficiente de redução das ações variáveis
Ψ_2	Coeficiente de redução das ações variáveis
$\frac{a}{g}$	Aceleração de pico relativa

SUMÁRIO

1 INT	RODUÇÃO	
2 OBJ	ETIVOS	
2.1. Oł	ojetivos específicos	
3 REV	/ISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Al	NSI/AISC 360 – 16	4
3.1.1.F	Parâmetros	4
3.1.2.	Modelo de cálculo	5
3.1.3.	Viga secundária	9
3.1.4.	Viga principal	14
3.1.5.	Fatores responsivos	
3.2. Aı	nálise numérica utilizando o ROBOT	23
3.2.1.	Modelagem pilares	23
3.2.2.	Modelagem das lajes	
3.2.3.	Modelagem das vigas	
3.2.4.	Análise dos efeitos dinâmicos em resposta ao caminhar humano	
4 ME	FODOLOGIA	
4.1. El	aboração do exemplo	
4.1.1.	Escolha dos perfis metálicos	27
4.2. Re	esolução pelo método simplificado	
4.3. Re	esolução numérica	
4.3.1.	Lajes	
4.3.2.	Vigas	
5 RES	SULTADOS E DISCUSSÕES	
5.1. Ca	arregamento	
5.1.1.	Estado limite último (ELU)	
5.1.2.	Estado limite de serviço (ELS)	
5.2. M	etodologia ANSI/AISC 360 -16	
5.3. Aı	nálise numérica	40
5.4. Aı	nálise comparativa	
6 CON	NCLUSÕES	45
REFER	ÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da industrialização em todos os setores da economia brasileira, a construção civil por ainda contar com tecnologias pouco avançadas, vem sendo cada vez mais pressionada a investir em industrialização visando escalar os empreendimentos e tornar o processo construtivo cada vez mais enxuto e limpo. Uma alternativa que ajuda a suprir essas necessidades é a utilização de peças de aço para as estruturas dos mais diversos tipos.

As estruturas em aço são mais leves e resistentes que as comumente usadas de concreto armado, possibilitando grandes vãos, espaços mais amplos e pés direitos maiores. Além dessas características arquitetônicas, a construção em aço é mais rápida, podendo entregar enormes armazéns e prédios em prazos curtos fazendo com que o proprietário do imóvel usufrua mais rápido dos lucros do empreendimento.

Como ainda não há no mercado uma forma eficiente e econômica de executar lajes em aço puro, nas edificações em que se usa o aço como principal material estrutural o concreto ainda está presente na forma de lajes apoiadas por for formas metálicas, denominadas lajes *steel deck*, ou ainda nas comuns lajes maciças. As vigas de aço que sustentam essas lajes podem ou não estar vinculadas a elas o que dita como irão trabalhar estruturalmente. Quando não se tem a vinculação, as vigas somente recebem os esforços da laje pelas forças de contato; por outro lado, quando se existe a vinculação, parte da laje trabalha junto a viga para resistir a solicitações criando o sistema estrutural que é chamado de viga mista, um dos focos deste trabalho.

Além das ótimas características que um material pode apresentar em termos de resistência e solidez estrutural, fatores como o conforto e a qualidade de vida que essas estruturas oferecem aos seus ocupantes tem extrema importância em todo o contexto estrutural. Peças mal dimensionadas, falhas na execução e outros problemas durante a construção de um edifício misto de aço e concreto podem acarretar problemas que afetam diretamente o bem-estar de quem usufruirá do ambiente, desde deslocamentos excessivos a vibrações não desejadas, sendo estas últimas, objeto deste trabalho.

Os problemas envolvendo vibrações em estruturas podem causar desde efeitos dinâmicos leves que causam desconforto até o colapso estrutural, como foi o caso da ponte Tacoma Narrows localizada no estreito de Tacoma em Washington, Estados Unidos. As rajadas de vento periódicas que atingiam a ponte alcançaram frequências que se aproximaram da frequência de vibração natural da estrutura, que veio a colapso. Para o caso de pequenas vibrações, causadas

por atividades humanas como caminhar, que é objeto deste trabalho, os efeitos são de menor intensidade, mas de importância quase equivalente quanto a utilização da estrutura por pessoas.

Portanto, a análise de vibrações em estruturas metálicas é de suma importância, visto que a reprovação da estrutura nesses quesitos gera desconforto para os usuários do ambiente, desvalorização da estrutura e retrabalho para o reforço necessário afim de remediar esse problema.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a análise e estudo dos efeitos de vibração gerados devido ao caminhar humano em pisos mistos de aço e concreto, que podem causar desconforto aos eventuais usuários deste piso.

Um piso específico será analisado usando diferentes metodologias para a obtenção de dados quanto aos efeitos vibracionais. O primeiro método é indicado pela norma americana ANSI/AISC 360 - 16, mais especificamente no manual Steel Design Guide 11 (2016), que utiliza de parâmetros geométricos e materiais do sistema estrutural para obter quantificações sobre o efeito da carga dinâmica. O método usado para a comparação é a modelagem do piso estudado em um ambiente de modelagem 3D e de cálculo integrado, para o presente trabalho, o Robot Structural Analysis da Autodesk, Inc., utilizando uma ferramenta própria do software que realiza uma análise vibracional numérica aplicando parâmetros indicados no Steel Design Guide 11.

Os resultados relevantes dos dois métodos serão comparados, visando entender de que forma os métodos numéricos influenciam nos fatores responsivos de cargas dinâmicas devido ao caminhar humano, em relação ao método simplificado do Steel Design Guide 11.

2.1. Objetivos específicos

- Elaborar um piso misto em aço e concreto, verificando-o em relação aos estados limites últimos e de serviço segundo a NBR 8800:2008.
- Realizar a análise dos efeitos de vibração devido ao caminhar, que podem ser desconfortáveis à utilização humana, a partir de fatores responsivos como aceleração de pico relativa e frequência natural, pelos métodos descritos no Steel Design Guide 11, 2016.
- Executar a modelagem do piso, anteriormente elaborado e dimensionado, no software Robot Structural Analysis, e executar uma análise dos mesmos fatores responsivos obtidos com as indicações da norma americana, porém, de forma numérica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ANSI/AISC 360 – 16

3.1.1. Parâmetros

O método apresentado no Steel Design Guide 11 (2016) que faz parte da norma americana do "Instituto Americano de Construções em Aço", utiliza-se de correlações entre propriedades geométricas e físicas dos componentes do sistema estrutural para obter os fatores que determinam a aceitação de um piso quanto aos efeitos dinâmicos devido à atividade de caminhada. Na norma ainda são indicados métodos para realizar análises semelhantes em outras estruturas (como escadas e passarelas) e com outros tipos de atividades solicitantes como exercícios aeróbicos e corridas, que não serão aqui exploradas por não fazerem parte do escopo do trabalho.

Os parâmetros principais do método são:

- Frequência Natural;
- Posição dos elementos estruturais;
- Amortecimento;
- Peso da estrutura;
- Dimensões do piso;
- Tipo de ocupação do piso.

A frequência é uma propriedade individual de cada arranjo estrutural e está associada a capacidade das estruturas de terem respostas ressonantes devido a ação de cargas dinâmicas. Se uma carga dinâmica incide em uma estrutura com uma frequência de aplicação, e essa frequência coincide ou se aproxima da frequência natural da estrutura, ocorre o efeito ressonante.

A posição dos elementos estruturais determina se eles têm continuidade ou não em outros painéis adjacentes, o que influencia no peso total da área de influência desse elemento estrutural. Neste método são considerados somente as vigas e as lajes da estrutura, desconsiderando os pilares para a análise de vibração.

