



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E
TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FELIPE GUIAR

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE METODOLOGIA
NORMATIVA E ANÁLISE DINÂMICA EM ESTRUTURAS DE AÇO E
CONCRETO.

São Cristóvão – SE

2022

FELIPE GUIAR

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE METODOLOGIA
NORMATIVA E ANÁLISE DINÂMICA EM ESTRUTURAS DE AÇO E
CONCRETO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Sergipe (UFS) como
requisito para o título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. D. Sc. Emerson Figueiredo dos Santos

São Cristóvão - SE

2022

FELIPE GUIAR

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE METODOLOGIA
NORMATIVA E ANÁLISE DINÂMICA EM ESTRUTURAS DE AÇO E
CONCRETO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Sergipe (UFS) como
requisito para o título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em: **22 de Novembro de 2022**

Banca Examinadora		Nota
Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)	—	8,7
Examinador(a): Prof. Dr. Higor Sérgio Dantas de Argolo (UFS)	—	8,6
Examinador(a): Eng. Me. Ricardo Almeida Oliveira	—	8,2
	Média Final:	8,5



Documento assinado digitalmente

EMERSON FIGUEIREDO DOS SANTOS

Data: 14/12/2022 10:19:58-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)
Assinatura do(a) Orientadora(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, por me conceder saúde em todos os momentos.

Agradeço, também, de maneira grandiosa, aos meus queridos pais, Cleber e Cristiane, por me proporcionarem uma educação de qualidade e apoio incondicional em toda essa caminhada.

Aos meus queridos irmãos, por sempre estarem presentes nas minhas escolhas; à minha namorada, por toda confiança e companheirismo e aos meus grandes amigos que, nessa jornada, foram essenciais.

Sou muito grato ao pessoal da Equilíbrio Estruturas – Cleber, Ricardo e Tarcísio -, por todo auxílio e ajuda sempre que necessário

Por último, e não menos importante, agradeço a todo corpo docente da Universidade Federal de Sergipe, onde tive grandes professores que, além do conteúdo programático, conseguiram transmitir ensinamentos que lavarei para a vida; em especial a meu orientador, pela confiança, respeito e ensinamentos nesse período.

RESUMO

Vibrações estruturais têm se tornado mais frequentes, por ocasião de aumento de resistência dos materiais, ou, até mesmo, pela aplicação de sistemas construtivos. Por ocasião do conforto humano, algumas normas, com a ANSI/AISC determina valores limites de aceleração, além de propor uma metodologia de determinação desse parâmetro. A norma brasileira NBR8800/2008 apresenta uma avaliação simplificada, por meio de limitação de frequência natural e de deslocamento. Uma terceira via, e mais precisa é a análise dinâmica, cuja carga varia no tempo e no espaço. Tal análise foi realizada por meio de *software* desenvolvido por Lima e Silva (2022), que utiliza o Método dos Elementos Finitos aplicados a elementos de barra, e que faz uso de um modelo biodinâmico com um grau de liberdade representativo do caminhar humano. Neste sentido, a laje de uma estrutura metálica mista foi utilizada para determinação de parâmetros e respostas dinâmicas de aceleração, cujos resultados encontrados pela norma ANSI/AISC ficaram muito próximos da análise dinâmica, muito embora a máxima amplitude de aceleração apresenta-se acima do permitido. Por outro lado, os parâmetros de frequência e deslocamento atendem à NBR8800/2008.

Palavras-chave: carga dinâmica; vibrações; aceleração relativa; caminhar humano.

ABSTRACT

Structural vibrations have become more frequent, on the occasion of increased resistance of materials, or even by the application of construction systems. On the occasion of human comfort, some standards, with ANSI/AISC, determine limit values of acceleration, in addition to proposing a methodology for determining this parameter. The Brazilian standard NBR8800/2008 presents a simplified evaluation, through natural frequency and displacement limitation. A third and more precise way is dynamic analysis, whose load varies in time and space. This analysis was performed using software developed by Lima and Silva (2022), which uses the Finite Element Method applied to bar elements, and which makes use of a biodynamic model with a degree of freedom representative of human walking. In this sense, the slab of a mixed metal structure was used to determine parameters and dynamic responses of acceleration, whose results found by the ANSI/AISC standard were very close to the dynamic analysis, although the maximum amplitude of acceleration is above the allowed. On the other hand, the frequency and displacement parameters comply with NBR8800/2008.

Keywords: dynamic load; vibrations; relative acceleration; human walk.

LISTA DE LUSTRAÇÕES

Figura 1 – Análise estática da estrutura.....	16
Figura 2 - Modelo de 1 GL de vibração livre da viga.....	16
Figura 3 - Modelo de 1 GL de vibração forçada da viga.....	17
Figura 4 - Estrutura com largura e comprimento divergentes.....	18
Figura 5 – Estrutura do piso com as vigas principais e secundárias.....	19
Figura 6 – Laje com nervura.....	20
Figura 7 – Laje sem nervura.....	20
Figura 8 – Seção da viga mista secundária homogeneizada.....	21
Figura 9 – Seção da viga mista principal homogeneizada.....	24
Figura 10 – Carregamento distribuído nas vigas secundárias.....	28
Figura 11 – Carregamento concentrado e distribuído nas vigas principais.....	28
Figura 12 – Reação do piso e aproximação por série de Fourier.....	31
Figura 13 – Reação do piso e função proposta por Varela.....	31
Figura 14 – Modelo biodinâmico.....	32
Figura 15 – Objeto de estudo.....	33
Figura 16 – Planta do piso com as cotas em centímetros da estrutura.....	34
Figura 17 – Planta baixa do piso com as cotas em centímetros dos vãos.....	34
Figura 18 - Estrutura 3D com cotas em centímetros na vertical.....	34
Figura 19 – Sentido da laje steel deck.....	35
Figura 20 – Sentido dos perfis metálicos.....	35
Figura 21 - Parâmetros de entrada para viga mista.....	36
Figura 22 - Medidas da forma de steel deck MF-75.....	37
Figura 23 - Estrutura mista com os conectores de cisalhamento.....	37
Figura 24 - Carregamento do peso próprio da estrutura.....	39
Figura 25 - Carregamento da laje na estrutura.....	40
Figura 26 - Carregamento do piso na estrutura.....	41
Figura 27 - Carregamento da sobrecarga na estrutura.....	41
Figura 28 - Definição dos parâmetros padrões.....	42
Figura 29 - Local da ligação do perfil W410x38,8 – L01.....	45
Figura 30 - Esquema da ligação do perfil W410x38,8 – L01.....	45
Figura 31 - Local da ligação do perfil W410x38,8 – L02.....	46

Figura 32 - Esquema da ligação do perfil W410x38,8 – L02.....	47
Figura 33 - Esquema do corte para a ligação do perfil W410x38,8 – L02.....	47
Figura 34 - Local da ligação do perfil W460x68.....	48
Figura 35 - Esquema da ligação para a viga W460x68.....	49
Figura 36 - Local da ligação do perfil W530x82.....	50
Figura 37 - Esquema de ligação para a viga W530x82.....	51
Figura 38 - Vão da estrutura de piso analisada com cotas em metros.....	52
Figura 39 – Área de atuação da viga secundária.....	54
Figura 40 – Componentes estruturais do trabalho de Lima e Silva (2022),.....	57
Figura 41 – Respostas dinâmicas de aceleração do objeto de estudo de Lima e Silva (2022): numérica e experimental (modelo biodinâmico).....	58
Figura 42 – Seção da laje transformada em elemento de barra.....	58
Figura 43 – Intersecção dos elementos formando os nós (261 nós).....	59
Figura 44 – 1º modo de vibração.....	60
Figura 45 – 2º modo de vibração.....	60
Figura 46 – Nó de análise na estrutura.....	61
Figura 47 – Trajeto da pessoa.....	61
Figura 48 – Resposta da aceleração de pico.....	62
Figura 49 – Ábaco de resposta subjetiva de pessoas expostas a vibração.....	65

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Deslocamento máximo admissível.....	27
Tabela 2 - Reações no perfil W410x38,8 – L01.....	44
Tabela 3 - Reações no perfil W410x38,8 – L02.....	46
Tabela 4 - Reações no perfil W460x68.....	48
Tabela 5 - Reações no perfil W530x82.....	49
Tabela 6 - Cálculo da frequência natural pela ANSI/AISC 360-10.....	55
Tabela 7 - Cálculo da aceleração relativa pela ANSI/AISC 360-10.....	56
Tabela 8 - Cálculo do deslocamento máximo do piso pela NBR 8800/2008.....	57
Tabela 9 - Confronto dos deslocamentos máximos do piso.....	62
Tabela 10 - Confronto das frequências naturais.....	63
Tabela 11 - Confronto das acelerações relativas.....	64
Tabela 12 - Dados para o dimensionamento da ligação.....	68
Tabela 13 - Dados para o dimensionamento da ligação.....	68
Tabela 14 - Dados para o dimensionamento da ligação.....	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Caracterização.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.3 Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Introdução ao estudo da dinâmica estrutural.....	14
2.1.1 Modelo numérico.....	14
2.1.2 Descrição do modelo com um grau de liberdade (1GL).....	15
2.1.2.1 Modelo generalizado.....	15
2.2 Indicação das normas a respeito das vibrações.....	18
2.2.1 American Institute of steel construction (ANSI/AISC 360-10).....	18
2.2.1.1 Proposta de cálculo para aceleração devido ao caminhar humano.....	19
2.2.2 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR8800/2008).....	26
2.3 Análise com modelo biodinâmico.....	30
3. ESTUDO DE CASO.....	33
3.1 Contextualização do problema.....	33
3.2 Dimensionamento da estrutura metálica via software.....	35
3.2.1 Parâmetros iniciais.....	35
3.2.2 Geometria.....	38
3.2.3 Cargas.....	39
3.2.4 Combinações e coeficientes.....	42
3.2.5 Considerações finais do dimensionamento.....	42
3.3 Dimensionamento das ligações metálicas.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1 Análise das respostas dinâmicas.....	52
4.1.1 Metodologia da ANSI/AISC 360-10.....	52
4.1.1.1 Vigas secundárias.....	53
4.1.1.2 Viga principal.....	54

4.1.1.3 Resultados.....	55
4.1.2 Metodologia NBR 8800/2008.....	56
4.1.2.1 Resultados.....	56
4.1.3 Análise dinâmica.....	57
4.1.4 Estudo comparativo.....	62
5. CONCLUSÃO.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
APÊNDICE A	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização

Utilizada como elemento estrutural desde o final do século XVII na Europa e América do Norte, a estrutura de aço, no Brasil, foi introduzida, de modo iniciante, após a criação da Companhia Siderúrgica Nacional.

Em meados da década de 90, no país sul-americano, as peças de aço começaram a fazer parte, de maneira mais ascendente, da construção civil. Nas regiões metropolitanas configuram-se um novo panorama em relação aos materiais utilizados, sendo o aço utilizado em grande escala e em todos os tipos de construção.

Entretanto, em alguns estados, como Sergipe, a inserção de novas tecnologias e modelos construtivos fazem, do novo, um sistema questionável. Inserida lentamente e de maneira gradual na economia sergipana, a estrutura de aço ainda encontra-se alguns obstáculos, tais como o valor e mão de obra qualificada.

Fatores como flexibilidade e compatibilização com outras áreas envolvidas fizeram com que as estruturas deixassem de serem robustas e procurassem seções mais esbeltas, de tamanhos mais agradáveis, permitindo espaços internos mais amplos e sem obstáculos.

Aliado a estes fatores, o tempo é o principal ponto. Agente decisivo no período moderno, ele interfere no quesito vantagem. Comparada com a estrutura em concreto armado, a estrutura de aço além de ser capaz de cumprir o mesmo papel estrutural que os elementos convencionais costumam desempenhar, pode ser até 40% mais rápida (SILVA e CARDOSO, 2018), ideal, principalmente, para obras comerciais, onde os prazos de construção devem ser os mais curtos possíveis.

No ato incessante e contínuo de comparação financeira entre aqueles elementos, reduzir a seção do aço pode ser uma opção rentável. Entretanto, essa redução acarreta uma perda de massa na estrutura, possibilitando o surgimento de um problema desagradável e, a depender da incidência, até perigoso: a vibração estrutural.

Fenômeno bastante conhecido mundo afora, a vibração já teve participação em grandes obras internacionais, tais como as pontes do Milênio e Tacoma Narrows, situadas em Londres e Washington, respectivamente, onde na primeira o problema foi relacionado com o caminhar humano e, a segunda, envolvendo a ação do vento.

Com as perdas generalizadas de massa, no intuito de reduzir custos de fabricação e estruturas cada vez menores, as taxas de absorção de vibrações são menores, visto que a rigidez da estrutura também diminui (CUNHA, 2021).

O estudo da dinâmica é de suma importância na análise da estrutura, pois pode causar incômodos perceptíveis ao ser humano, quando analisado o caminhar humano, objeto de estudo do presente trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho em questão será dimensionar um piso misto composto por estrutura metálica e laje steel deck, assim como as ligações e, então, através de metodologias diferentes (norma americana (ANSI/AISC 360/10), norma brasileira (NBR 8800/2008) e um algoritmo tridimensional com validação teórica-experimental (desenvolvido por Lima e Silva, 2022)) analisar os parâmetros encontrados de frequência natural da estrutura e aceleração relativa.

1.3 Objetivos específicos

O objetivo específico será confrontar os resultados encontrados das diferentes metodologias e relacionar com os ábacos sensoriais de percepção humana frente às vibrações no piso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução ao estudo da dinâmica estrutural

Ainda pouco utilizada, porém não menos importante, a análise da dinâmica estrutural é de suma importância para verificar cargas e efeitos em uma estrutura.

Comumente utilizada nos estudos, os efeitos estáticos desempenham um papel importante na verificação de tensões e deformações, haja visto que as estruturas devem ser capazes de suportar algum tipo de carregamento que não varie com o tempo e/ou que os efeitos inerciais possam ser desconsiderados.

Entretanto, efeitos dinâmicos são recorrentes na maioria das estruturas, sendo induzidos por vibrações de equipamentos, fontes naturais (terremotos, ventos, etc), efeitos humanos (caminhar humano), caracterizados por um comportamento sujeito a uma ação de aceleração grande o suficiente que permite considerar os efeitos das forças inerciais.

2.1.1 Modelo numérico

Uma carga dinâmica pode ter um efeito significativamente grande que uma carga estática de mesma magnitude devido a inabilidade da estrutura a responder rapidamente a carga (deflexão).

O aumento do efeito da carga dinâmica é dado pela equação (2.1) abaixo:

$$FAD = \frac{\mu_{max}}{\mu_{estático}} \quad (2.1)$$

Onde:

FAD: fator de amplificação dinâmica

μ : deflexão da estrutura devido a carga aplicada

Diante das inúmeras contribuições dadas por Newton, a chamada Segunda Lei de Newton constitui a base para a teoria da análise dinâmica, onde diz que “a força resultante em um corpo é o produto entre sua massa e aceleração”.

Em formulação numérica pode-se escrever da seguinte maneira:

$$\sum f(t) = F(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{dx}{dt} \right) \quad (2.2)$$

onde a força resultante que atua em um corpo é proporcional a taxa de variação no tempo da quantidade de movimento.