O amortecimento é a propriedade que indica o quão um sistema perde energia cinética ao longo do tempo, ou seja, uma força retardadora.

O peso da estrutura está diretamente relacionado com a aceleração vertical que ela pode desenvolver, devido à proporcionalidade entre massa e aceleração sob a ação de uma força. No método, além do peso próprio da estrutura, são adicionados parte do carregamento que será atuante durante a vida útil da edificação.

As dimensões do piso definem em parte os deslocamentos do sistema que influenciam diretamente no valor da frequência natural.

O tipo de ocupação do piso define quais os sistemas adicionais que fornecem amortecimento existentes no piso, além de definir quais os limites aceitáveis de aceleração de pico relativa a aceleração da gravidade para o piso.

3.1.2. Modelo de cálculo

De Maneira simplificada, todos os critérios de validação apresentados no guia consistem em duas partes: A obtenção dos valores de respostas dos pisos analisados e a comparação com os valores limitantes determinados pelo guia para o tipo de ocupação da estrutura.

Para obter os fatores responsivos, além dos parâmetros citados na subseção anterior, é necessário compreender como as cargas de atividade humana se aplicam nos pisos mistos. As cargas devido à atividade humana são classificadas como ações periódicas, ou seja, são aplicadas ao longo do tempo e em intervalos semelhantes. Algumas pesquisas como Reiner et al (1988, apud MURRAY et al, 2016) demonstraram que essas ações podem ser representadas por gráficos de frequência, que mostram quais frequências específicas de aplicação da carga geram respostas significativas. Essas frequências em que há resposta significativa, geralmente respostas ressonantes, são chamadas de harmônicas, pois sempre são múltiplas de uma frequência inicial, onde se dá a primeira resposta ressonante, também chamada de frequência fundamental.

Para os valores limitantes dessas respostas, são verificados aspectos do conforto humano quando submetidos a vibrações externas, principalmente a aceleração que se desenvolve durante o processo. A norma internacional ISO 2631-2 apresenta diversas curvas que relacionam a resposta humana a acelerações sinusoidais continuas, o guia do AISC, baseado nesta e em outras publicações, oferece o ábaco, apresentado na figura 1, em que são apresentados os valores limites de aceleração relativa para cada tipo de ocupação de pisos.



Figura 1 - Limites máximos recomendados pela AISC (Fonte: ANSI/AISC 360 - 10 - ADAPTADO)

Mais especificamente quanto ao caminhar, o guia divide os pisos em dois tipos, de baixa frequência e de alta frequência, e apresenta métodos para verificação de ambos. Os pisos de baixa frequência são os que apresentam frequências naturais abaixo de 9 Hz e sujeitas a cargas com frequência harmônica que geram respostas ressonantes. Os pisos de alta frequência têm frequência natural maior que 9 Hz e não geram respostas ressonantes. Estes apresentam picos de aceleração devido somente ao momento de aplicação da carga, ou seja, não existe aceleração residual após a retirada da carga.

O método de cálculo para os pisos de baixa frequência se apoia na aproximação de que quando um piso é submetido ao caminhar humano, para aceleração, somente um modo de vibração pode ser considerado, por ter respostas dominantes em relação aos outros (modos de vibração são as diversas formas em que uma estrutura pode ter um comportamento oscilatório, variando direção, sentido, amplitude e frequência) e, por isso, pode ser aproximado por um sistema com um único modo de vibração, como por exemplo um sistema massa mola. Com essa simplificação e através de manipulações algébricas, chega-se na equação 3.1, apresentada abaixo, para o cálculo da aceleração de pico relativa em pisos mistos de aço e concreto.

$$\frac{a}{g} = \frac{P * e^{-0.35 * f_n}}{\beta * W}$$
(3.1)

O guia faz a divisão de pisos em painéis, que são pisos menores componentes do piso analisado, podendo ser de borda ou de centro, como apresentado na figura 2. O resultado de um único painel é composto pelos resultados das vigas principais e secundárias, representadas na figura 3, (que apresentam algumas diferenças nos seus processos de cálculo) e da laje que as sobrepõem, deste mesmo painel, como será apresentado adiante. Ele se utiliza das flechas das vigas secundárias e principais para encontrar uma frequência natural do painel e, com isso, calcular a aceleração relativa do painel.



Figura 2 - Representação dos painéis de borda e centro (Fonte: Autor)



Figura 3 – Representação de vigas secundárias e principais (Fonte: Autor)

O método do Design Guide, para contabilizar a viga e a laje, utiliza-se do sistema de viga mista, onde a viga e laje estão conectadas ao longo do comprimento da viga, e respondem em conjunto ao esforço solicitante de momento fletor. Somente uma parte da laje é computada nessa análise, a escolha dessa faixa de laje colaborante é apresentada mais adiante neste trabalho. Como a seção resultante desta interação contém a viga de aço e parte da laje de concreto, e trabalhar com dois materiais simultaneamente é deveras complexo, é feita a homogeneização da seção, artifício que transforma a laje de concreto em um equivalente em aço. Esse processo é feito a partir de um coeficiente de homogeneização (α), conforme as equações 3.2, 3.3 e 3.4 apresentada a seguir:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_c} \tag{3.2}$$

$$E_c = 1,35 * E_{cs}$$
 (3.3)

$$E_{cs} = 5600 * 0.9 * \sqrt{f_{ck}} \tag{3.4}$$

Sendo:

Ea é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, admitido como 200 GPa; fck é a resistência característica do concreto à compressão em MPa; Ecs é o módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto em MPa; Ec é o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto em MPa.

É utilizado um fator de correção de 1,35 para o módulo de elasticidade do concreto, para simular o fato que o concreto possui maior resistência a ações dinâmicas e pontuais que a ações longas, devido ao efeito da fluência.

3.1.3. Viga secundária

Vigas secundárias são vigas que se apoiam em vigas, estas chamadas de principais. Por se apoiarem em outra viga, geralmente possuem suas extremidades rotuladas para não transferir momento em forma de torção para sua viga de apoio. São elas que absorvem os esforços transmitidos pelas lajes e em seguida transferem para a viga que as sustenta. O método descrito pela ANSI/AISC 360 – 16 para encontrar a frequência natural deste tipo de elemento é apresentado a seguir.

Primeiramente, a seção composta entre viga e laje deve ser definida. Para vigas secundárias a largura efetiva da laje *steel deck* que colabora com a resistência da viga, é obtida segundo a inequação 3.5.

$$B_{e} \leq \begin{cases} s \\ 0.4 * Lcs \end{cases}$$
(3.5)

Sendo:

S é o espaçamento entre as vigas secundárias;

Lcs é o comprimento da viga secundária;

Be é a largura da laje que efetivamente resistirá junto a viga.

Calcula-se então o coeficiente de homogeneização, pela equação 3.2, para transformar essa faixa de concreto em aço (de mesma espessura), sendo a largura final dessa faixa de aço dada pela equação 3.6.

$$B_{tr} = \frac{Be}{\alpha}$$
(3.6)

Sendo:

Btr é a largura em aço equivalente a laje colaborante de concreto.

O próximo passo é encontrar o momento de inércia da seção transformada. A profundidade do concreto dentro da laje *steel deck*, é considerada do topo da laje até o início da nervura. Sabendo-se disso, é encontrado o centro geométrico da seção transformada pela equação 3.7, usando os parâmetros geométricos demonstrados na figura 4.



Figura 4 – Parâmetros geométricos usados para o cálculo do centro geométrico da seção da viga secundária (Fonte: Autor)

$$Y_{tr} = \frac{\left(A_s * \left(\frac{d}{2}\right)\right) + \left((tc * B_{tr}) * \left(d + hf + \left(\frac{tc}{2}\right)\right)\right)}{A_s + (tc * B_{tr})}$$
(3.7)

Sendo:

As é a área da seção do perfil metálico;

d é a altura da seção do perfil metálico;

tc é a altura de concreto considerada dentro da laje steel deck;

hf é a altura da nervura da steel deck onde o concreto é desconsiderado;

Ytr é o centro geométrico da seção mista transformada.

Sendo conhecida a posição do centro geométrico da seção mista é possível calcular o momento de inércia dessa mesma seção em relação ao seu eixo principal, onde estará também a linha neutra. Logo, o momento de inércia da seção transformada é dado pela equação 3.8.

$$I_{tr} = (I_s + (A_s * \left(Y_{tr} - \left(\frac{d}{2}\right)^2\right))) + \left(\left(\frac{B_{tr} * tc^3}{12}\right) + \left((B_{tr} * tc) * \left(d + hf + \left(\frac{tc}{2}\right) - Y_{tr}\right)^2\right)\right)$$
(3.8)

Sendo:

Itr é o momento de inércia da seção mista transformada em relação ao seu eixo horizontal que passa pelo centróide;

Após a obtenção dos dados geométricos da seção mista, deve-se mensurar a carga atuante na viga secundária, envolvendo peso próprio, outras cargas permanentes e ações variáveis. A resultante dessas cargas atuantes, em plf (libras por pés), é chamada de wjs. Com os valores de momento de inércia, módulo de elasticidade e carregamento, é possível calcular o a flecha da viga mista secundária, considerando-a como bi apoiada, a partir da equação 3.9.

$$\delta = \frac{5 * w_{js} * Lcs^4}{384 * Es * Itr} \tag{3.9}$$

Sendo:

Wjs é a carga atuante na viga em libras por pés;

Lcs é o comprimento da viga secundária em pés;

Es é o módulo de elasticidade do aço;

Itr é o momento de inércia da viga mista transformada.

Desse momento em diante, são apresentados alguns parâmetros característicos do método, como a largura efetiva, ou Bj, o Ds e o Dj. Dj é o momento de inércia da viga secundária transformada por unidade de comprimento, e é determinado pela equação 3.10.

$$D_j = \frac{I_{tr}}{S} \tag{3.10}$$

Sendo:

S é o espaçamento entre vigas secundárias em pés.

Por sua vez, o Ds é o momento de inércia da laje *steel deck* por unidade de comprimento, e tem valor obtido pela equação 3.11.

$$D_s = \frac{12de^3}{12 * \alpha} \tag{3.11}$$

Sendo:

De é a profundidade de concreto considerada na laje *steel deck* em polegadas; α é a razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto considerados.

E a largura efetiva, ou Bj, que delimita a área de influência dos efeitos de vibração na viga secundária, é dada pela equação 3.12.

$$B_j = C_j * L_{cs} * \left(\frac{D_s}{D_j}\right)^{\frac{1}{4}}$$
(3.12)

Sendo:

Cj é uma constante que depende da posição da viga no painel, que assume o valor de 2 na maioria das posições e 1 para vigas secundárias paralelas a bordas livres.

Essa largura efetiva é limitada por uma largura efetiva máxima, que no caso de vigas secundárias é dada pela equação 3.13.

$$B_{jlim} = \frac{2}{3} * N * Lcp \tag{3.13}$$

Sendo:

Lcp é o comprimento da viga principal em pés;

N é o número de painéis adjacentes na direção da viga principal;

Bjlim é a largura efetiva limite da viga secundária em pés.

Em seguida, é calculado o fator Wj que representa o peso do painel da viga secundária. Vale lembrar que esse painel constitui uma área de influência da viga em que ela sofre e responde aos estímulos dinâmicos devido ao caminhar humano. Esse fator é obtido pela equação 3.14.

$$W_j = \frac{1.5 * wjs * B_j * L_{cs}}{S}$$
(3.14)

Sendo:

wjs é o carregamento atuante na viga em libras por pés; Bj a largura efetiva apresentada anteriormente em pés; Lcs é comprimento da viga secundária em pés; S é o espaçamento entre vigas secundárias em pés.

Com todos os parâmetros apresentados nesta seção é possível calcular a frequência natural e aceleração relativa somente em relação ao painel da viga secundária. O método indica que os fatores responsivos finais sejam calculados mediante uma mescla entre os painéis das vigas secundárias e das vigas principais, por isso, em seguida são calculados parâmetros da viga principal, e só depois, os fatores responsivos do piso completo.

3.1.4. Viga principal

A viga principal é a que suporta as vigas secundarias. Ela se apoia nos pilares, e por isso, se torna responsável por transmitir os esforços para os pilares.

O processo para a obtenção dos parâmetros necessários ao método é semelhante ao da viga secundária, com pequenas diferenças que serão destacadas adiante.

Como foi visto anteriormente, o primeiro passo é encontrar a largura da laje de concreto que complementa a rigidez da viga. Para vigas principais, esta largura é definida pela inequação 3.15.

$$B_{e} \leq \begin{cases} Sp + e\\ (0,2 * Lcp) + e \end{cases}$$
(3.15)

Sendo:

Be é a largura efetiva da laje;

Sp é o espaçamento entre vigas principais;

Lcp é o comprimento da viga principal;

'e' é a medida da laje que ultrapassa o eixo da viga principal, em direção à borda.

Obtendo-se essa largura da laje, é definida a profundidade do concreto considerado dentro da laje *steel deck*. Como geralmente, as nervuras das lajes tipo *steel deck* são paralelas ao eixo longitudinal das vigas principais, não há alternância de concreto em cima da viga, como mostra a figura 5. Por esse motivo, é considerado além do concreto acima da nervura, metade do concreto que a preenche. Definidas as dimensões da laje considerada acima da viga, essa largura de concreto é transformada em largura de aço, mantendo a mesma espessura, a partir do coeficiente de homogeneização ' α ' como mostra a equação 3.6.



Figura 5 – Representação da continuidade da nervura sobre a viga principal (Fonte: Autor)

$$B_{tr} = \frac{Be}{\alpha}$$
(3.6)

Sendo:

Btr é a largura em aço equivalente a laje de concreto considerada;

 α é o coeficiente de proporcionalidade entre os módulos de elasticidade considerados do aço e do concreto.

Após isso, são obtidas as propriedades geométricas da seção mista, começando pelo centróide. Considerando os mesmos parâmetros da seção apresentados na figura 4 e usando a equação 3.7, o cálculo é o mesmo que o realizado para a viga secundária nesse ponto, exceto que se considera mais concreto dentro da laje como mostra a figura 6.