Como, nesta análise, a massa do corpo é constante, a equação (2.2) pode ser melhor representada pela equação (2.3):

$$F(t) = m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) \quad (2.3)$$

sendo x a posição da massa m ao longo do tempo t.

Já referido no tópico 2.1, a aceleração da estrutura gera um deslocamento e, com isso, forças inerciais são consideradas, conforme a equação (2.4):

$$\sum f(t) + f(i) = 0 \quad (2.4)$$

onde f(i) é a força inercial desenvolvida pela massa m e proporcional a aceleração (em sentido contrário) – conforme princípio de D’Alambert.

Outras forças são essenciais para o estudo da dinâmica, como a de amortecimento. Contudo, serão abordadas posteriormente em conjunto com a análise do grau de liberdade do sistema e representada através do conjunto pessoa-estrutura.

2.1.2 Descrição do modelo com 1 grau de liberdade (1GL)

Uma análise completa no tempo fornece a resposta da estrutura no tempo e após a aplicação do carregamento.

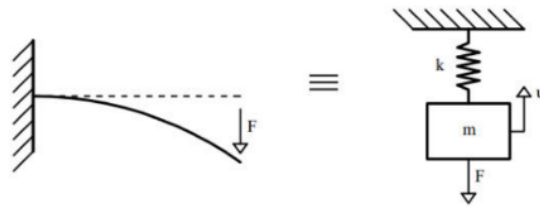
Mencionado no item 2.1.1, a principal característica do sistema dinâmico refere-se ao fato de considerar os efeitos inerciais provenientes da aceleração do sistema.

2.1.2.1 Modelo generalizado

Considere uma viga engastada livre com uma carga F aplicada em sua extremidade sem apoio, que apresente um deslocamento estático proporcional a carga – conforme a lei de Hooke.

Considere-se, também que a mola apresenta uma rigidez da ordem $k = \frac{3EI}{L^3}$. Considera-se, ainda, uma massa (proporcional ao comprimento L da viga) suspensa por uma mola, cujo equilíbrio é obtido após a deformação dela.

Figura 1 – Análise estática da estrutura



Fonte: Lima e Silva (2022).

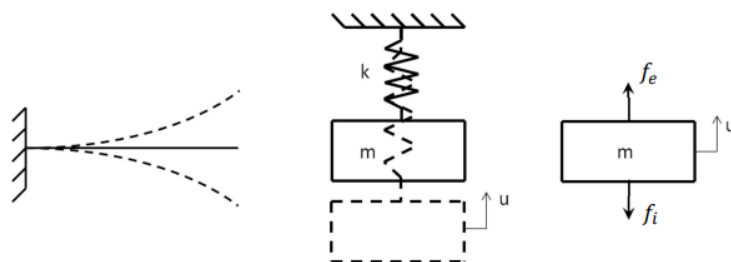
O deslocamento na viga devido a carga estática F colocada na extremidade gera um acúmulo de energia de deformação elástica. A remoção repentina desta carga faz com que a energia seja liberada em forma de movimento, produzindo, assim, acelerações e forças de inércia.

Quando a carga F é retirada, a viga inicia-se movimentações de subida e descida sucessivas em relação ao seu eixo horizontal, caracterizando um movimento oscilatório, denominado de vibração.

A equação que caracteriza esse movimento da barra é dada pelo somatório das forças elásticas e forças de inércia, como segue equação (2.5):

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2.5)$$

Figura 2 – Modelo de 1 GL de vibração livre da viga



Fonte: Lima e Silva (2022).

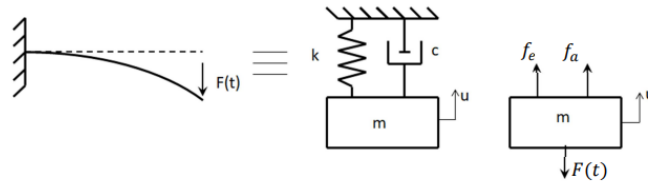
As forças elásticas e de inércia, f_e e f_i , respectivamente, conduzem para um equilíbrio dinâmico com amplitudes iguais, porém com tempo indeterminado.

Contudo, sabe-se que as amplitudes de deslocamento da viga diminuem com o passar do tempo, até atingir a condição estática. Essa diminuição é referente ao condicionamento da ação da força de amortecimento, responsável por promover a dissipação da energia.

Esse arranjo é representado pela equação (2.6).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (2.6)$$

Figura 3 – Modelo de 1 GL de vibração forçada da viga



Fonte: Lima e Silva (2022).

Diz-se um sistema ser de um grau de liberdade uma vez que ele trabalhe de uma única forma e consiga representar a viga em análise, ou seja, representa o número de movimentações possíveis de um sistema.

Porém, essa abordagem pode ser generalizada para uma diversidade de graus de liberdade (múltiplos graus de liberdade) nodais interrelacionados entre si, de forma análoga à análise estática matricial. Com isso, a equação de movimento pode ser fornecida como mostra a formulação (2.7).

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (2.7)$$

M , C e K são, respectivamente, as matrizes da massa, amortecimento e rigidez do sistema estrutural com múltiplos graus de liberdade, $F(t)$ é o vetor de força de excitação em cada grau de liberdade em relação ao tempo; os termos u , $\dot{u}$ e $\ddot{u}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, nesta ordem.

Para tanto, embora satisfatório, os modelos de carga móvel não contemplam as interações entre pessoa e estrutura quando necessário simular o caminhar humano.

2.2 Indicações das normas a respeito de vibrações

2.2.1 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (ANSI/AISC 360-16)

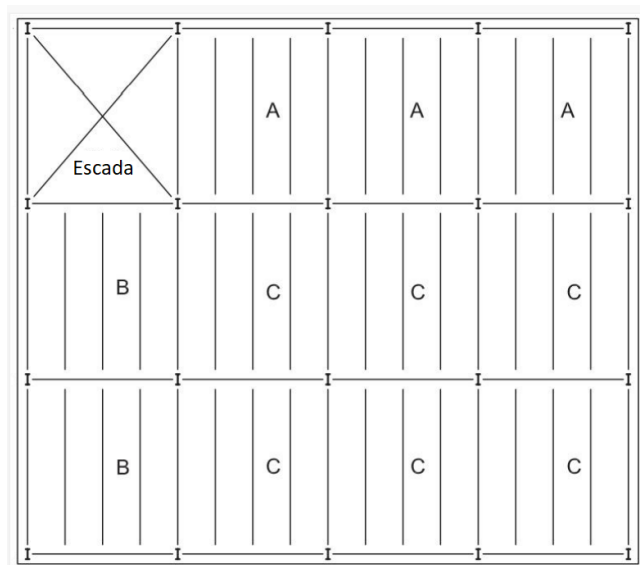
A metodologia apresentada pela norma americana e seus guias complementares permitem analisar modos de vibração em diversos tipos de estruturas - escadas, passarelas, lajes -, com a interação das atividades humanas – em especial, o caminhar.

Os limites de tolerância são os mais diversos possíveis e, devido a sua variedade e complexidade, a mensuração acaba tornando difícil, visto que variam de acordo com a magnitude do movimento, ambiente ao redor do sensor e o sensor humano – AISC: Guide11.

Desse modo, a transmissão das ondas de vibração torna-se um fator importante a ser minimizado, a fim de evitar sua propagação para outros ambientes e/ou vãos da estrutura. O guia americano (Guide 11) ressalta algumas análises sobre este fenômeno e apresenta alternativas para melhorar o desempenho da não propagação de ondas, como as reduções do espaçamento e comprimento das vigas.

Na Figura 4 é possível inferir-se três tipos de regiões (A,B e C) com alterações em torno de 50% em algum dos lados de cada vão. Esse arranjo minimiza a transmissão das ondas para outros compartimentos.

Figura 4 – Estrutura com largura e comprimento divergentes



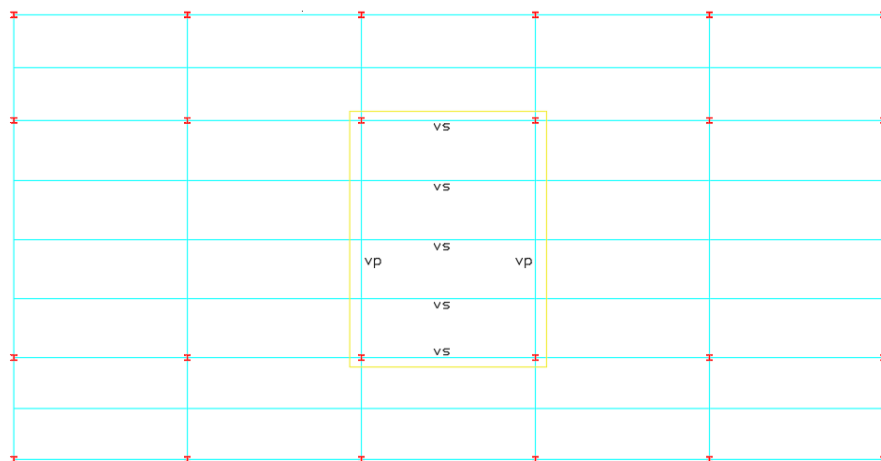
Fonte: AISC – Steel design guide 11.

Com isso, como critério de verificação da vibração imposta no piso, serão calculados alguns parâmetros auxiliares com o intuito de determinar a aceleração de pico relativa à aceleração da gravidade com base na ocupação e uso da laje.

2.2.1.1 Proposta de cálculo para aceleração devido ao caminhar humano

O procedimento de cálculo para análise de vibrações admite variações quanto à localidade das vigas no piso. Por questão de simplificação de cálculo, será submetida para análise o vão central da estrutura, composto por duas vigas principais W530x82 e cinco vigas secundárias W410x38,8, conforme Figura 5.

Figura 5 – Estrutura do piso com as vigas principais e secundárias.



Fonte: Autor.

Onde:

Vs: Viga secundária

Vp: Viga principal

Na etapa inicial do cálculo faz-se necessário homogeneizar os materiais utilizados, já que são elementos compostos por aço (perfis) e concreto (laje). Com isso, calcula-se um termo “n” denominado de coeficiente de homogeneização, através das equações (2.10), (2.11) e (2.12), a fim de tornar como elemento principal, e único, o aço.

$$n = \frac{Ea}{Ec} \quad (2.8)$$

$$E_c = 1,35. E_{cs} \quad (2.9)$$

$$E_{cs} = 4760\sqrt{Fck} \quad (2.10)$$

Onde:

n: coeficiente de homogeneização

E_a : módulo de elasticidade longitudinal do aço. Em MPa

E_c : módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto, em MPa

E_{cs} : módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto, em MPa

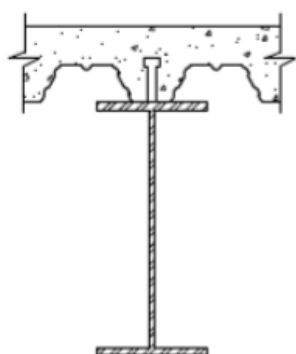
Fck : resistência característica do concreto à compressão, em MPa. Considerou-se 25MPa.

- **Cálculo para a viga secundária**

- Informações da laje:

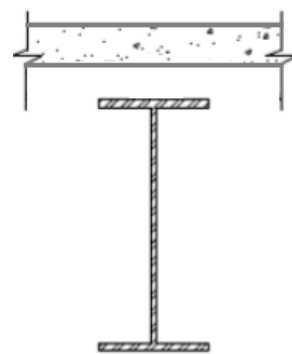
A laje será em steel deck. A nervura da laje, (Figura 6), para efeito de cálculo, será desconsiderada e, então, tornará válida apenas a parte maciça, conforme a Figura 7.

Figura 6 – Laje com nervura



Fonte: Autor.

Figura 7 – Laje sem nervura



Fonte: Autor.

- Metodologia de cálculo:

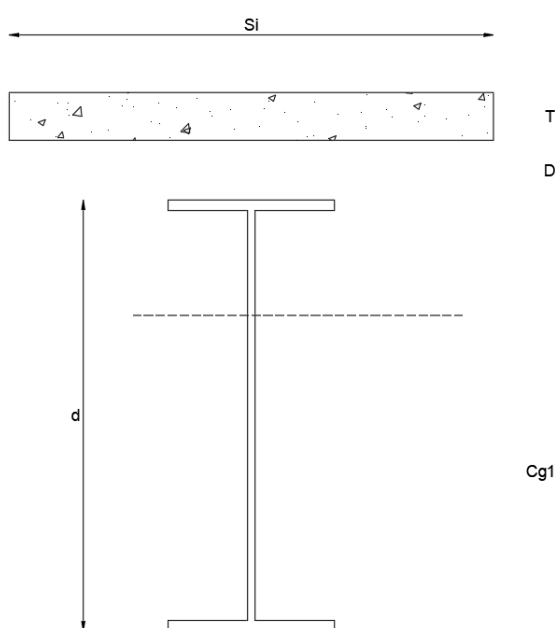
Após encontrar o coeficiente de homogeneização, é necessário calcular o centroide da seção mista homogeneizada – agora em aço.

Admite-se que a largura do concreto homogeneizado (S_i) é igual a razão entre o espaçamento das vigas secundárias (S) e o coeficiente n . A figura 8 composta é simétrica em relação ao eixo X-X. Logo, somente será necessário o eixo Y-Y para o cálculo do centroide. A equação (2.13) permite encontrar o valor da coordenada y .

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{Y}_i A_i}{\sum A_i} \quad (2.11)$$

Após o cálculo do centroide, é calculado o momento de inércia resistente da seção (I_{effs}) para a viga secundária.

Figura 8 – Seção da viga mista secundária homogeneizada



Fonte: Autor.

$$I_{effs} = I_S + A_S (D + 0,5d + C_{g1})^2 + S_i \frac{T^3}{12} + S_i T (C_{g1} + 0,5T)^2 \quad (2.12)$$

Onde:

S_i : largura da seção homogeneizada.

T : altura efetiva da seção, equivalente a altura maciça da laje.

D : altura da nervura.

C_{g1} : centroide da seção composto

d : altura do perfil metálico.

I_S : momento de inércia do perfil metálico.

A_S : área do perfil metálico.

Finalizado o cálculo do momento de inércia resistente da seção composta, agora homogeneizada em aço, calcula-se a carga atuante na viga secundária (W_{js}) através da equação (2.15):

$$W_{js} = S \left(W_1 + \frac{W_{vs} g}{S} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

W_1 : peso da laje, incluindo a ocupação.

g : aceleração da gravidade, considerada $9,81\text{m/s}^2$.

W_{vs} : massa linear da viga secundária.

S : espaçamento entre as vigas secundárias.

Determinada a carga atuante, faz-se necessário encontrar o deslocamento da viga secundária. A deformação máxima será no meio do vão devido ao tipo de ligação (bi apoiada) como já mencionada em tópicos passados.

A deformação máxima (δ_{vs}) é dada pela equação (2.16) :

$$\delta_{vs} = \frac{5 W_{js} L_{cs}^4}{384 E_a I_{effs}} \quad (2.14)$$

Onde:

E_a : módulo de elasticidade do aço.

L_{cs} : comprimento da viga secundária

Por fim, serão calculadas duas constantes D_s e D_j , equações (2.17) e (2.18), a fim de encontrar o comprimento efetivo da viga secundária B_j - equação (2.19) . O parâmetro B_j deve ser verificado com seu valor máximo $B_{j,max}$ - equação (2.20) - e, caso dê um valor superior, é necessário alterar alguma das propriedades comprimento da viga e/ou espaçamento entre as vigas.