Figura 6 - Parâmetros geométricos usados para o cálculo do centro geométrico da seção da viga principal (Fonte: Autor)

$$Y_{tr} = \frac{\left(A_s * \left(\frac{d}{2}\right)\right) + \left((tc * B_{tr}) * \left(d + hf + \left(\frac{tc}{2}\right)\right)\right)}{A_s + (tc * B_{tr})}$$
(3.7)

Em seguida é calculado o momento de inércia da seção mista transformada da viga principal utilizando-se a equação 3.8, mesma equação utilizada para a viga secundária:

$$I_{tr} = (I_s + (A_s * \left(Y_{tr} - \left(\frac{d}{2}\right)^2\right))) + \left(\left(\frac{B_{tr} * tc^3}{12}\right) + \left((B_{tr} * tc) * \left(d + hf + \left(\frac{tc}{2}\right) - Y_{tr}\right)^2\right)\right)$$
(3.8)

Após as propriedades geométricas, a carga que atua sobre a viga principal é computada, sendo estas as reações das vigas secundárias e o peso próprio da viga principal. O guia da norma americana propõe uma simplificação para uniformizar os cálculos de carga atuante nas vigas, onde as reações das vigas secundárias, que se apresentam em forma de carga concentrada aplicada no eixo da viga principal, são adotadas como carga distribuída equivalente, aplicada no eixo da viga principal, resultante da carga total da viga secundária (incluindo o peso próprio) dividida pelo espaçamento entre vigas secundárias. A obtenção das cargas na viga principal é feita pela equação 3.16.

$$w_{gp} = (w_{js} * L_{cs})/S + PP_{gp}$$
 (3.16)

Sendo:

Wgp é a carga atuante na viga principal em libras por pés;

Wjs é o carregamento da viga secundária em libras por pés;

Lcs é o comprimento da viga secundária em pés;

PPgp é o peso próprio da viga principal em libras por pés.

Com o carregamento, momento de inércia e módulo de elasticidade definidos, é possível calcular o deslocamento vertical na viga principal, considerada bi apoiada pela norma. A flecha é obtida pela equação 3.17.

$$\delta = \frac{5 * w_{gp} * Lcp^4}{384 * Es * Itr} \tag{3.17}$$

Sendo:

Wgp é o carregamento na viga principal em libras por pés;

Lcp é o comprimento da viga principal em pés;

Es é o módulo de elasticidade do aço utilizado;

Itr é o momento de inércia ao eixo de flexão da seção mista.

Assim como existiam as constantes relacionadas a largura efetiva para o painel da viga secundária, para o painel da viga principal também são obtidas constantes semelhantes. É calculada a largura efetiva do painel da viga principal, o Dj e o Dg. O Dj é o momento de inércia por unidade de comprimento da viga secundária, calculado pela equação 3.10. Dg é o momento de inércia por unidade de comprimento da viga principal calculado pela equação 3.18.

$$D_g = \frac{I_{tr}}{L_{cs}} \tag{3.18}$$

Sendo:

Itr é o momento de inércia da seção mista transformada da viga principal;

Los é o comprimento da viga secundária.

A largura efetiva do painel da viga principal é dada pela equação 3.19.

$$B_g = C_g * L_{cg} * \left(\frac{D_j}{D_g}\right)^{\frac{1}{4}}$$
(3.19)

Sendo:

Lcg é o comprimento da viga principal;

Dj e Dg já foram apresentados anteriormente;

Cg é uma constante que para o sistema composto por viga principal e secundária, assume o valor de 1,8.

Assim como a largura efetiva na viga secundária era limitada, na viga principal também o é, tendo esse limite a equação 3.20.

$$B_{glim} = \frac{2}{3} * N * Lcs \tag{3.20}$$

Sendo:

Lcs é o comprimento da viga secundária;

N é o número de painéis adjacentes na direção da viga secundária.

Referente a largura efetiva do painel da viga principal, o método define uma exceção para vigas principais de borda. Nestes casos a largura efetiva da viga principal é fixada em sempre dois terços do comprimento da viga secundária.

Por fim, o último dos parâmetros do painel da viga principal é o fator que representa o peso, Wg. É obtido de maneira semelhante ao Wj, sendo seu valor obtido pela equação 3.21.

$$W_g = \frac{W_{gp} * B_g * L_{cp}}{L_{cs}} \tag{3.21}$$

Sendo:

Wgp é o carregamento na viga principal em;

Bg é a largura efetiva do painel da viga principal;

Lcp é o comprimento da viga principal;

Lcs é o comprimento da viga secundária.

Finalizada a obtenção dos parâmetros necessários ao método, pode-se iniciar o cálculo dos fatores responsivos: frequência natural e aceleração de pico relativa do piso.

3.1.5. Fatores responsivos.

Como citado anteriormente, o processo de cálculo faz uma mescla entre as áreas de influência das vigas secundárias e principais para obter o resultado para o piso em si. Essa interação é computada na obtenção da frequência natural do piso, e também no peso total da estrutura. Somente após a definição da frequência natural, peso e amortecimento do piso, é possível obter a aceleração relativa.

Para o cálculo da frequência natural, são utilizadas as flechas dos dois tipos de viga, como é apresentado na equação 3.22.

$$f_n = 0,18 * \sqrt{\frac{g}{\delta_{\nu s} + \delta_{\nu p}}}$$
(3.22)

Sendo:

g é a aceleração da gravidade;

 δ_{vs} e δ_{vp} são as flechas da viga secundária e principal, respectivamente, em polegadas; fn é a frequência natural do piso.

O peso efetivo do piso é obtido mediante uma média ponderada dos pesos dos painéis das vigas secundárias e principais, onde o fator ponderador é a flecha de cada uma dessas vigas, como mostra a equação 3.23.

$$W = \frac{\delta_{vs}}{\delta_{vs} + \delta_{vp}} * W_j + \frac{\delta_{vp}}{\delta_{vs} + \delta_{vp}} * W_g$$
(3.23)

Sendo:

W é o peso do piso;

 δ_{vs} e δ_{vp} são as flechas da viga secundária e principal, respectivamente;

Wj e Wg são os pesos dos painéis da viga secundária e principal, respectivamente.

O último parâmetro necessário ao cálculo da aceleração relativa (que é o fator que é utilizado para a validação do piso ao conforto humano) é o amortecimento. Como já citado neste trabalho, o amortecimento é uma constante que consiste na razão do amortecimento do piso em relação ao amortecimento crítico. É obtido da Tabela 1, retirada do guia da norma americana, e depende do tipo de sistemas que estão presentes no edifício adicionais a estrutura que garantem esse efeito de amortecimento das vibrações.

Componente	Coeficiente de Amortecimento
Sistemas estruturais	0,01
Tetos e Dutos	0,01
Escritórios	0,005 a 0,01
Igrejas ou escolas	0
Paredes completas em Dry Wall	0,02 a 0,05

Tabela 1 - Valores Recomendados para o coeficiente de amortecimento (Fonte: ANSI/AISC 360 - 16 - ADAPTADO)

Finalmente, é possível obter o valor da aceleração vertical do piso em relação à aceleração da gravidade. A equação utilizada para isso é a 3.1.

$$\frac{a}{g} = \frac{P * e^{-0.35 * f_n}}{\beta * W}$$
(3.1)

Sendo:

 β é o amortecimento do piso;

W é o peso total do piso;

fn é a frequência natural do piso;

P é carga equivalente a um passo humano, definido pelo método como 290 lb.

Com a aceleração de pico relativa calculada, utiliza-se a Tabela 2 que resume as informações apresentadas pelo ábaco da figura 1 relativo aos limites de aceleração de pico para o conforto humano em edificações, apresentado pelo Steel Design Guide 11 (2016).

Ocupação Afetada	Limite de aceleração, a, %g
Escritórios ou residência	as 0,5
Restaurantes	1,5 - 2,5
Academias	1,5 - 2,5
Apenas atividades rítmic	as 4 - 7

Tabela 2 – Limites máximos para atividades rítmicas recomendados pela AISC (Fonte: ANSI/AISC 360 – 16 – ADAPTADO)

Os dados de entrada do ábaco da figura 1 são a frequência natural do piso e o tipo de ocupação que acontece no local, resultando o valor limite de aceleração de pico relativa. Caso os valores de aceleração do piso sejam maiores que os limites, o piso não é aceitável para o conforto humano devido aos efeitos de vibração.