Então, após o cálculo das constantes e a verificação do comprimento efetivo, encontra-se o coeficiente de ponderação W_j , equação (2.21), que será utilizado na determinação do peso efetivo do piso.

$$D_s = \frac{T}{12} \quad (2.15)$$

$$D_j = \frac{l_{eff}s}{s} \quad (2.16)$$

$$B_j = C_j L_{cs} \left(\frac{Ds}{D_j} \right)^{0,25} \quad (2.17)$$

$$B_{j,max} = \frac{2 N L_{cp}}{3} \quad (2.18)$$

$$W_j = \frac{1,5 W_{js} B_j L_{cs}}{s} \quad (2.19)$$

Onde:

C_j : igual a 2 para lajes de interior e 1 para lajes de borda.

N : número de lajes na mesma direção da viga secundária – utilizou-se 3 para este modelo.

L_{cp} : comprimento da viga principal.

- **Cálculo para a viga principal**

- Metodologia de cálculo:

Semelhante à viga secundária, para calcular o centroide da viga principal, (C_{g2}), utiliza-se a equação (2.14).

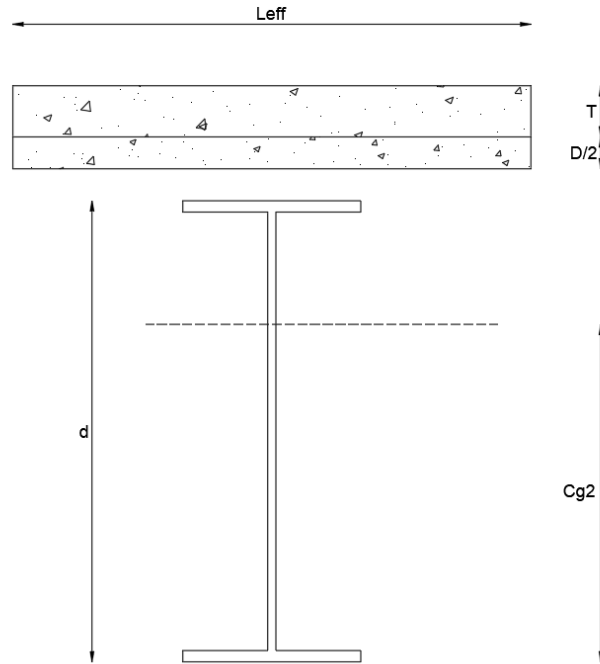
Para o cálculo do momento de inércia resistente da seção para a viga principal, a largura do concreto homogeneizado (L_{eff}) é dada pelo menor valor dentre as formulações abaixo:

$$L_{eff} = 0,4 \frac{L_{cp}}{n} \quad (2.20)$$

$$L_{eff} = L_{cs} \quad (2.21)$$

Diferente das vigas secundárias, para o cálculo do momento de inércia será considerada metade da espessura da nervura, D . Isso é devido ao rearranjo da laje nas vigas, sendo paralela na direção da viga principal, e não mais perpendicular.

Figura 9 – Seção da viga mista principal homogeneizada



Fonte: Autor.

Com isso torna-se possível encontrar o valor do momento de inércia resistente (I_{effp}):

$$I_{effp} = I_p + A_s \left(\frac{D}{2} + 0,5d_p + c_{g2} \right)^2 + L_{eff} \frac{T^3}{12} + L_{eff} T (c_{g2} + 0,5h_{ce})^2 \quad (2.22)$$

Onde:

I_p : inércia do perfil metálico principal

A_s : área do perfil metálico principal

h_{ce} : altura do concreto acima da nervura mais metade da altura da nervura.

O valor da carga atuante na viga principal (W_{gp}) pode ser obtido através da equação (2.25):

$$W_{gp} = \frac{Lcs Wjs}{s} + W_{vp} g \quad (2.23)$$

Onde:

W_{vp} : massa linear da viga principal

A partir da configuração da ligação da viga principal - bi engastada - , pode-se calcular a flecha máxima através da equação (2.26).

$$\delta_{VP,0} = \frac{W_{gp} L_{cp}^4}{384 E_a I_{effp}} \quad (2.24)$$

Com a finalidade de calcular o comprimento efetivo da viga principal (B_g), através da equação (2.28), calcula-se o valor de D_g pela equação (2.27).

$$D_g = \frac{I_{effp}}{L_{cs}} \quad (2.25)$$

$$B_g = C_g L_{cp} \left(\frac{D_s}{D_g} \right)^{0,25} \quad (2.26)$$

Onde:

C_g : 1,8 independente da posição da laje

Semelhante à viga secundária, é necessário que o valor da constante B_g seja inferior ao valor $B_{g,max}$, (2.29), caso contrário, alterações na geometria das vigas deverão ser realizadas.

$$B_{g,max} = \frac{2 N L_{cs}}{3} \quad (2.27)$$

Além do mais, a inequação $0,5 \leq \frac{L_{cp}}{B_j} \leq 1$ deverá ser satisfeita. Em via contrária, a flecha vertical ($\delta_{VP,0}$) deverá ser substituída pela equação (2.30):

$$\delta_{VP} = \frac{L_{cp}}{B_j} \delta_{VP,0} \quad (2.28)$$

Por fim, calcula-se o coeficiente de ponderação (W_g) da viga principal que será utilizado nos cálculos que sucederão.

$$W_g = \frac{W_{gp} B_g L_{cp}}{L_{cs}} \quad (2.29)$$

Por fim, feita as devidas análises da geometria, configuração das lajes, cálculos de parâmetros e constantes, por conseguinte encontram-se os valores da carga total do piso (W), frequência natural do piso (f_n) e aceleração relativa para o piso $\left(\frac{a}{g}\right)$. Estes dois últimos fatores são diretamente relacionados e comparados com ábacos de verificação de aceitabilidade quanto à vibração da estrutura pelo caminhar humano.

$$W = \frac{\Delta vs}{\Delta vp + \Delta vs} W_j + \frac{\Delta vp}{\Delta vp + \Delta vs} W_g \quad (2.30)$$

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta vs + \Delta vp}} \quad (2.31)$$

$$\frac{a}{g} = \frac{P e^{-0,35 f_n}}{\beta W} \quad (2.32)$$

Onde:

P: carga devido ao caminhar, considerada 290N .

β : fator de amortecimento.

2.2.2 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 8800/2008)

- Considerações gerais

Diferentemente da norma americana, a metodologia da norma brasileira não se estende para analisar parâmetros dinâmicos, focando-se apenas em objetos de estudos com cargas estáticas.

São apresentados como bases para estudos de vibração, na NBR 8800/2008, correlações entre frequências fundamentais da estrutura e deslocamento do piso; entretanto não há formulações para determinar aquele parâmetro, fazendo com que, para efeito de análise, utiliza-se apenas valores de deslocamentos verticais da estrutura.

A NBR 8800/2008 divide as análises em 3 diferentes utilizações: residenciais e escritório, atividades aeróbicas e salão de danças com atividades repetitivas e relaciona com o deslocamento máximo vertical permitido, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Deslocamento máximo admissível

Atividade	Frequência (Hz)	Deslocamento máximo (mm)
Residencial/escritório	4	20
Salão de danças	6	9
Aeróbica	8	5

Fonte: NBR 8800/2008.

A norma conclui que, em nenhuma situação, a frequência deve ser menor que 3Hz, visto que qualquer valor maior pode gerar uma perturbação não esperada na estrutura.

- Metodologia de cálculo para o deslocamento máximo

Para determinar o deslocamento da estrutura, a NBR 8800/2008 menciona que, além de considerar as vigas como bi-apoiadas, faz-se necessário utilizar as combinações frequentes de serviço, dispostas no item 4.7.7.3.3 da norma supracitada, para determinar a ação total atuante, exposta na equação (2.35):

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (2.33)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ = ação permanente

$F_{Q1,k}$ = ação variável

$F_{Qj,k}$ = ação variável

ψ_1 e ψ_{2j} = fatores de combinação de redução para ações variáveis, disponível na Tabela 6 da ABNT NBR 8681/2003.

Encontrada a ação atuante, deve-se determinar o momento de inércia da seção transversal da viga mista.

Para isso, é importante identificar a largura da mesa colaborante de concreto, ou largura colaborante do concreto, como segue nas equações (2.36) e (2.37):

- Vigas de centro

$$l_c = 2 \left[\text{menor} \left(\frac{L}{5}, a \right) \right] \quad (2.34)$$

- Vigas de borda

$$l_c = e + 2 \left[\text{menor} \left(\frac{L}{5}, a \right) \right] \quad (2.35)$$

Onde:

l_c : largura colaborante.

L : comprimento da viga em análise.

e : excentricidade da viga quando em balanço.

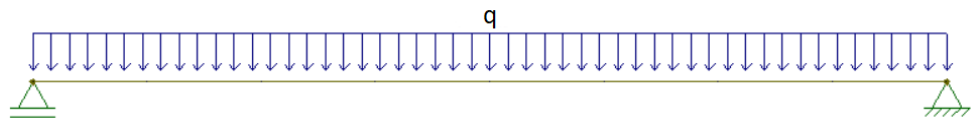
a : metade da distância entre as vigas.

Esse cálculo assemelha-se com o da norma americana, inclusive na consideração da parte da laje maciça apenas. Considera-se, também, o módulo de elasticidade longitudinal do concreto 35% a mais do valor recomendado.

Após o cálculo do momento de inércia, a carga atuante nas vigas secundárias é calculada como carregamento distribuído.

As vigas secundárias, ilustrada na Figura 5, apresentam o mesmo carregamento q (Kn/m), conforme Figura 10 da viga unitária.

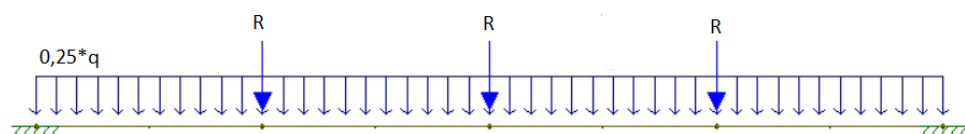
Figura 10 – Carregamento distribuído nas vigas secundárias



Fonte: Autor.

Como as vigas secundárias vinculam-se na principal, o carregamento que será gerado nessa viga será de carga concentrada R (Kn), sendo R a reação característica nos apoios das vigas secundárias. Contudo, considera-se, ainda, uma carga distribuída de acréscimo no valor de $0,25q$, conforme Figura 11, pois mesmo nas condições de apoio da laje, ainda há distribuição de cargas para a viga principal.

Figura 11 – Carregamento concentrado e distribuído nas vigas principais



Fonte: Autor.

Determinados os carregamentos nas vigas principal e secundária, é possível encontrar os deslocamentos máximas verticais do piso.

- Deslocamento vertical máximo da viga secundária

Considerando os carregamentos distribuídos citados acima, tem-se para a viga secundária:

$$\partial V_s = \frac{5q Lcs^4}{384 Ea Ieffs} \quad (2.36)$$

- Deslocamento vertical máximo da viga principal

Para a viga principal o sistema fica um pouco mais complexo. Por apresentar dois tipos de carregamento (uniformemente distribuído e concentrado), utiliza-se a superposição de efeito e, então, o deslocamento total da viga é dado pelo somatório do deslocamento ocasionado pelo carregamento distribuído q , (2.39) e pelo carregamento concentrado R , (2.40).

$$\partial V_{p,1} = \frac{1,25q Lcs^4}{384 Ea Ieffp} \quad (2.37)$$

$$\partial V_{p,2} = \frac{Pa}{6 Ea Ieffp} (3L_{vp}a - 4a^2) \quad (2.38)$$

Onde:

$\partial V_{p,1}$: deslocamento devido a carga distribuída.

$\partial V_{p,2}$: deslocamento devido a carga concentrada.

a : distância da carga ao apoio mais próximo.

Portanto, o deslocamento total da viga principal é o somatório dos deslocamentos referente aos dois tipos de carga, como segue:

$$\partial V_p = \partial V_{p,1} + \partial V_{p,2} \quad (2.39)$$

Em relação ao deslocamento do pilar, considerou-se os apoios sendo sistemas perfeitamente indeslocáveis, então, admite-se que o deslocamento vertical é igual a zero.

Realizadas todas as análises das vigas principal e secundária, pode-se obter o deslocamento final da estrutura, conforme equação (2.42):

$$\partial_{total} = \partial V_p + \partial V_s \quad (2.40)$$

- Verificação da frequência

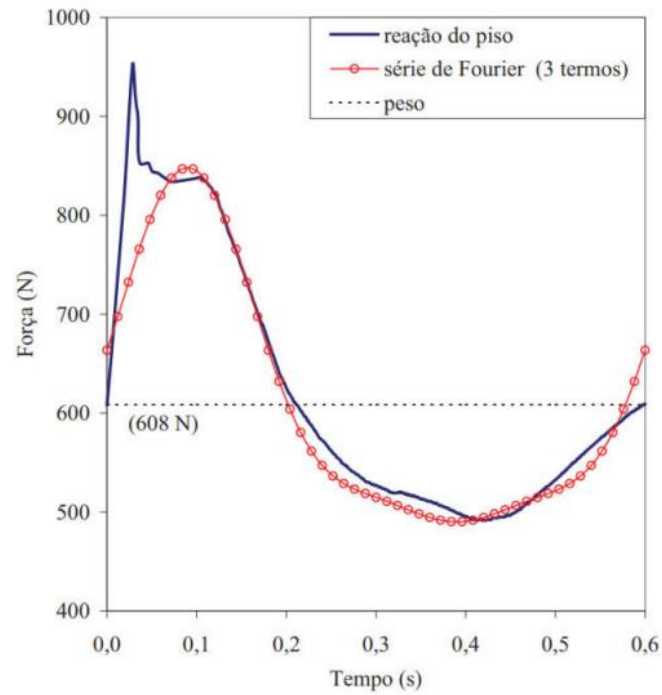
Como já informado, o sistema de análise da norma brasileira não abrange cálculos e métodos baseados em determinar a frequência da estrutura. Dessa maneira, serão utilizados valores da frequência encontrados através de outros meios – norma americana e *software* – e relacionados com a tabela 1, como proposto pela norma abrangente.

2.3 Análise com modelo biodinâmico

O emprego de cargas móveis para representar a ação do caminhar humano é baseado em medições capazes de obter dados a respeito das reações do piso enquanto sujeito ao tráfego (Lima e Silva, 2022). Através das medições percebe-se a proximidade com a função senoidal (periódica) e a possível aproximação por séries de Fourier de três termos. Entretanto, a série utiliza-se de algumas considerações imprecisas (já que se trata de cargas dinâmicas) e determina que ambos os pés provocam a mesma reação na estrutura.

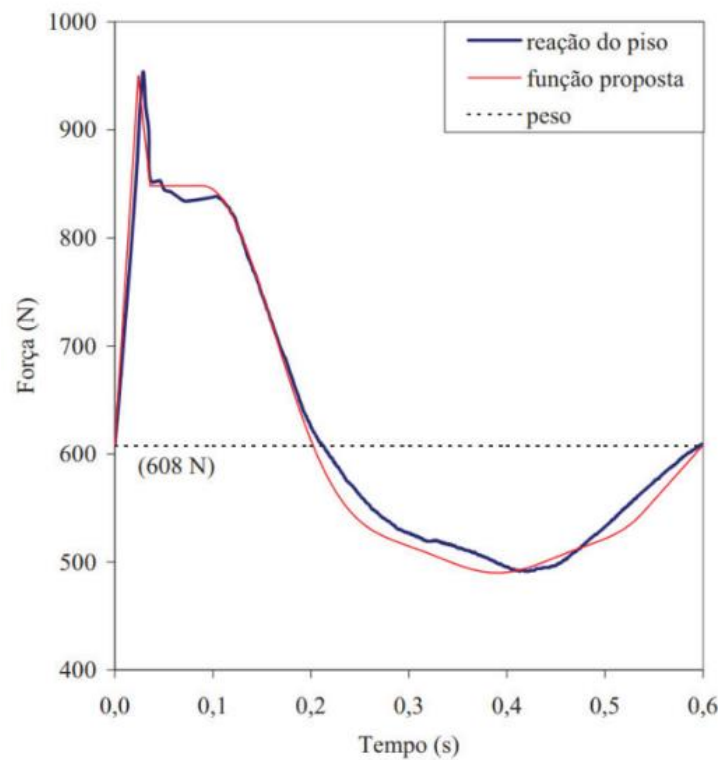
Dessa forma, Varela (2004) utilizou-se da série de quatro termos e considerou-se o impacto causado pelo calcanhar quando a pessoa caminha. Para o exemplo da série de três termos tem-se a Figura 12 e, para o modelo proposto por Varela (2004), a Figura 13.

Figura 12 – Reação do piso e aproximação por série de Fourier



Fonte: Lima e Silva (2022).

Figura 13 – Reação do piso e função proposta por Varela



Fonte: Lima e Silva (2022).

De acordo com Lima e Silva, (2022), faz-se necessário um modelo biodinâmico que não somente faz as interações entre pessoa e estrutura, mas também o impacto causado na superfície.

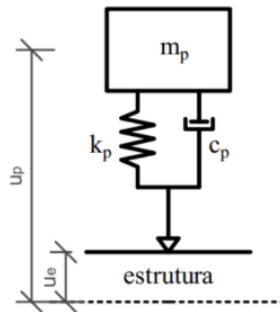
Nessa análise, o autor baseia-se na equação de movimento de um modelo genérico com um grau de liberdade. Admite-se, na equação (2.8), valores relacionados a pessoa, estrutura e a função de interação.

$$m_p \ddot{u}_p + c_p [\dot{u}_p - (\dot{u}_e + \dot{u}_{int})] + k_p [u_p - (u_e + u_{int})] = 0 \quad (2.41)$$

Os valores m_p , c_p e k_p correspondem à massa, amortecimento e rigidez da pessoa, respectivamente. $\ddot{u}_p$, $\dot{u}_p$ e u_p equivalem a aceleração, velocidade e deslocamento, também da pessoa. Já os parâmetros com subíndices e e int equivalem as mesmas grandezas, porém em relação à estrutura e função de interação, nessa ordem.

A figura 14 ilustra o modelo proposto pelo autor.

Figura 14 – Modelo biodinâmico



Fonte: Lima e Silva (2022).

Através do modelo proposto considera-se o impacto do calcanhar. Considera-se, também, elevações e velocidade de modo a simular o efeito do contato.

Dessa forma, feita as análises e considerações do modelo citado, a equação (2.7) caracterizada como equação do movimento, pode ser representada pela forma matricial (não expandida) como segue:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_e & 0 \\ 0 & m_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_e \\ \ddot{u}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_e + c_p & -c_p \\ -c_p & c_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_e \\ \dot{u}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_e + k_p & -k_p \\ -k_p & k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_e \\ u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_p g - f_{int} \\ f_{int} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Fonte: Lima e Silva (2022), pág. 29.

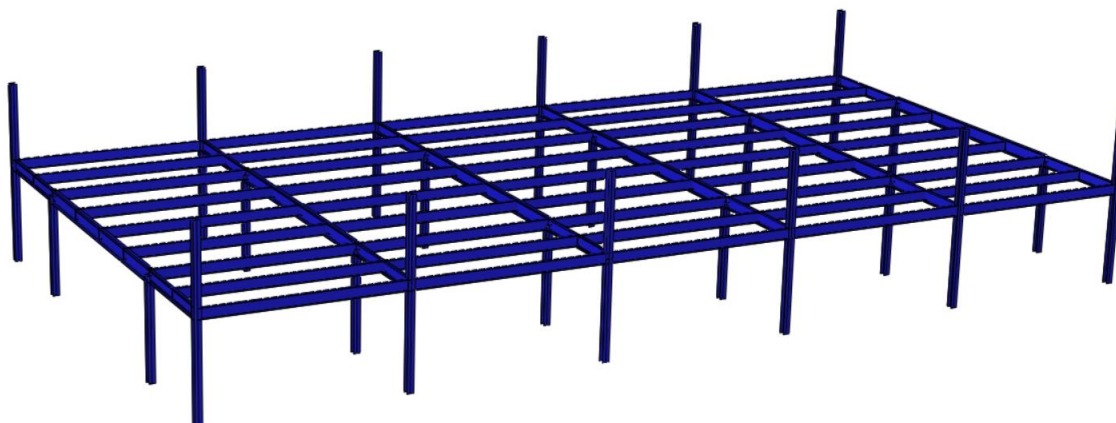
3. ESTUDO DE CASO

3.1 Descrição da estrutura

O estudo de caso do trabalho em análise refere-se a um pavimento superior de um centro comercial (loja varejista) – Figura 15. O espaço contempla as medidas das laterais com 38,48 metros e a região frontal da loja com 19,68 metros. A estrutura conta com vigas e pilares de aço. As vigas são perfis tipo W, aço A572 Grau 50 com limite de escoamento igual a 345 MPa e limite de resistência a ruptura igual a 450 MPa. São divididas em principais e secundárias. As principais apresentam dois vãos: um vão com 10,50 metros e o outro com 4,50 metros, ambas em perfil tipo W. Já as secundárias apresentam o mesmo vão com 7,70 metros e são divididas em vigas de borda e vigas intermediárias (Figura 17). Os pilares de aço são do tipo HP, aço ASTM A572, Grau 50, com limite de escoamento igual a 345 MPa e limite de resistência a ruptura igual a 450 MPa. Apresenta 3 metros de altura até a laje e, acima da laje, complementa com mais 3 metros, ilustrado na Figura 18.

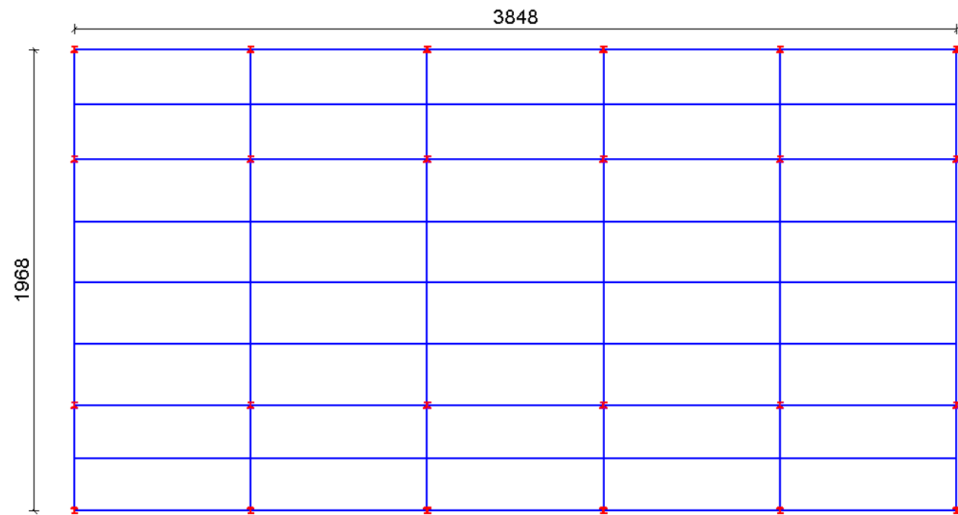
As lajes são do tipo *steel deck*, e contam com armadura superior na forma de telas soldadas. A direção das nervuras da forma *steel deck*, perpendiculares às vigas secundárias, é mostrada na Figura 19. O concreto utilizado na laje apresenta uma resistência característica à compressão de 25MPa aos 28 dias.

Figura 15 – Objeto de estudo



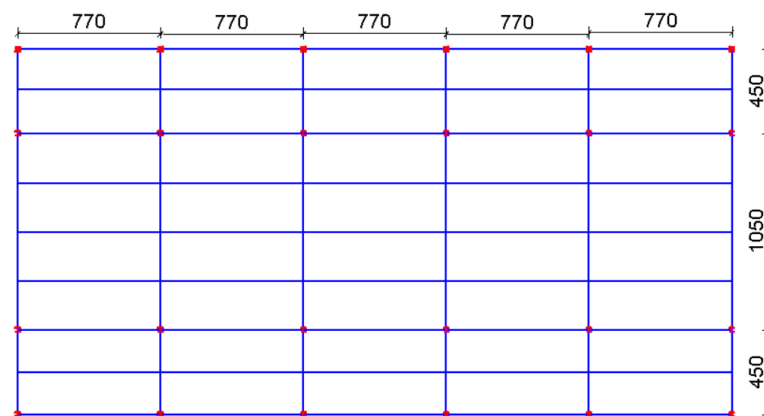
Fonte: Autor.

Figura 16 – Planta baixa do piso com as cotas em centímetros da largura e comprimento da estrutura por completa.



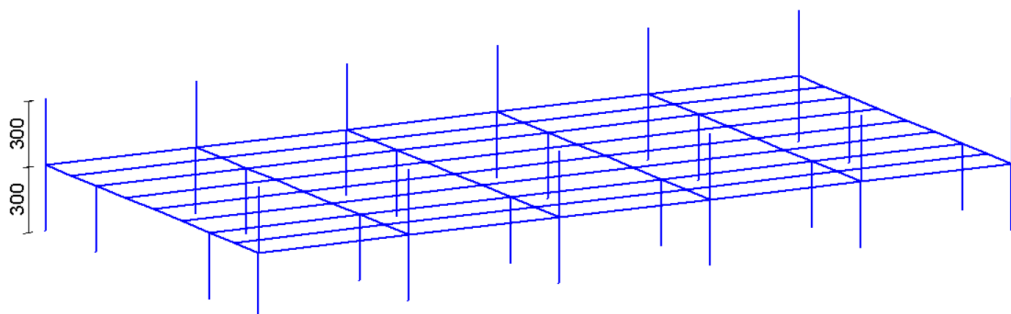
Fonte: Autor.

Figura 17 – Planta baixa do piso com as cotas em centímetros dos vãos.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Estrutura 3D com cotas em centímetros na vertical



Fonte: Autor.

Figura 19 – Sentido da laje steel deck

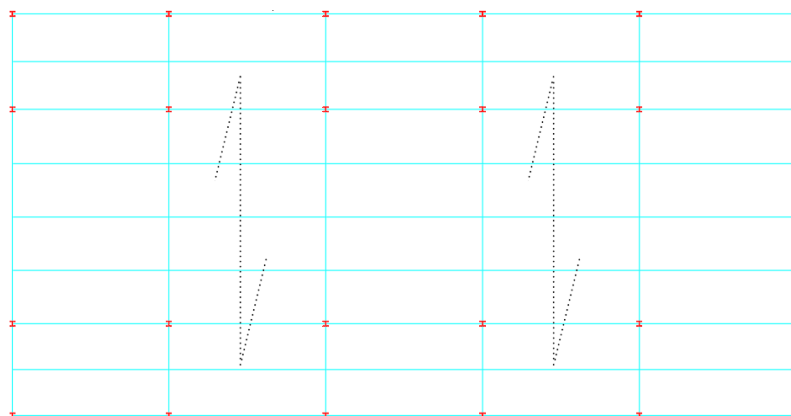
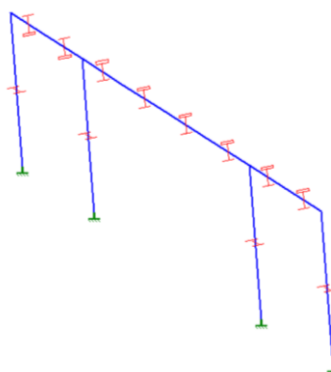


Figura 20 – Sentido dos perfis metálicos.



Fonte: Autor.

3.2 Dimensionamento da Estrutura de aço via Software

Para dimensionamento da estrutura de aço (vigas e pilares) do presente trabalho, foi utilizado o *software* STRAP[®] – Sistema de Análise Estrutural (SAE – VERSÃO 2021). Trata-se de um programa de análise estrutural de elementos finitos com a modelagem em elementos de barras e nós.

3.2.1 Parâmetros iniciais

Considerou-se todos os pilares engastados em suas extremidades, todas as vigas secundárias apoiadas nas principais e rotuladas nos pilares e, as vigas principais, engastadas nos pilares.

As disposições dos pilares ficaram de modo que todos eles fossem colocados com a maior inércia voltada para as vigas principais, com o intuito de reduzir as deformações globais das vigas em análise, Figura 20.

Para o cálculo das estruturas mistas, fez-se necessário o cálculo da largura efetiva da mesa do concreto (B), altura da nervura da forma (D) e a altura entre o final da nervura e o final da laje (T), conforme Figura 21. Esses parâmetros permitem contabilizar a parcela de contribuição do concreto para as vigas de aço – trabalhando como estruturas mistas em que, nesse caso, são vigas mistas.

Figura 21 – Parâmetros de entrada para viga mista

Fonte: Autor.

Com o auxílio da NBR 8800/2008 – Anexo O, pode-se calcular a largura efetiva da mesa do concreto para as vigas de bordas e as internas.

- Para as vigas de borda, tem-se:

$$B = \text{Menor} \left(\frac{L}{8}; \frac{Dv_s}{2} \right) \quad (3.1)$$

- Para as vigas internas, tem-se:

$$B = \text{Menor} \left(\frac{L}{4}; \frac{Dv_s}{2} \right) \quad (3.2)$$

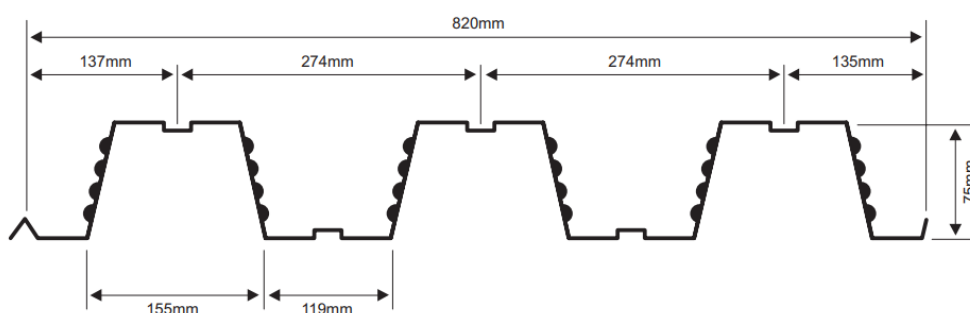
Onde:

L = comprimento da viga analisada.

Dvs = distância entre as vigas secundárias.