3.2. Análise numérica utilizando o ROBOT.

A análise numérica é uma ferramenta que permite o cálculo integrado de estruturas complexas utilizando-se de métodos numéricos para a resolução de problemas em três dimensões. Isso proporciona um resultado mais coerente com os o comportamento das estruturas reais.

O software utilizado neste trabalho para esse fim é o Robot Structural Analysis, produzido pela Autodesk, inc. Ele apresenta um ambiente de modelagem em 3D de estruturas em aço; concreto; alumínio; madeira e mistas de aço e concreto. O programa conta com funções de cálculo integrado linear e não linear, além das análises modais, FRF e efeitos de caminhar que são objeto deste trabalho.

A seguir serão apresentados os principais pontos quanto a modelagem e análise utilizando o software.

3.2.1. Modelagem pilares.

Como a norma americana somente utiliza a contribuição dos pilares na estrutura para efeitos de vibração em atividades rítmicas, e que estão fora do escopo do trabalho, os pilares não foram modelados.

3.2.2. Modelagem das lajes.

Diferentemente de outros softwares, o Robot possui uma gama de seções e tipos de lajes que podem ser utilizadas em suas dimensões e materiais reais. Assim, o modelo de laje de concreto sobre placa ortotrópica metálica, comumente conhecida como *steel deck*, existe no ambiente de modelagem, sua ortotropia é levada em consideração bem como sua direção de distribuição de cargas. Tendo essa fidelidade com a realidade, é desnecessário o uso de artifícios como a mudança de módulo de elasticidade do concreto nas dimensões da laje para simular a presença ou não das nervuras em uma das direções.

3.2.3. Modelagem das vigas.

As vigas, assim como as lajes, são modeladas em suas seções e materiais reais. São definidas condições de apoio, rotação de seção da viga, entre outros parâmetros. Para isso, exige-se uma análise mais aprofundada do funcionamento do software para que se possa retratar com realidade os efeitos de interação entre laje e viga, ou seja, um adicional de resistência à viga de aço através da conexão semirrígida entre laje e viga por meio de conectores metálicos. Dentro das funcionalidades do programa não há função que faça que essa interação seja realmente computada, existe um *plug-in* que realiza o cálculo das vigas mistas dentro do software, esses resultados somente têm validade dentro do *plug-in* e não são integrados pelo modelo no RSA, segundo a própria Autodesk.

Para este fim foram realizadas diversas pesquisas sobre maneiras de, utilizando ferramentas do próprio RSA, emular esse efeito de conectividade laje-viga. Os trabalhos de Mois (2020) e Ali (2020) mostraram algumas formas de se realizar isso, que serão apresentadas com mais afinco adiante neste trabalho.

3.2.4. Análise dos efeitos dinâmicos em resposta ao caminhar humano.

O RSA conta com diversos tipos de análises dinâmicas que utilizam o método de elementos finitos, incluindo uma análise específica chamada de *Footfall analysis*, que foi muito proveitosa para o objetivo deste trabalho, pois seu resultado é exatamente o que se desejava obter de resultados do programa. Essa análise tem como referências códigos e normas americanas de estruturas que estimam valores para o peso de uma pessoa que caminha sobre o piso, e a frequência (intervalo) em que uma pessoa realiza passos neste piso. Ela utiliza estes parâmetros para realizar um outro tipo de análise chamada de FRF ou Função Resposta de Frequência.

A Função Resposta de Frequência é um tipo de análise onde uma carga com valor definido é aplicado sobre um ponto em diversas frequências e seus harmônicos. Durante cada aplicação, os valores de deslocamento, velocidade e aceleração são computados neste ponto e plotados em gráficos em função da frequência em que a carga foi aplicada. Os resultados destes gráficos (também apresentados em tabelas) demonstram quais frequências são mais prejudiciais ao piso em um determinado ponto. No caso da FRF, para o efeito de caminhar, a carga aplicada é o peso de um passo humano, e o intervalo de frequência é o intervalo em que passos humanos são geralmente executados. Como já citado anteriormente dentro da *Footfall Analysis* esses parâmetros são descritos, inclusive contendo os valores adotados pela ANSI/AISC 360 -16, então ao iniciar a análise de caminhada, é realizada uma FRF usando os parâmetros do ANSI/AISC 360 - 16.

Dentro do software só é permitida a realização de uma análise FRF se uma análise modal, que analisa quais são os modos de vibração da estrutura e quais são suas frequências naturais, seja previamente realizada.

4 METODOLOGIA

As metodologias utilizadas neste trabalho se baseiam nos métodos de cálculo para validação de pisos mistos quanto aos critérios de vibração excessiva da norma ANSI/AISC 360 – 16. Também são baseados nos processos de dimensionamento de vigas (isoladas e mistas) metálicas formadas a quente, apresentados na norma NBR 8800:2008, além dos manuais da Autodesk, inc. sobre o Robot.

Todos os resultados obtidos sobre os efeitos da vibração excessiva foram comparados com os resultados dos métodos numéricos realizados no software, sendo essa comparação exposta em gráficos e tabelas para melhor ser analisada.

4.1. Elaboração do exemplo.

O exemplo elaborado se trata de um piso misto em aço e concreto, composto por lajes *steel deck* e vigas metálicas formadas a quente, com dimensões externas de 40 metros na direção longitudinal e 8 metros na direção transversal, divergindo dos exemplos apresentados no Steel Design Guide 11 (2016) e em trabalhos como de Cunha (2018), em que os pisos exemplos são em sua grande maioria de dimensões próximas. Além disso, nos trabalhos citados, os pisos geralmente apresentam mais de um painel nas suas duas direções, enquanto que os deste trabalho contém 4 painéis de 10 metros na direção longitudinal e apenas 1 painel de 8 metros na direção transversal.

Os painéis são elementos definidos pela norma americana como sendo um retângulo formado por vigas e sobreposto por uma laje, como é apresentado na figura 7.



Figura 7 – Representação de um painel formado por vigas metálicas e uma laje em concreto (Fonte: Autor)

Como no método americano estudado as vigas são consideradas bi apoiadas para a obtenção dos seus deslocamentos verticais, foi decidido manter a vinculação de todas as vigas como rotuladas, o que aumenta o esforço de momento fletor no meio do vão destes elementos, fazendo com que a seção resistente seja mais robusta.

As dimensões utilizadas para as vigas secundárias e principais foram idealizadas buscando respeitar a limitação imposta pelo método americano nas equações 3.13 e 3.20.

Para as vigas principais foi utilizada a seção W460x82 e para as vigas secundárias foi utilizada a seção W360x44,6. Ambas devidamente dimensionadas quanto aos códigos de cálculo necessários. O resultado final do piso elaborado é apresentado na figura 8.



Figura 8 – Representação do piso usado como exemplo (Fonte: Autor)

4.1.1. Escolha dos perfis metálicos.

Primeiramente foi realizado o dimensionamento da estrutura quanto ao Estado Limite Último (ELU) de acordo com a norma brasileira NBR 8800:2008, o que permite escolher os perfis quanto à resistência aos esforços solicitantes.

As vigas foram dimensionadas no sistema de viga mista, apresentado no Anexo O da NBR 8800:2008, onde a interação entre laje *steel deck* e viga é considerada, fornecendo uma parcela da resistência final do conjunto. Essa interação é considerada devido a fixação, parcial ou completa, da viga com a laje a partir da utilização de conectores metálicos que fazem a transferência dos esforços da laje para a viga por um fluxo de cisalhamento. No exemplo deste trabalho, foi considerada uma interação parcial, o que melhor representa a realidade devido à interação completa ser mais cara de ser executada pelo maior número de conectores necessários, obtendo nesse trabalho um total de 27. Frise-se que o mesmo valor foi adotado para as vigas principais, apenas por facilidade de execução, pois no caso delas não há limitação de locais para a fixação dos conectores.