Para o cálculo dos parâmetros T e D, Figura 21, serão necessárias algumas considerações. Utilizou-se a forma de steel deck MF – 75, Figura 22. Então, para o cálculo dos parâmetros T e D, Figura 21, utiliza-se D como sendo a nervura do steel deck e T sendo a parte maciça que forma sobre a nervura, Figura 7. Portanto, de acordo com a Figura 22, o valor de D é igual a 75mm e o valor de T igual a 65mm, para totalizar 140mm de espessura total da laje, conforme mencionado no item 3.1.

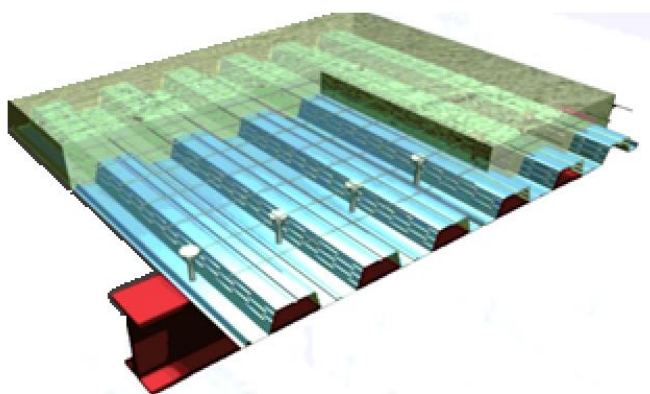
Figura 22 – Medidas da forma de steel deck MF-75.



Fonte: METFORM®.

Na análise supracitada, considerou o *StudBolt* como sendo o elemento de cisalhamento, visto que ele é o responsável pela ligação entre o elemento de aço (vigas) e o elemento de concreto (lajes), como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Estrutura mista com os conectores de cisalhamento.



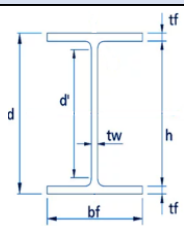
Fonte: METFORM®.

3.2.2 Geometria

Os perfis da biblioteca do *software* apresentam uma enorme variedade. Entretanto, os utilizados no referido dimensionamento são perfis laminados, com aço ASTM – A572, Grau 50, do tipo W e/ou HP. São características deste material limite de escoamento igual a 345 MPa e limite de resistência a tração igual a 450MPa.

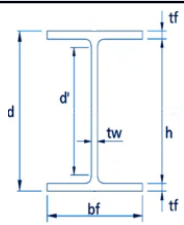
Para o dimensionamento foram utilizados os seguintes perfis.

- HP 250x62 (Pilares)

Perfil HP250X62		
d	246	
d'	201	
h	225	
bf	256	
tw	10,5	
tf	10,7	

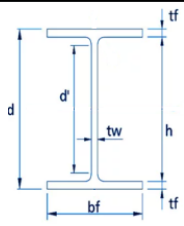
Fonte: Autor.

- W410x38,8 (Viga secundária)

Perfil W410x38,8		
d	399	
d'	357	
h	381	
bf	140	
tw	6,4	
tf	8,8	

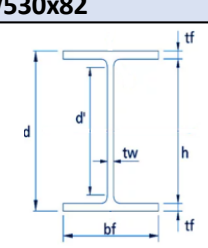
Fonte: Autor.

- W460x68 (Viga principal com 4,5 metros)

Perfil W460x68		
d	459	
d'	404	
h	428	
bf	154	
tw	9,1	
tf	15,4	

Fonte: Autor.

- W530x82 (Viga principal com 10,50 metros)

Perfil W530x82		
d	528	
d'	477	
h	501	
bf	209	
tw	9,5	
tf	13,3	

Fonte: Autor.

3.2.3 Cargas

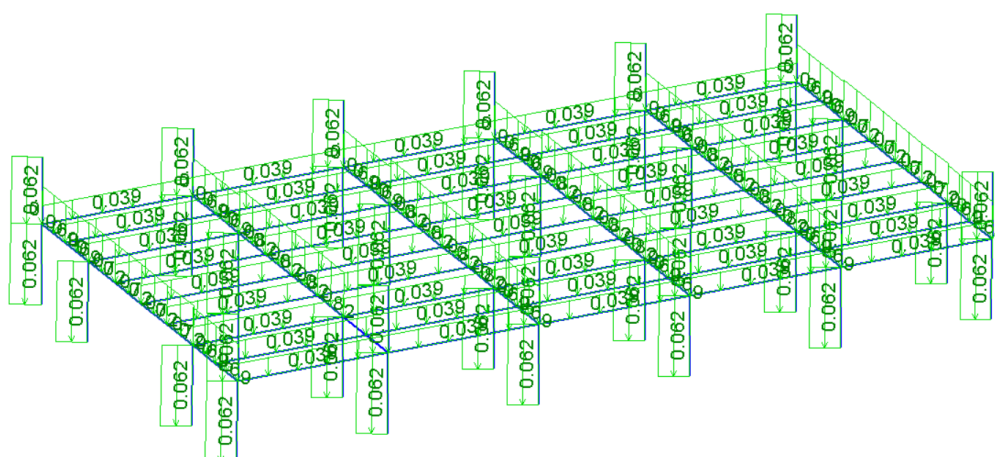
As cargas deste modelo foram aplicadas nas vigas secundárias que, por conseguinte, serão descarregadas nas vigas principais, conforme configuração da laje ilustrada na Figura 19.

Com base na NBR 6120/2019, pôde-se basear-se nos indicativos normativos para se estabelecer valores em cada tipo de carga.

Abaixo serão descritas todas as cargas que compuseram o referido modelo.

- Peso próprio da estrutura

Figura 24 – Carregamento do peso próprio da estrutura

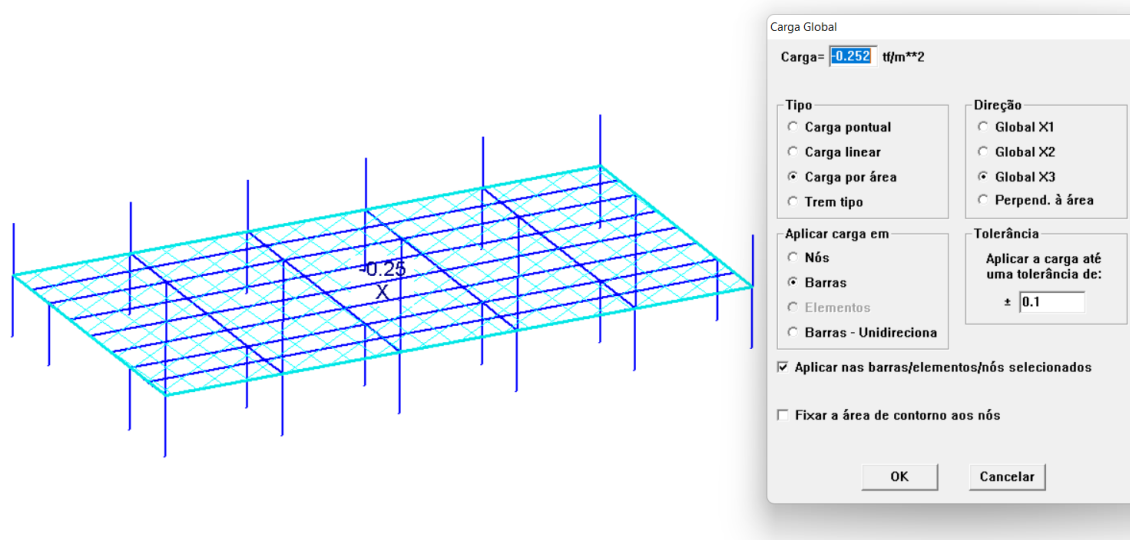


Fonte: Autor.

Este carregamento é intrínseco à massa linear dos perfis mencionados acima. São cargas distribuídas ao longo do comprimento e estão indicados valores lineares, ou seja, kg/m.

- Laje

Figura 25 – Carregamento da laje na estrutura



Fonte: Autor.

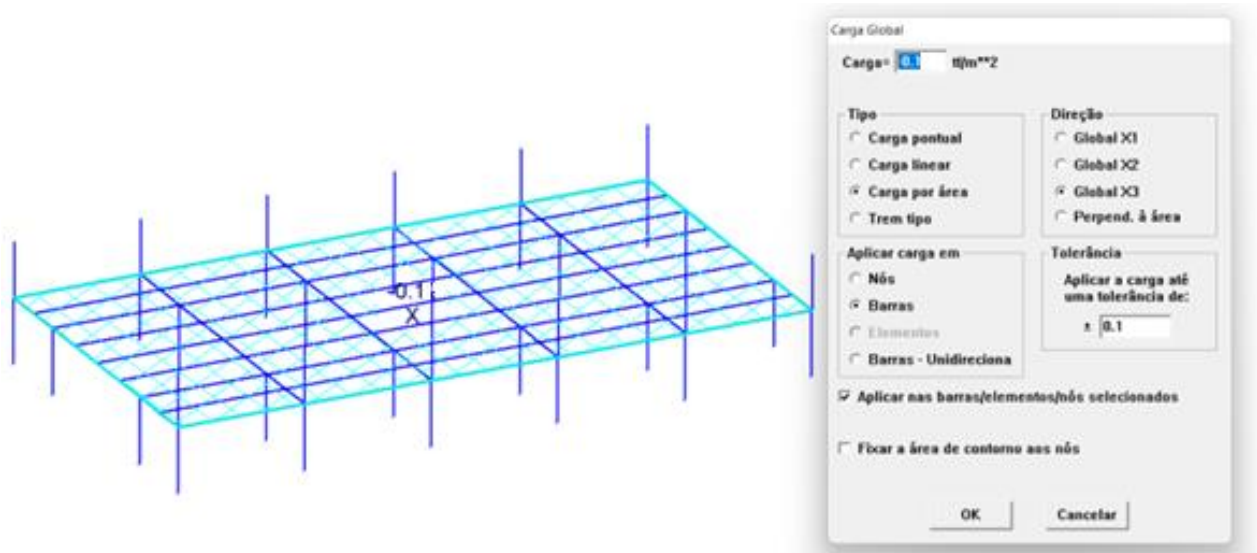
Para o carregamento da laje utilizou-se carga por área, ou seja, as cargas referentes ao valor da laje foram aplicadas em todas as vigas secundárias.

O valor da carga foi remetido ao manual do fabricante do steel deck, onde ele informa – para cada espessura da laje – o peso por m^2 .

Nesta situação e, com base nos dados acima, considerou-se a espessura da laje total de $T+D = 6,5+7,5 = 14\text{cm}$. Portanto, o valor a se tomar como base no manual deve ser igual ou superior, mais próximo, do valor obtido.

- Piso

Figura 26 – Carregamento do piso na estrutura

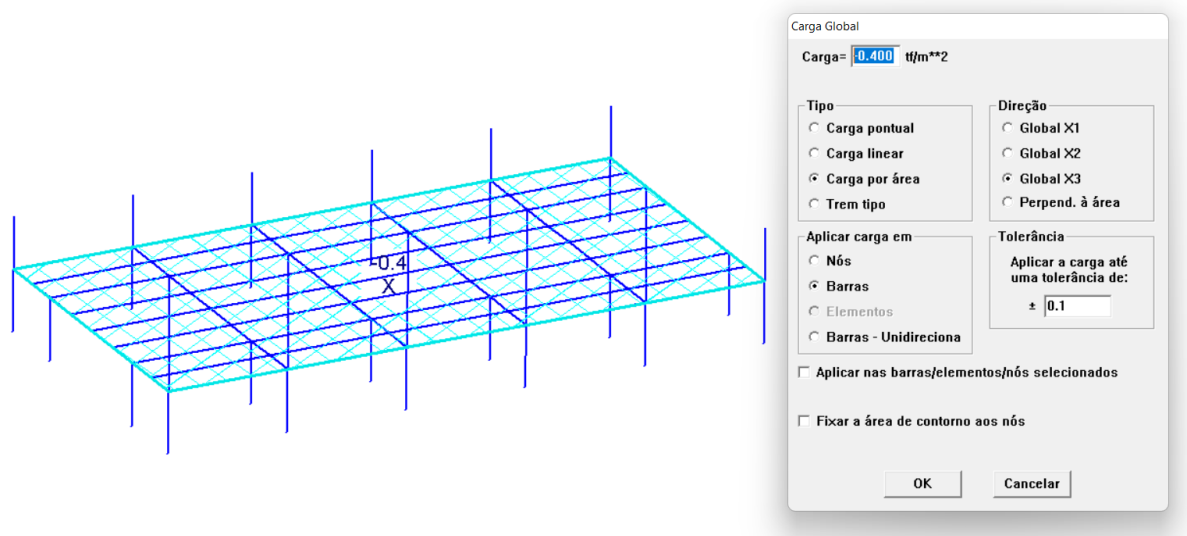


Fonte: Autor.

Para a estrutura, a Tabela 4 da NBR 6120-2019 (pág. 12) informa que, em situações em que ocorrerá revestimentos de pisos de edifícios comerciais com espessura de 5 centímetros, o valor por área se consolida em 1 kN/m².

- Sobrecarga

Figura 27 – Carregamento da sobrecarga na estrutura



Fonte: Autor.

Ainda com base na NBR 6120, a Tabela 10 (pág. 24) – valores característicos nominais das cargas variáveis – aconselha quando se tratar de lojas e centros comerciais, dotadas de circulação e lojas em geral, utilizar 4Kn/m^2 de sobrecarga normativa.

3.2.4 Combinações e coeficientes

As combinações utilizadas foram do estado limite último e estado limite de serviço. Para o estado último, a estrutura foi analisada de duas maneiras: a primeira com a presença do concreto fresco – visto que neste estado ele não trabalha em conjunto com o aço – e, na segunda, com o concreto endurecido a estrutura trabalhando de forma mista.

Os coeficientes de ponderação das ações, fatores de combinação e fatores de redução inseridos neste trabalho foram auxiliados pelas tabelas 1 e 2, respectivamente, da NBR 8800/2008. Considerações do tipo combinações de ações foram baseadas nos itens 4.7.5.3 e 4.7.7 da supracitada norma.

3.2.5 Considerações finais do dimensionamento

Etapas de caracterização dos perfis e atribuições dos parâmetros necessários de acordo com as especificações normativas.

Figura 28 – Definição dos parâmetros padrões

Fonte: Autor.

Para a deformação admissível, a Tabela C.1 da NBR 8800/2008 – Deslocamentos máximos -, infere-se que, em vigas de piso, a deformação limita em $L/350$.

Em relação a esbeltez admissível, o item 5.2.8 limita o índice de esbeltez das barras tracionadas em 300. Já em relação ao índice de esbeltez de barras comprimidas, o item 5.3.4 limita em 200.

Por último, a área de tração foi analisada somente com transmissão de esforços por ligações parafusadas e, pelo item 5.2.5, o intervalo desse parâmetro varia de 0,6-0,9, ou seja, entre 60%-90%.

Todos estes itens e a tabela analisada são encontrados na NBR 8800/2008.

3.3 Dimensionamento das Ligações Metálicas

Serão características desse material as ligações rígidas e ligações flexíveis em sistemas parafusados. Ligações rígidas, ou engastadas, serão utilizadas entre vigas e pilares nas suas maiores inércias, Figura 20, e, ligações flexíveis, ou rotuladas, serão utilizadas entre vigas e pilares nas suas menores inércias e, também, entre vigas principais e vigas secundárias.

Denomina-se ligação rígida a união entres dois elementos onde o ângulo entre as barras ligadas não sofre variação significativa, ou seja, o ângulo não se altera com a aplicação do carregamento; os esforços são transmitidos de forma integral entre esses elementos. De forma matemática, segundo a NBR 8800/2008, a rigidez deve satisfazer a equação a seguir para ser caracterizada como ligação rígida.

$$Si \geq \frac{25EIV}{Lv} \quad (3.3)$$

Já a ligação flexível é aquela em que o ângulo entre as barras antes e depois do carregamento apresenta muita diferença, pois não há restrição à rotação e, de maneira geral, há a transmissão da cortante. A rigidez deste modelo de ligação deve satisfazer a equação (3.4):

$$Si \leq \frac{0,5EIV}{Lv} \quad (3.4)$$

Onde:

Si: rigidez da ligação correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação;

Iv: momento de inércia da seção transversal da viga conectada;

Lv: comprimento da viga conectada;

Para efeito de cálculo do S_i , a NBR 8800/2008 indica a utilização do código de normas europeu (Eurocode 3) para determinar tal incógnita. As configurações estruturais e o comportamento da estrutura se diferem com base na escolha do sistema de ligação.

Segundo AVAKIAN (2007), quando os elementos de ligação não apresentam rigidez suficiente, os valores dos esforços internos e nos apoios podem ter variações relevantes, aumentando, principalmente, a deformação na estrutura.

Para ZANONI (2018), as conexões rígidas conferem um comportamento de continuidade estrutural, gerando esforços nos apoios da viga e, conseqüentemente, transmissão integral dos momentos para os pilares.

A partir do dimensionamento da estrutura de aço e, com o auxílio do *software*, foi possível verificar os valores máximos absolutos para o momento negativo e cisalhamento. Com isso, para cada interação viga-viga e viga-pilar, foi estabelecido um modelo de ligação metálica diferente. As ligações que serão mencionadas foram baseadas no Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados (TEIXEIRA e SILVA, 2005). Trata-se de um guia prático onde já são fornecidos os modelos de ligação, chapas de ligação e tipologia dos fixadores, com base nas cargas de projeto. Para os elementos de fixação do objeto em estudo, foram admitidos parafusos de alta resistência, ASTM A325, nas dimensões 16,19 e 22 milímetros de diâmetro.

- Estudo 1 – Ligação Flexível com chapa de extremidade

Após a análise dos valores das reações, verificou-se no guia prático uma configuração de ligação flexível com chapa de extremidade que supri o problema.

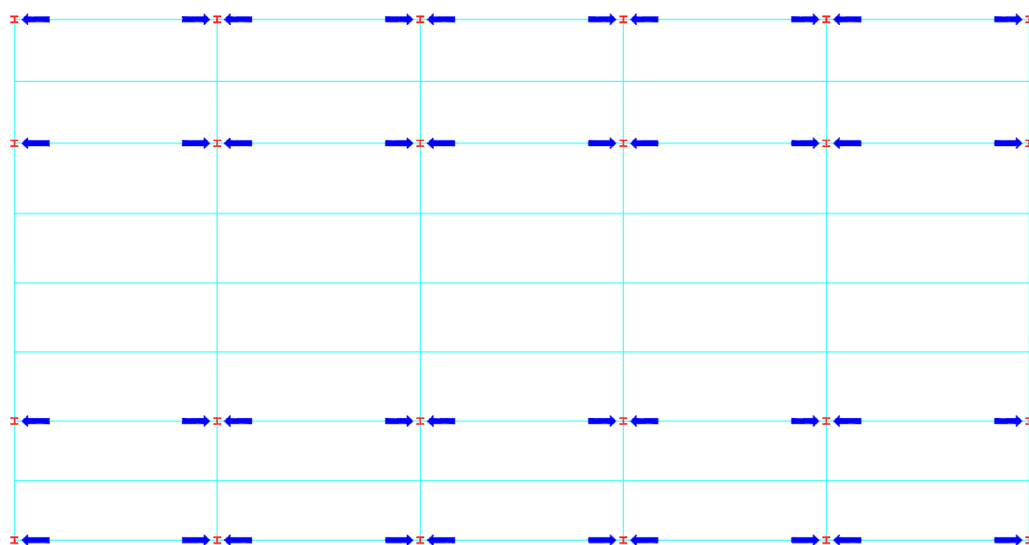
A ligação apresenta uma chapa de extremidade soldada no perfil W410x38,8 medindo 200x240x6,3 milímetros. Essa ligação fará a união da extremidade do perfil com a alma do pilar metálico. Os conectores serão 6, cujo diâmetro apresenta medida de 19 milímetros e comprimento 29 milímetros com rosca total.

Tabela 2 – Reações no perfil W410x38,8 – L01

UNIDADES EM tnf e tnf*m		
PERFIL W410x38 - L01		
CORTANTE	MOMENTO (-)	AXIAL
11	0	0,2

Fonte: Autor.

Figura 29 – Local da ligação do perfil W410x38,8 – L01



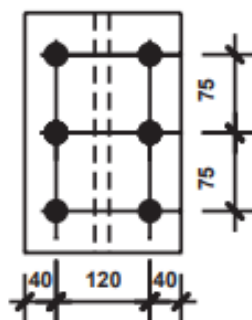
Fonte: Autor.

Após a análise dos valores das reações, verificou-se no guia prático uma configuração de ligação flexível com chapa de extremidade que supri o problema.

A ligação apresenta uma chapa de extremidade soldada no perfil W410x38,8 medindo 200x240x6,3 milímetros. Essa ligação fará a união da extremidade do perfil com a alma do pilar metálico. Os conectores serão 6, cujo diâmetro apresenta medida de 19 milímetros e comprimento 29 milímetros com rosca total.

Com base na NBR 8800/2008, adotou-se como distância mínima de centro do furo à borda igual a 40 milímetros na horizontal e 45 milímetros na vertical – valores aptos segundo a tabela 14. As distâncias entre o centro dos furos foram de 75 milímetros, valor apto segundo o item 6.3.9 da norma sob referência.

Figura 30 – Esquema da ligação do perfil W410x38,8 – L01



Fonte: Ligações para estruturas de aço (ADAPTADO).

- Estudo 2 – Ligação flexível com cantoneira

Após a análise dos valores das reações, verificou-se no guia prático uma configuração de ligação flexível com cantoneira que supri o problema.

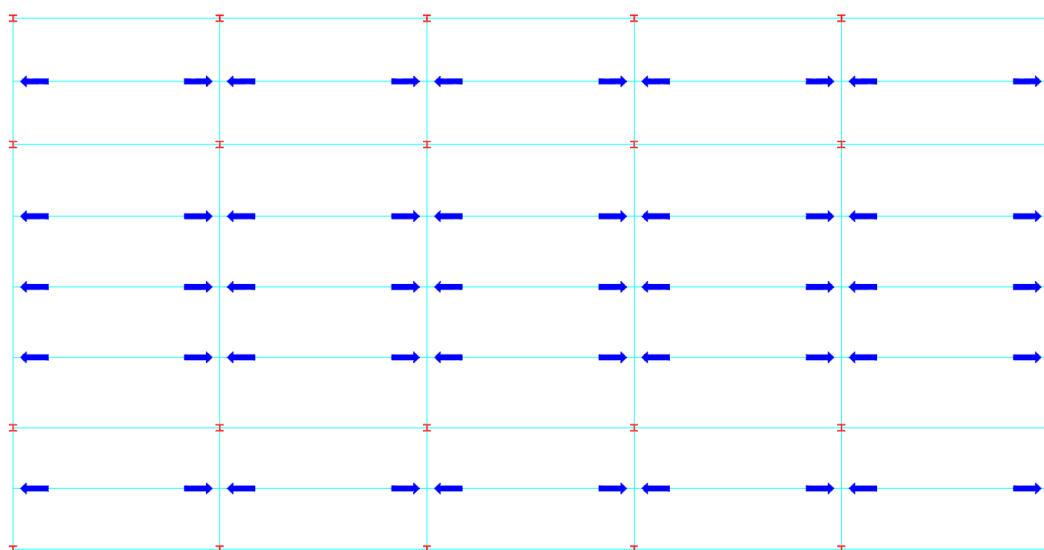
A ligação apresenta duas cantoneiras com medidas 76x76x6,4x230 milímetros ligados por parafusos na alma da viga secundária até a alma da viga principal. Os conectores são 9 unidades ao total, cujo diâmetro apresenta medida de 19 milímetros e comprimento 32 milímetros com rosca total.

Tabela 3 – Reações no perfil W410x38,8 – L02

UNIDADES EM tnf e tnf*m		
PERFIL W410x38- L02		
V	M(-)	A
11,5	0	0,6

Fonte: Autor.

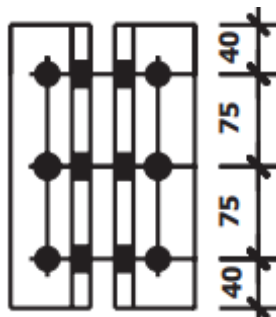
Figura 31 – Local da ligação do perfil W410x38,8 – L02



Fonte: Autor.

Com base na NBR 8800/2008, adotou-se como distância mínima de centro do furo à borda igual a 38 milímetros na horizontal e 40 milímetros na vertical – valores aptos segundo a tabela 14. As distâncias entre o centro dos furos foram de 75 milímetros, valor apto segundo o item 6.3.9 da norma sob referência.

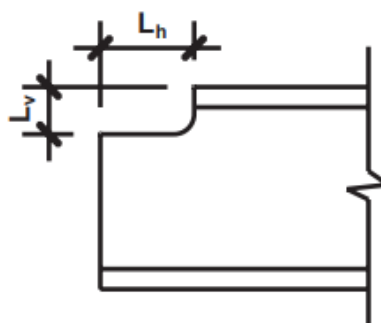
Figura 32 – Esquema da ligação do perfil W410x38,8 – L02



Fonte: Ligações para estruturas de aço (ADAPTADO).

Alinhado a este detalhamento, o fato de ser uma ligação de alma, ou seja, a viga secundária liga na viga principal permanecendo com as abas superiores no mesmo nível, faz-se necessário realizar um corte naquela viga, conforme Figura 33.

Figura 33 – Esquema do corte para a ligação do perfil W410x38,8 – L02



Fonte: Ligações para estruturas de aço (ADAPTADO).

Para o cálculo do L_h utiliza-se a equação (3.5) e, para o L_v , a equação (3.6).

$$L_h = b_f - t_w \quad (3.5)$$

$$L_v = t_f + 10 \quad (3.6)$$

Onde:

L_v : corte na vertical da viga secundária

L_h : corte horizontal na viga secundária

b_f : mesa da viga principal

t_w : espessura da alma da viga principal

t_f : espessura da mesa da viga principal

As unidades são usadas em centímetros e os valores das incógnitas são encontrados no catálogo de perfis estruturais.

Utiliza-se 10 milímetros na formulação do corte vertical devido à folga entre um perfil e outro, conforme sugerido no guia prático para estruturas com perfis laminados.

Por fim, para este modelo, adotou-se $L_h = 100$ milímetros e $L_v = 24$ milímetros.

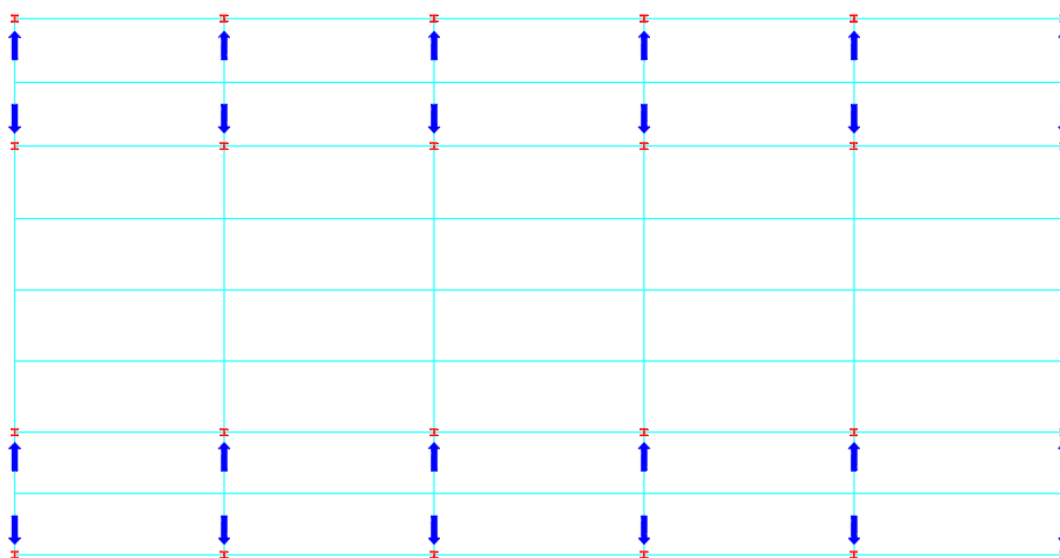
- Estudo 3 – Ligação Rígida com chapa de cabeça

Tabela 4 – Reações no perfil W460x68

UNIDADES EM tnf e tnf*m		
PERFIL W460x68 - L03		
CORTANTE	MOMENTO (-)	AXIAL
21,2	50,4	-0,94

Fonte: Autor.

Figura 34 – Local da ligação do perfil W460x68



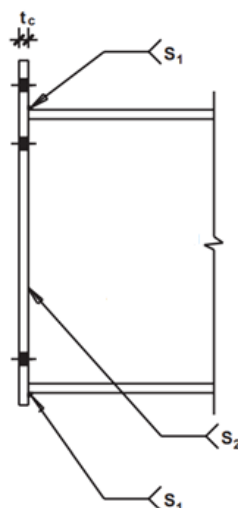
Fonte: Autor.

Da mesma maneira, contudo com ligação rígida, foi feita a consulta no guia prático e comparado com os resultados obtidos das reações. Após a análise, encontrou-se a configuração ideal.

A ligação apresenta uma chapa de cabeça de medidas 256x560x31,5 milímetros soldada na extremidade da viga. Essa viga é unida na aba do pilar metálico por 12 conectores, cujo diâmetro apresenta medida de 19 milímetros e comprimento 83 milímetros com rosca parcial.

Com base na NBR 8800/2008, adotou-se como distância mínima de centro do furo à borda igual a 35 milímetros na horizontal e 40 milímetros na vertical – valores aptos segundo a tabela 14. As distâncias entre o centro dos furos foram de 60 milímetros, valor apto segundo o item 6.3.9 da norma sob referência.

Figura 35 – Esquema da ligação para a viga W460x68



Fonte: Ligação para estruturas de aço (ADAPTADO).

Para essa configuração foram feitas as verificações de limitação do momento devido à flexão da chapa de cabeça e limitação do momento devido às soldas.

Na Figura 35 identifica-se:

tc: espessura da chapa de cabeça;

s1: solda em chanfro entre a aba do perfil e a chapa de cabeça;

s2: solda em filete de 9 milímetros com penetração total em ambas as faces da alma do perfil e chapa de cabeça.