Além disso, foram verificados todos os perfis quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS) no quesito de deslocamentos verticais, respeitando-se os limites apresentados na Tabela C.1 do Anexo C da NBR 8800:2008.

Com todos os dimensionamentos efetuados, foram escolhidos os perfis a partir do catálogo de perfis estruturais da GERDAU. Tanto para as vigas secundárias, quanto para as vigas principais, somente um perfil metálico foi selecionado, o que facilita a possível execução dessa estrutura.

As lajes *steel deck* foram dimensionadas pelo catálogo da Metform, que fornece tabelas que dimensionam as lajes de acordo com o vão que terão de vencer e a carga que será aplicada.

4.2. Resolução pelo método simplificado.

A resolução do exemplo de acordo com a norma americana foi realizada de duas maneiras, visando retificar os resultados finais de todos os parâmetros. Foi realizado manualmente pelo autor com o intuito de ter mais afinidade com o método e seus detalhes. Após isso, foram elaboradas planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel, com o intuito de automatizar os cálculos e verificar, com a precisão do computador, se os resultados encontrados manualmente eram coerentes.

4.3. Resolução numérica.

Foi utilizado o software Robot Structural Analysis ou RSA da Autodesk. Inc. que conta com uma função própria para a análise dos efeitos dinâmicos devido ao caminhar humano. Como citado na seção 3.3.1 deste trabalho, os pilares não foram modelados por não haver a necessidade de contabilizar seus deslocamentos para o caso de caminhar humano, restando a modelagem das vigas e das lajes.

Por sua vez, a modelagem das lajes e vigas foi realizada, baseada nos estudos de Mois (2020), que apresenta diversos métodos para a modelagem de estruturas mistas no Robot, dois dos quais foram utilizados para este trabalho:

• O modelo 1 é elaborado visando representar a rigidez de uma seção mista a partir dos seus parâmetros geométricos. Assim é criada uma seção dentro do software e os parâmetros desta seção são preenchidos com os valores reais da seção mista que se quer modelar. Neste caso a laje não pode ser modelada, pois sua rigidez já é computada quando se insere os valores das características geométricas da seção. Mois (2020) conclui que esse é o melhor método para se simular um sistema misto no Robot.

• O modelo 2 é elaborado para tentar simular o sistema misto a partir da modelagem dos elementos em dimensões e posições reais. A partir da função *Offset* do RSA é inserido um deslocamento entre o eixo da viga e o eixo da laje, posicionando a viga onde ela ficaria na realidade.

Foram realizadas também análises alterando o módulo de elasticidade do aço das vigas para simular a rigidez do conjunto misto, como feito em Ali (2020), porém com o decorrer do trabalho essa abordagem foi considerada inadequada.

4.3.1. Lajes.

As lajes, quando foram modeladas para o modelo 2, a partir do comando *floors* do RSA, que permite a inserção da laje, definida seção e material, a um perímetro fechado de vigas ou outras estruturas de suporte. O software dá a liberdade de elaborar diversas seções dentro de

uma quantidade limitada de tipos de laje, sendo, para este trabalho, escolhido o tipo *slab composed with a trapezoid plate* que mais se assemelha a uma *steel deck*. Além disso, foram definidos os parâmetros de análise como a direção de distribuição de carga, que foi direcionada no sentido paralelo as nervuras, e o elemento finito, que foi mantido como *shell*, que é recomendado pelo software para o tipo de laje.



Figura 9 – Janela de definição de lajes no Robot (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)

Quando as lajes não foram modeladas, elas foram substituídas por um elemento de superfície chamado *Claddings*. Este elemento permite a distribuição de cargas concentradas, lineares e distribuídas em áreas para os elementos que a sustentam. Como é apenas uma superfície, não tem espessura definida nem material definido, assim, não possui nenhum tipo de rigidez e não participa em nenhuma resistência da estrutura. Este elemento de superfície foi utilizado no modelo 1 deste trabalho, onde não era desejado que a laje contribuísse com peso próprio ou rigidez para a estrutura.



Figura 10 – Janela de configuração e lançamento de *Claddings* (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)

4.3.2. Vigas.

As vigas foram modeladas de duas formas, de acordo com os modelos citados em 4.3, buscando retratar de maneira mais realista possível o fenômeno de interação entre laje e viga em estruturas mistas.

Para o modelo 1, as vigas foram modeladas a partir de dois processos nativos do software: Modelagem da seção e inserção da seção a ser utilizada.

A modelagem da seção é feita a partir da ferramenta *Section Definition*, que permite que a seção seja modelada a partir de seções base ou livremente e depois realiza-se os cálculos dos parâmetros geométricos da seção. Para este trabalho foram modeladas 3 seções: viga principal, viga secundária intermediária e viga secundária de bordo. Que diferem entre si pelo perfil metálico utilizado (principal e secundárias) e também pela largura de laje de concreto considerada (principal, secundárias intermediárias e secundárias de bordo). Vale ressaltar que a largura de laje que foi considerada advém do processo da norma americana para a verificações de piso quanto a vibrações e não do Anexo O da NBR 8800:2008, pois o objetivo da modelagem dentro do software foi de obter os efeitos dinâmicos obtidos pelo método simplificado da ANSI/AISC 360 – 16.



Figura 11 – Ambiente e janela de resultados do *Section Definition* (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)



Figura 12 – Indicação das vigas principais, secundárias intermediárias e de bordo (Fonte: Autor)

A inserção da seção é feita a partir do comando *Member Sections* do software, que permite que seja criada uma seção utilizável para o cálculo, partindo somente dos parâmetros geométricos obtidos no *Section Definition* e do material utilizado. Após isso, as vigas com as seções personalizadas são inseridas no modelo pelo comando *Beams*.



Figura 13 – Janela de configuração do comando *Member Section* (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)

Para o modelo 2 as vigas são modeladas diretamente pelo comando *Beams*, onde são inseridas com os perfis utilizados no exemplo, como citado na seção 4.1. Após o lançamento das lajes, é realizado o deslocamento entre os eixos dos elementos pelo comando *Offsets*, onde é possível realizar deslocamento de eixos absolutos (com valores inseridos), relativos (toma como referência algum ponto da seção) ou ainda uma mescla dos dois. Assim é criado o deslocamento das vigas principais e das vigas secundárias, que quando aplicados elas são posicionadas imediatamente abaixo da laje.



Figura 14 - Detalhe das vigas sob a laje (Fonte: Robot Structural Analysis - ADAPTADO)



Figura 15 – Janelas de configuração do comando Offsets (Fonte: Robot Structural Analysis – ADAPTADO)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a verificação do piso, exemplo deste trabalho, aos efeitos de vibração devido ao caminhar humano, o processo de cálculo foi efetuado pelas duas metodologias aqui analisadas: ANSI/AISC 360 – 16 Design Guide 11 e análise numérica pelo Robot Structural Analysis.

Os resultados dos parâmetros responsivos serão apresentados e discutidos adiante, bem como os valores de carregamento e dos fatores dos métodos utilizados.

5.1. Carregamento

As cargas atuantes no piso em estudo, foram determinadas seguindo a metodologia da NBR 6120:2019, pelo tipo de ocupação situada no ambiente do piso. Para o peso próprio da laje *steel deck* foi considerado o valor indicado pelo catálogo da Metform, que para o vão livre de 2 m, resultou na laje MF-50 com: 120 mm de altura (Destes, 50 mm de nervura e 70 mm de capa de concreto) total, 0,95 mm de espessura da chapa metálica, 305 mm entre eixos de nervura, 175 de abertura maior da nervura e 130 mm de abertura menor da nervura, como mostrado na figura 16.



Figura 16 – Dimensões da steel deck (Fonte:Metform)

Para o peso próprio dos perfis metálicos, serão usados os valores de kg/m indicados no catálogo da Gerdau.

As cargas obtidas e seus respectivos coeficientes de ponderação para as combinações normais, segundo as Tabelas 1 e 2 da NBR 8800:2008, são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Ações permanentes e seus respectivos coeficientes de ponderação.

	Carga (kN/m ²)	γg
Peso Próprio da steel deck	2,33	1,25
Peso próprio do Revestimento	1,00	1,5

Tabela 4 - Ações variáveis e seus respectivos coeficientes

	Carga	γg	Ψ0	Ψ1	Ψ2
	(kN/m²)				
Sobrecarga de Escritórios	2,5	1,5	0,7	0,6	0,4

5.1.1. Estado limite último (ELU)

Para o dimensionamento ao estado limite último foi utilizada a combinação de ações última normal, dada pela equação 5.1.

$$q_{d} = \sum_{i=1}^{n} (\gamma_{gi} F_{gi}) + \gamma_{q1} F_{q1} + \sum_{j=2}^{m} (\Psi_{0j} \gamma_{qj} F_{qj})$$
(5.1)

Sendo:

 γ_{gi} são os coeficientes de majoração das ações permanentes;

 F_{gi} são as ações permanentes;

 F_{qi} são as ações variáveis;

 γ_{qj} são os coeficientes de majoração das ações variáveis;

 Ψ_{0j} são os coeficientes de redução das ações variáveis.

O dimensionamento segundo a NBR 8800:2008 ao estado limite último foi feito com um valor de carregamento, resultante da combinação normal, de 8,163 kN/m² sobre as vigas secundárias intermediárias, somado ao peso próprio das mesmas multiplicado por 1,25. O

Dimensionamento das vigas secundárias de bordo é feito com metade deste valor e das vigas principais com as reações das vigas secundárias, somadas ao peso próprio da viga principal multiplicado por 1,25.

Sendo assim o carregamento linear e o momento fletor máximo em cada uma das vigas é apresentado na Tabela 5.

Viga	Carga Linear (kN/m)	Carga concentrada (kN)	Msd (kNm)
Viga Secundária Intermediária	16,883	0	135,06
Viga Secundária de Bordo	8,720	0	69,76
Viga Principal	1,025	4x 67,53	417,90

Tabela 5 - Carregamento e momento fletor solicitante de cálculo máximos

Seguindo para os valores de resistência obtidos através do processo de cálculo de viga mista apresentado no Anexo O da NBR 8800:2008, os resultados são apresentados na tabela 6.

rubela o momentos resistentes de carcato					
Viga	Largura	Nº de	Tipo de conector	Grau de	Mrd (kNm)
	Efetiva (m)	Conectores		interação (%)	
VSI	2	27	Stud bolt 19mm	70	448,98
VSB	1,2	27	Stud bolt 19mm	83	434,20
VP	1,2	27	Stud bolt 19mm	83	856,97

Tabela 6 – Momentos resistentes de cálculo

5.1.2. Estado limite de serviço (ELS)

Para o estado limite de serviço para vibrações excessivas, a NBR 8800:2008 no item 4.7.7.3.3 indica que deve ser usada a combinação frequente de serviço, calculada de acordo com a equação 5.2.

$$q_d = \sum_{i=1}^{n} (F_{gi}) + \Psi_1 F_{q1} + \sum_{j=2}^{m} (\Psi_2 F_{qj})$$
(5.2)

Sendo:

 $\Psi_1 e \Psi_2$ são coeficientes de redução das ações variáveis.

Visto que o método da norma americana utiliza valores de carga distribuída linear, o carregamento que inicialmente está em kN/m² tem que ser transformado em kN/m, com exceção do peso próprio dos perfis, que já o estão. Sendo assim, primeiro é feita a combinação somente com as cargas em área e após elas serem distribuídas para as vigas secundárias é adicionado o peso próprio da viga, como é apresentado a seguir.

• Viga secundária intermediária:

Cargas permanentes: *steel deck* 2,33 kN/m²; Revestimento 1 kN/m² Cargas variáveis: Sobrecarga 2,5 kN/m² Combinação Frequente de Serviço: 2,33 + 1 + (0,6 * 2,5) = 4,83 kN/m² Carregamento da viga secundária: $\frac{4,83*8*2}{8}$ + 0,446 = 10,106 kN/m

• Viga secundária de bordo:

Cargas permanentes: *steel deck* 2,33 kN/m²; Revestimento 1 kN/m² Cargas variáveis: Sobrecarga 2,5 kN/m² Combinação Frequente de Serviço: 2,33 + 1 + (0,6 * 2,5) = 4,83 kN/m^2 Carregamento da viga secundária: $\frac{4,83*8*1}{8}$ + 0,446 = 5,276 kN/m

• Viga Principal:

Para a viga principal o método da ANSI/AISC 360 – 16, como citado na seção 3.1.4, faz uma simplificação para tornar a carga das vigas secundárias em cargas distribuídas para a viga principal. De acordo com a equação 5.3, a carga linear na viga principal é:

$$\frac{10,106*8}{2} + 0,82 = 41,244 \ kN/m \tag{5.3}$$

5.2. Metodologia ANSI/AISC 360 -16.

Com o exemplo verificado quanto ao estado limite último segundo a NBR 8800:2008, foi executada a análise dinâmica apresentada na seção 3.2.

Assim como para a determinação da sobrecarga, o piso foi considerado como tendo ocupação típica de escritórios a fim de obter os limites de aceleração relativa e os parâmetros da norma americana, sendo iguais a 0,5 % e de 0,03, respectivamente.

Além da aceleração relativa, foi verificada a frequência natural do piso, observando se esta seria ou não menor que 3 Hz, caso o fosse, a metodologia de cálculo seria diferente da apresentada neste trabalho.

Os resultados de aceleração de pico relativa e frequência natural estão na Tabela 7.

rubbla / rubblitudos da verificação pera ricorribo e e e e e				
Frequência Natural	a/g	a/g limite	status	
(Hz)	(%)	(%)		
3,29	1,03	0,5	REPROVADO	

Tabela 7 - Resultados da verificação pela ANSI/AISC 360 -16

Como se pode observar, o piso apresentou aceleração relativa maior que o limite indicado por norma, sendo assim categorizado como inadequado para o conforto humano devido aos efeitos dinâmicos do caminhar. Verifica-se também que a frequência natural obtida é maior que 3 Hz o que torna válidos os resultados da metodologia.

5.3. Análise numérica.

Os resultados apresentados nesta seção, advém da análise devido ao caminhar humano executada no software Robot Structural Analysis, utilizando dois modelos, apresentados nas figuras 17 e 18, e seguindo o processo apresentado na seção 3.2.4. Como é feita uma análise numérica, não há um resultado único para o piso, mas sim um resultado para cada nó que o software cria no piso. Portando, os resultados apresentados na Tabela 8 abaixo referem-se ao nó critico, ou seja, o nó de maior aceleração de pico relativa apresentado pelo Robot.