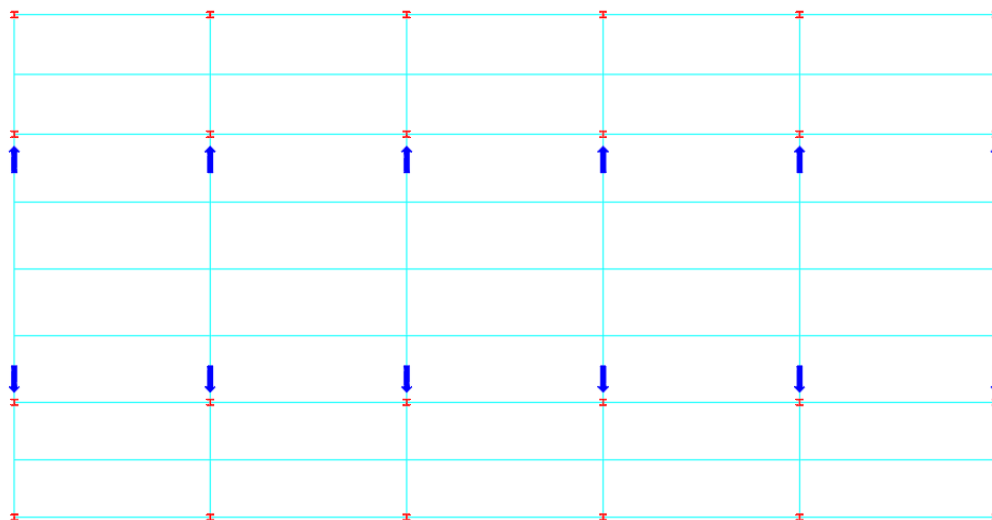
- Estudo 4 – Ligação rígida com chapa de cabeça

Tabela 5 – Reações no perfil W530x82

UNIDADES EM tnf e tnf*m		
PERFIL W530x82 - L04		
CORTANTE	MOMENTO (-)	AXIAL
35,2	56,8	5,8

Fonte: Autor.

Figura 36 – Local da ligação do perfil W530x82



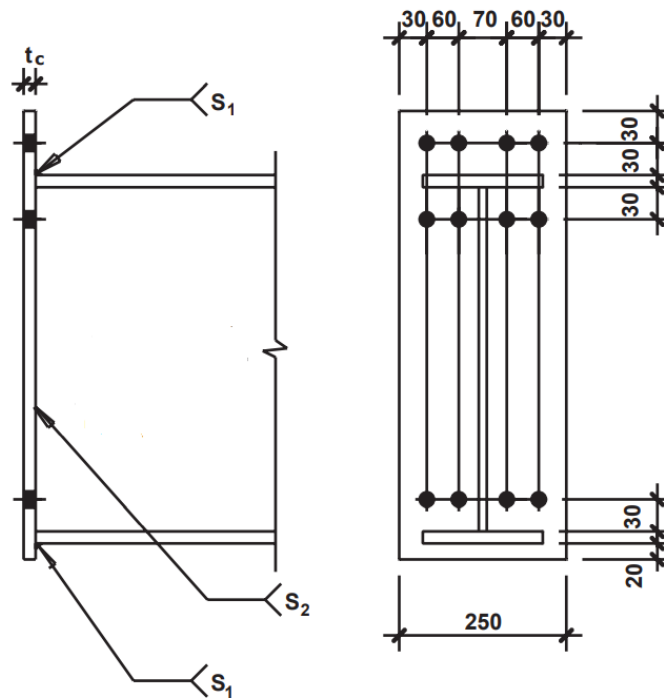
Fonte: Autor.

Por fim, depara-se com a ligação mais solicitada. Trata-se do perfil W530x82 com o pilar HP250x62.

Essa ligação é composta de uma chapa de cabeça de medidas 250x628x25 milímetros soldada na extremidade da viga. Essa viga é unida na aba do pilar de aço por 12 conectores, cujo diâmetro apresenta medida de 22 milímetros e comprimento 77 milímetros com rosca parcial.

Com base na NBR 8800/2008, adotou-se como distância mínima de centro do furo à borda igual a 30 milímetros na horizontal e 30 milímetros na vertical – valores aptos segundo a tabela 14. As distâncias entre o centro dos furos foram de, no mínimo, 60 milímetros, valor apto segundo o item 6.3.9 da norma sob referência.

Figura 37 – Esquema de ligação para a viga W530x82



Fonte: Ligações para estrutura de aço (ADAPTADO).

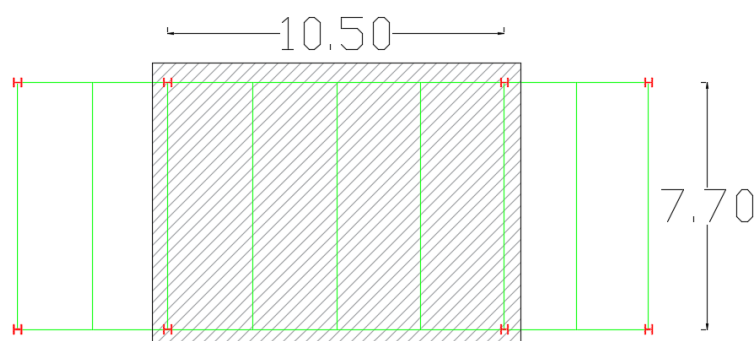
Para essa configuração foram feitas as verificações de limitação do momento devido à flexão da chapa de cabeça e limitação do momento devido às soldas e determinado que as soldas s_1 e s_2 serão com chanfros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise comparativa da aceleração relativa e frequência fundamental da estrutura foram utilizadas as normas brasileira e americana, respectivamente NBR 8800/2008 e ANSI/AISC 360-16, guias práticos complementares dessa norma (como o Guia de Projeto de Aço 11) e o algoritmo desenvolvido por Lima e Silva (2022) com validação teórica-experimental.

A estrutura utilizada para determinar os parâmetros pelas metodologias foi simplificada na área identificada pela Figura 38.

Figura 38 – Vão da estrutura de piso analisada com cotas em metros



Fonte: Autor.

4.1 Análise das respostas dinâmicas

4.1.1 Metodologia da ANSI/AISC 360-16

Em posse das equações desenvolvidas no tópico 2.3.1, os cálculos da frequência natural e aceleração relativa da estrutura deram-se com algumas observações e considerações. Para tal, a estrutura foi dividida em vigas principais e secundárias e, assim, calculados os valores intermediários para então, determinar os resultados.

4.1.1.1 Viga secundária

Sendo o perfil de aço da viga secundária W410x38,8, pode-se obter os valores da área, massa linear e momento de inércia através dos ábacos dos fabricantes. Nesse trabalho utilizou-se:

- Área: 50,3 cm²
- Massa linear (W_{vs}): 38,8 kg/m
- Inércia – eixo X: 12777 cm⁴
- Inércia – eixo Y: 404 cm⁴

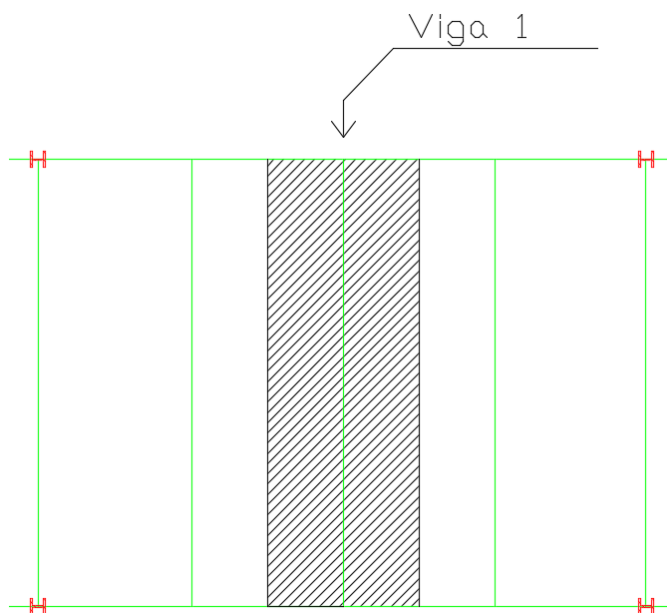
Já o arranjo da estrutura foi dividido com base no catálogo da laje onde determina a distância máxima entre apoios para uma determinada carga. Com isso, as distâncias dentre vigas secundárias, assim como seu comprimento foi:

- Comprimento da viga secundária (L_{CS}): 7,7 metros
- Distância entre as vigas secundárias (S): 2,61 metros

Para a determinação das cargas, foi necessário transformar as unidades de medidas, visto que o programa é alimentado pela unidade (tf/m²) e os cálculos foram com a unidade (kn/m). Dessa maneira, com exceção do peso próprio dos perfis, todas as cargas precisaram ser recalculadas.

Foi determinada a área de atuação das cargas como sendo metade dos vãos - Figura 39 - (ressalta que as vigas de borda têm continuidade na estrutura) e, então, calculada as novas cargas.

Figura 39 – Área de atuação da viga secundária



Fonte: Autor.

Após isso, foi encontrada os novos valores para cada viga, sendo eles:

- Laje: 6,5kn/m
- Piso: 3,12kn/m
- Sobrecarga: 10,4kn/m

4.1.1.2 Viga principal

Sendo o perfil de aço da viga principal W530x82, pode-se obter os valores da área, massa linear e momento de inércia através dos ábacos dos fabricantes. Nesse trabalho utilizou-se:

- Área: 104,5 cm²
- Massa linear (W_{VP}): 82 kg/m
- Inércia – eixo X: 47569 cm⁴
- Inércia – eixo Y: 2028 cm⁴

O comprimento da viga principal (L_{CP}) utilizado foi de 10,50 metros.

4.1.1.3 Resultados

Após as considerações e, seguindo as formulações com base na norma americana (ver item 2.2.1), torna-se possível determinar o deslocamento total do piso ($\delta_{vs} + \delta_{vp}$) e a frequência natural da estrutura.

Tabela 6 – Cálculo da frequência natural pela ANSI/AISC 360-10

CÁLCULO DA FREQUÊNCIA		
Parâmetros	Valores	Unidade
g	9,81	m/s ²
δ_{vs}	0,0012	m
δ_{vp}	0,0031	m
$\delta_{vs} + \delta_{vp}$	0,0043	m
$g / \delta_{vs} + \delta_{vp}$	2259,1056	1/s ²
RAIZ ($g / \delta_{vs} + \delta_{vp}$)	47,53	1/s
f_n	8,5554	Hz

Fonte: Autor.

Já para o cálculo da aceleração relativa, o coeficiente de amortecimento, β , adotado foi de 0,02, de acordo com a classificação por Murray, Allen e Ungar (2003).

Adotou-se, também, 290N como sendo a carga do caminhar, considerada como uma força constante, pois, de acordo com Allen e Murray, a força P pode ser calculada da seguinte maneira:

$$P = 0,83RG \quad (4.1)$$

Onde:

R: fator de redução utilizado 0,5 para estruturas de piso e 0,7 para passarelas. No presente trabalho considerou-se estruturas de piso.

G: peso da pessoa adotado igual a 157lb

Tabela 7 – Cálculo da aceleração relativa pela ANSI/AISC 360-10

CÁLCULO DA ACELERAÇÃO RELATIVA		
Parâmetros	Valores	Unidade
P	290,0000	N
g	9,8100	m/s ²
f _n	8,5554	Hz
β	0,0200	adm.
W	32534,2251	Kn
a/g	0,0223	adm.
a/g(%)	2,2300	adm.

Fonte: Autor.

4.1.2 Metodologia NBR 8800/2008

Quando analisada a norma brasileira NBR 8800/2008, a verificação se dá através de cargas estáticas. Para tal estudo, utilizou-se a verificação do estado limite de serviço juntamente com as combinações frequentes de serviço. Desse modo, considerou-se, como cargas permanentes, a laje e o piso e, como carga variável, a sobrecarga de utilização.

Essa metodologia limita alguns valores de frequências (Tabela 1) com valores máximos de deslocamentos vertical do piso, ocasionado por cargas permanentes e variáveis, desconsiderando as cargas em dependência do tempo t. Alinhado a isso, uma correlação de deslocamentos admissíveis para lajes de piso é citada na presente norma. Se tratando desse modelo e, considerando como vigas de piso, a flecha máxima é $L/350$, sendo L o comprimento do vão (sem considerar vigas em balanço). Com isso, se o vão for grande o suficiente para tal que $L/350$ seja maior que os valores máximos de deslocamento indicados na Tabela 1, faz-se, necessário uma alteração na geométrica da estrutura (aumentar altura do perfil) ou na configuração da estrutura (reduzir o vão). Dessa maneira, a estrutura ganharia rigidez e deslocaria menos.

4.1.2.1 Resultados

Feita as considerações normativas, os deslocamentos da viga secundária (δ_{vs}) e principal - para carga concentrada ($\delta_{vp,c}$) e para carga distribuída ($\delta_{vp,d}$) - foram determinados. Então, somando-se, tem-se o deslocamento total do piso (δ_{total}).

Tabela 8 – Cálculo do deslocamento máximo do piso pela NBR 8800/2008.

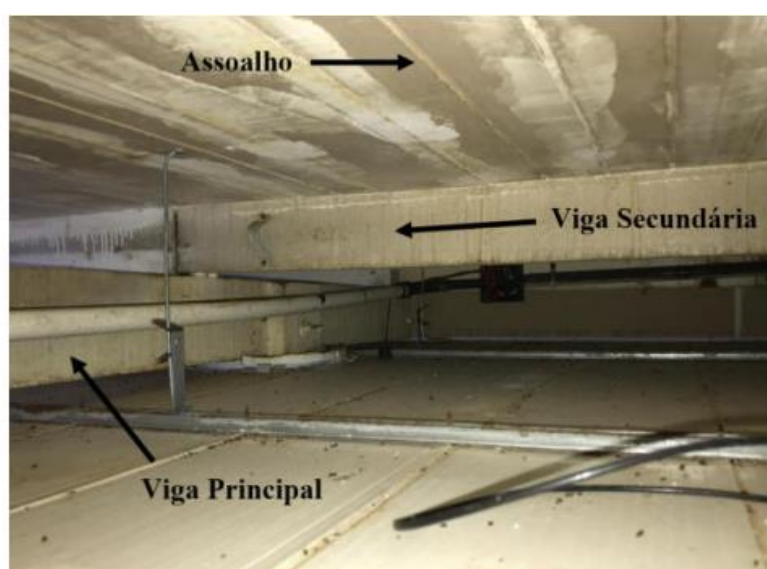
Deslocamentos verticais	
Parâmetros	Valores
δ_{vs}	0,00129
$\delta_{vp,c}$	0,0021
$\delta_{vp,d}$	0,00783
δ_{total}	0,01122

Fonte: Autor.