Figura 17 – Modelo 1 utilizando *Claddings* (Fonte: Robot Sctructural Analysis – ADAPTADO)

Figura 18 – Modelo 2 utilizando laje *Steel Deck* (Fonte: Robot Sctructural Analysis – ADAPTADO)

	Frequência	a/g	a/g limite	
Modelo	Natural (HZ)	(m/s²)	(m/s²)	Status
1	5,96	0,642	0,5	REPROVADO
2	4,80	0,254	0,5	APROVADO

Tabela 8 - Resultados da análise numérica

Além das tabelas, o RSA fornece gráficos que indicam como a aceleração se comporta com o aumento dos harmônicos da frequência do caminhar. Como pode ser observado nos gráficos das figuras 19 e 20, o terceiro harmônico é o que causa pior resposta ressonante tanto no modelo 1 quanto no 2, isso corrobora com o que é apresentado no Steel Design Guide (2016).

Figura 19 – Gráfico aceleração de pico relativa vs frequência, modelo 1 (Fonte: Robot Sctructural Analysis – ADAPTADO)

Figura 20 – Gráfico aceleração de pico relativa vs frequência, modelo 2 (Fonte: Robot Sctructural Analysis – ADAPTADO)

Pode se observar uma discrepância significativa entre os resultados do modelo 1 e do modelo 2 em quesitos de aceleração de pico relativa. Sendo que, pelos critérios do Steel Design Guide 11 (2016), o mesmo piso seria reprovado no modelo 1 e aprovado no modelo 2 variandose somente a forma de se modelar o piso no software. Porém, quando se trata de frequência natural a diferença diminui consideravelmente entre os modelos.

A grande diferença entre as acelerações relativas encontradas provavelmente advém da modelagem ou não das lajes como elemento com rigidez não nula. No modelo 1, somente as vigas e parte da laje que colabora diretamente com elas são consideradas em termos de massa e rigidez, o que deixa o interior dos painéis das lajes vazios. Provavelmente este modelo possui uma massa e rigidez reduzida em relação ao modelo 2, o que influencia para que a aceleração relativa seja maior nos pontos do piso. No modelo 2 a laje é inserida como elemento com rigidez dentro do software, isso faz com que além de absorver certos esforços, também aumenta bastante a massa da estrutura chegando próxima da realidade, ambos os fatores colaboram para que a aceleração relativa seja menor.

Quanto a frequência natural, observa-se que a frequência natural do modelo 2 foi levemente menor que a modelo 1, podendo ser resultado de um número maior de modos de vibração que foram possibilitados pela modelagem da laje como elemento de rigidez não nula.

5.4. Análise comparativa.

Após a análise dos resultados da metodologia numérica e da metodologia da norma americana, percebe-se que os resultados do software são menos conservadores, mesmo quando a modelagem é feita de maneira a se aproximar do que é feito na metodologia simplificada. Isso se deve ao fato que no programa é feita uma análise integrada em que todos os elementos fazem parte do núcleo resistivo da estrutura, fazendo com que a laje absorva alguns esforços, assim como a interface de ligação entre os elementos. Esses resultados eram esperados, pois metodologias simplificadas tendem a ser mais conservadoras por não conseguirem englobar todos os fatores envolvidos na análise.

Os valores obtidos como resultados finais das metodologias estão apresentados em forma de gráfico nas figuras 21 e 22.

Figura 21 - Gráfico comparativo entre os resultados de frequência natural (Fonte: Autor)

Figura 22 – Gráfico comparativo entre os resultados de aceleração de pico relativa (Fonte: Autor)

Nota-se uma diferença de 37,67% entre os valores de aceleração relativa da metodologia simplificada com o modelo 1 do RSA, e de 75,34% com o modelo 2. Quanto a frequência natural a diferença entre o método simplificado e o modelo 1 foi de 44,80% e 31,46% para o modelo 2. Os resultados finais agrupados são apresentados na Tabela 9.

	Frequência	a/g	a/g limite	
Metodologia	Natural (HZ)	(m/s²)	(m/s²)	Status
Numérica 1	5,96	0,642	0,5	REPROVADO
Numérica 2	4,80	0,254	0,5	APROVADO
Simplificada	3,29	1,03	0,5	REPROVADO

Tabela 9 - Resultados finais agrupados

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados e da metodologia abordada, conclui-se que este trabalho apresenta uma revisão em um tema importante para o âmbito das estruturas metálicas, que é o estado limite de serviço por vibrações excessivas, utilizando o software Robot Structural Analysis e o método simplificado da ANSI/AISC 360 – 16.

A verificação do método simplificado e um numérico pôde mostrar com clareza algumas das diferenças que cada uma apresenta, sendo os resultados do software, em geral, menos conservadores que os resultados do método simplificado por levar em conta principalmente a laje como elemento que interfere na rigidez global da estrutura.

A elaboração de dois modelos diferentes proporcionou que o mesmo piso, simulado com o mesmo objetivo no software, apresentasse resultados discrepantes quanto aos efeitos da análise dinâmica. Os resultados numéricos não convergiram em valores para os resultados do método simplificado, onde as acelerações relativas foram menores e as frequências naturais maiores.

Analisando os dois modelos numéricos verificou-se que a aceleração relativa acompanhou a lógica de rigidez das estruturas modeladas, bem como do peso delas. O primeiro modelo, menos rígido e mais leve por não conter a laje, apresentou resultados maiores que o segundo modelo para aceleração relativa, porém apresentou resultados um pouco maiores de frequência natural. Essa discrepância no resultado da frequência natural pode ser encarada como uma consequência do maior número de modos de vibrações que uma estrutura com a laje modelada fornece, em comparação com uma estrutura somente composta com pórticos, porém para conclusões mais precisas são necessárias pesquisas mais aprofundadas sobre assunto.

A diferença entre as acelerações relativas resultantes das duas metodologias, como foi citado anteriormente, pode ser resultado da rigidez e massa que a laje adiciona ao modelo numérico (no caso de a laje ser modelada) e também a como se fazem as transferências de esforços nos modelos tridimensionais em softwares de elementos finitos.

Por fim, este trabalho conclui que as análises numéricas apresentam em geral resultados maiores nas análises dinâmicas devido a sua rigidez global considerada, com inclusão total dos elementos de placa (laje). Porém, para conclusões sobre qual tipo de modelagem seria mais adequado para a utilização do software para verificações dinâmicas advindas do caminhar

humano, seria necessário um estudo mais abrangente, com mais exemplos e fazendo comparações com resultados reais, ou seja, pisos reais ensaiados experimentalmente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Steel Design Guide 11**: Vibrations of Steel-Framed Structural Sistems Due to Human Activity. 2. Ed. 2016;

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120:2019 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: 2019;

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos** estruturais de aço e mistos de aço e concreto. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016;

GERDAU. **Perfis estruturais gerdau: informações técnicas**. Disponível em: < https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais >. Acesso em: 10 de março de 2022;

METAFORM. **A Solução definitiva em lajes**. Disponível em: < https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/metform/steel_deck_metform%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 10 de março de 2022;

LOOSE, J. K.; FERREIRA, W. G.; SILVA, J. G. S. Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto). 5 ed. Passo Fundo: Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 2008;

MOIS, João Gabriel Ribeiro. **Modelação de estruturas mistas de aço e betão em edifícios**. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

CUNHA, Rafael Nunes. **Análise de vibração em pisos de edifícios formados por estruturas mistas de aço e concreto:** uma comparação entre metodologias de cálculo. Orientador: Higor Sérgio Dantas de Argôlo. 2018. 92 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2020.

AUTODESK. Knowledge Network: Robot Structural Analysis Professional, support and learning. Disponível em: https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-professional. Acesso em: 10 de marco de 2022.

ALI, Mabast Salih. **Research of cmposite steel-concrete floor vibrations**. Supervisor: Tadas Zingalia. 2020. 86 p. Master's Final Degree Project. – Faculty of Civil Enineering and Architecture, Kuanas University of Technology, Kuanas.