4.1.3 Análise Dinâmica

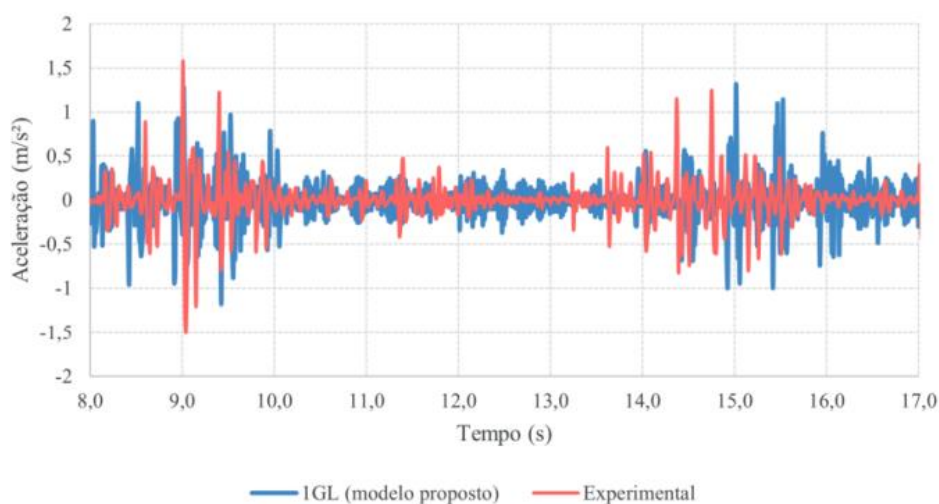
Para o estudo da análise dinâmica utilizou-se o algoritmo tridimensional desenvolvido por Lima e Silva (2022), com atribuições de elementos de barras utilizando o método dos elementos finitos, cuja análise dinâmica simula o caminhar de uma pessoa sobre um piso por meio de um modelo biodinâmico com um grau de liberdade. O algoritmo teve validação teórica-experimental analisando a estrutura de um pavimento em assoalho de madeira, conforme Figura 40, obtendo os resultados de maneira satisfatória, conforme Figura 41.

Figura 40 – Componentes estruturais do trabalho de Lima e Silva (2022).



Fonte: Lima e Silva (2022).

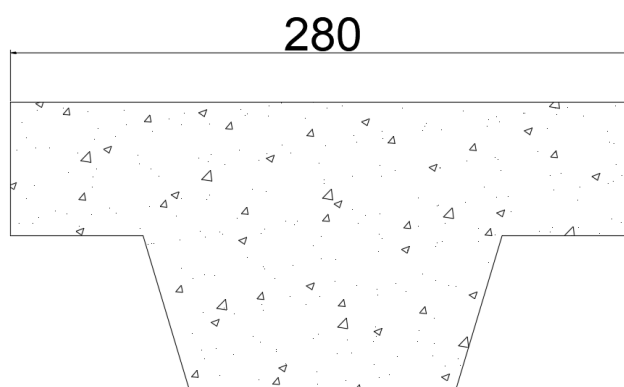
Figura 41 - Respostas dinâmicas de aceleração do objeto de estudo de Lima e Silva (2022): numérica e experimental (modelo biodinâmico).



Fonte: Lima e Silva (2022).

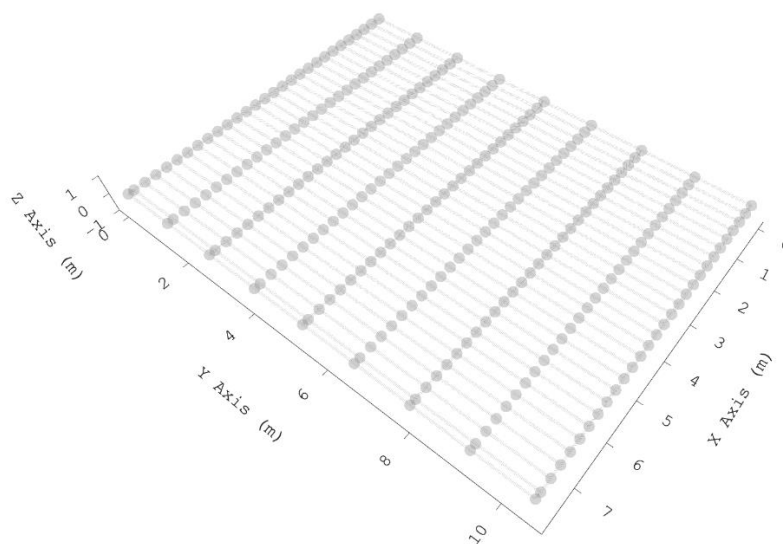
Utilizando a análise dinâmica para o estudo de caso, o modelo foi considerado com elementos de barras. Para as vigas principais e secundárias considerou-se as propriedades das próprias vigas, já para a laje foram consideradas as nervuras do steel deck como elemento de barra, Figura 42. A estrutura foi analisada no vão central do piso (Figura 38). Dividiu-se, na vertical, em 8 partes, separadas por 1,31 metros e, na parte horizontal, em 28 partes separadas por 0,28 metros, como indicado na Figura 43. Com a intersecção das linhas perpendiculares foi possível formar 261 nós (0-260) e 1565 graus de liberdade.

Figura 42 – Seção da laje para transformar em elemento de barra (cota em milímetros)



Fonte: Autor.

Figura 43 – Intersecção das barras, formando os nós (261 nós)



Fonte: Autor.

O software utilizado apresenta como base uma planilha onde são inseridos dados condizentes com o nó de análise e sua posição (em relação ao eixo X,Y e Z); são inseridos também os graus de liberdade em cada nó.

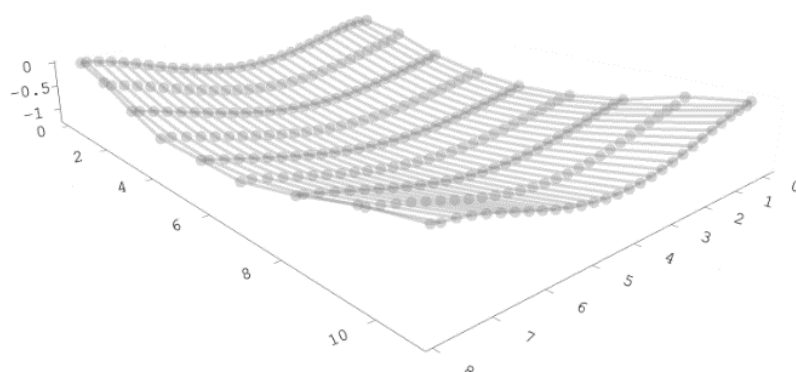
Em uma outra aba dados como número do elemento, nó de início e fim de cada elemento e momento de inércia das seções analisadas também deverão ser informados.

Após o fornecimento dos dados, o executável do programa busca na planilha base as informações e fornece os parâmetros da frequência. Quando finalizado, a análise dinâmica pode ser executada, sem necessidade de preenchimento de dados, fornecendo os parâmetros de deslocamento vertical e aceleração absoluta de pico.

Como parâmetros de entrada para a simulação do caminhar humano na estrutura, foram adotados os valores de taxas de amortecimento para a estrutura e pessoa iguais a 0,01 e 0,2, nessa ordem, a velocidade de passo de uma pessoa igual a 2,25 m/s, a massa e a rigidez da pessoa equivalente a 70 kg e 19,25 kN/m, respectivamente.

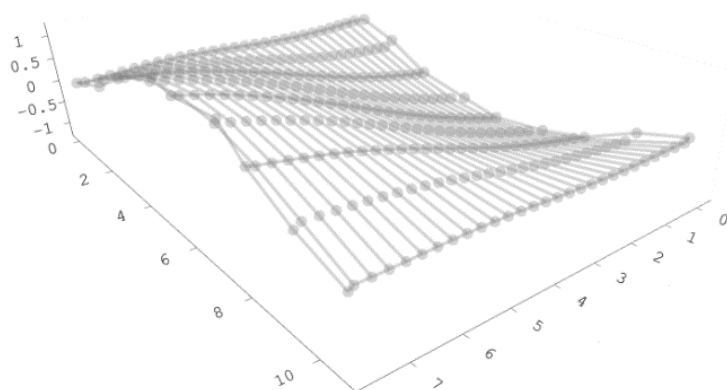
Após as atribuições, o algoritmo forneceu as frequências naturais para o primeiro e segundo modo de vibração, sendo a primeira frequência igual a 8,9 Hz, e a segunda igual a 12,35 Hz.

Figura 44 – 1º modo de vibração



Fonte: Autor.

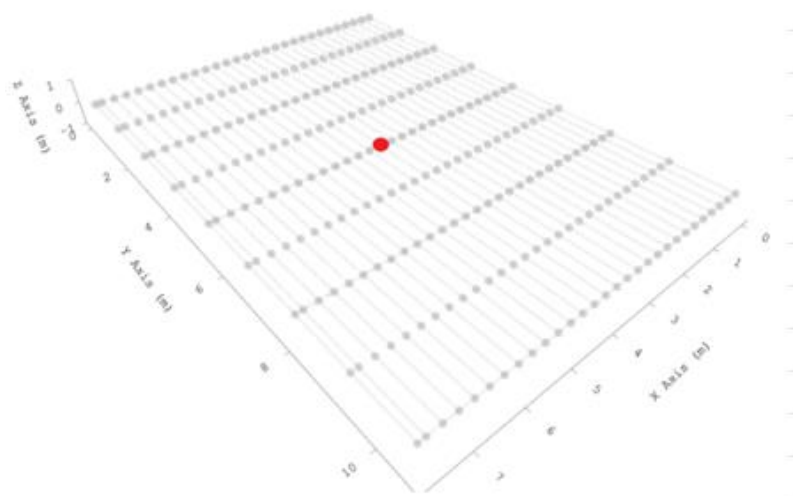
Figura 45 – 2º modo de vibração



Fonte: Autor.

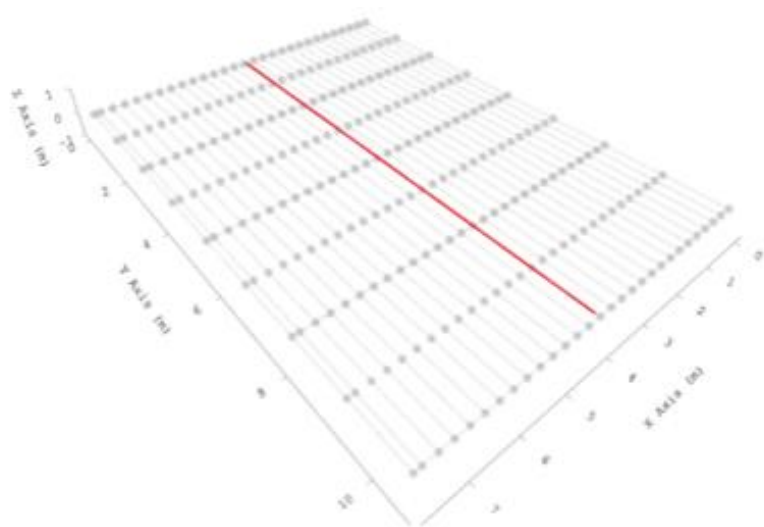
Fazendo a análise dinâmica com interação pessoa-estrutura, considerou-se o trajeto percorrido pela pessoa como mostrado na Figura 47. A linha em vermelho indica o percurso, iniciando na coordenada (3.92;0;0). O nó de análise foi o 130, localizado no meio do vão do piso sobre a viga secundária, indicado na Figura 46.

Figura 46 – Nó de análise na estrutura



Fonte: Autor.

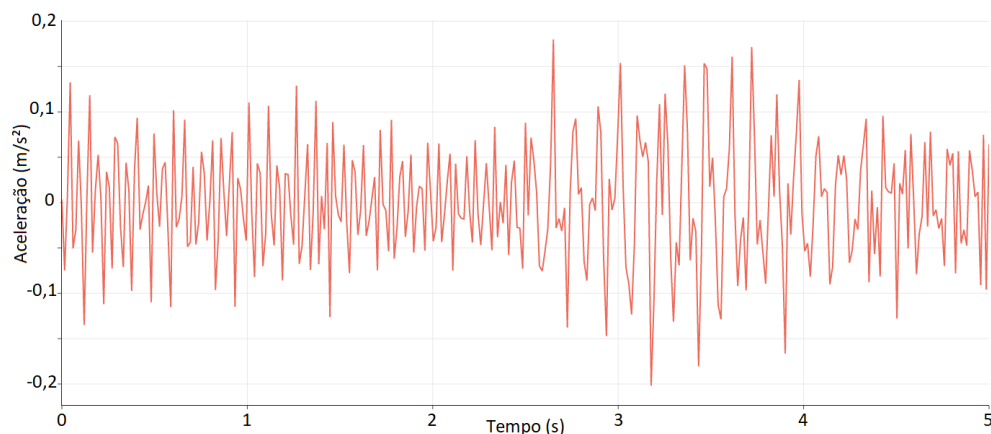
Figura 47 – Trajeto da pessoa



Fonte: Autor.

Através da análise dinâmica, as respostas dinâmicas em termo de aceleração são representadas na Figura 48. Verifica-se que o pico de aceleração foi de $0,02019 \text{ m/s}^2$ ou de $2,019\%$.

Figura 48 – Resposta da aceleração de pico



Fonte: Autor.

4.1.4 Estudo Comparativo

Por fim, nota-se que algumas metodologias prezam métodos de análise que, para outras, não são critérios de avaliação.

De acordo com os resultados obtidos, faz-se necessário uma comparação dos parâmetros encontrados.

Em relação ao deslocamento máximo, além de ser um método avaliativo para a NBR 8800/2008, ela faz limitações aos valores. Já a norma americana ANSI/AISC 360-16, considera o deslocamento, porém não é critério avaliativo para análises dinâmicas.

Na Tabela 9 observa-se os valores obtidos para ambas as normas e para o algoritmo utilizado.

Tabela 9 – Confronto dos deslocamentos máximos do piso

Deslocamentos vertical do piso (mm)			
Metodologia	Valores	Limite de aceitação NBR 8800/2008	Resultado
NBR 8800/2008	11,22	20	APROVADO
ANSI/AISC 360-16	4,34	20	APROVADO
ANÁLISE DINÂMICA	-	20	APROVADO

Fonte: Autor.

Em relação a frequência natural da estrutura, a NBR 8800/2008 apenas impõe valor mínimo para cada região de utilização (conforme Tabela 1) não mencionando nos cálculos.

Ela também determina um valor mínimo para qualquer que seja o local de 3Hz. Esse fato é devido ao harmônico fundamental da caminhada ter uma amplitude consideravelmente maior a dos harmônicos superiores, e fazendo a frequência natural do piso suficientemente alta, a vibração ressonante do piso a partir desse primeiro harmônico é evitada.

Por outro lado, a ANSI/AISC 360-16 especifica o equacionamento, classifica quanto as regiões e insere como critério avaliativo.

Na Tabela 10 observa-se os valores obtidos em relação a frequência.

Tabela 10 – Confronto das frequências naturais

Frequência natural da estrutura (Hz)			
Metodologia	Valores	Limite mínimo de aceitação NBR 8800/2008	Resultado
ANSI/AISC 360-16	8,56	4	APROVADO
ANÁLISE DINÂMICA	8,90	4	APROVADO

Fonte: Autor.

Por último, e não menos importante, a aceleração relativa é comparada entre a norma americana e a análise dinâmica. Utilizou como fator limite de aceleração o valor de 1,50% de acordo com Murray, Allen e Ungar (2003). Utilizou-se, também, o valor relacionado ao ambiente “centros comerciais”.

Tabela 11 – Confronto das acelerações relativas

Aceleração relativa (a/g %)			
Metodologia	Valores	Limite máximo de aceitação ANSI/AISC	Resultado
ANSI/AISC 360-16	2,231%	1,50%	REPROVADO
ANÁLISE DINÂMICA	2,019%	1,50%	REPROVADO

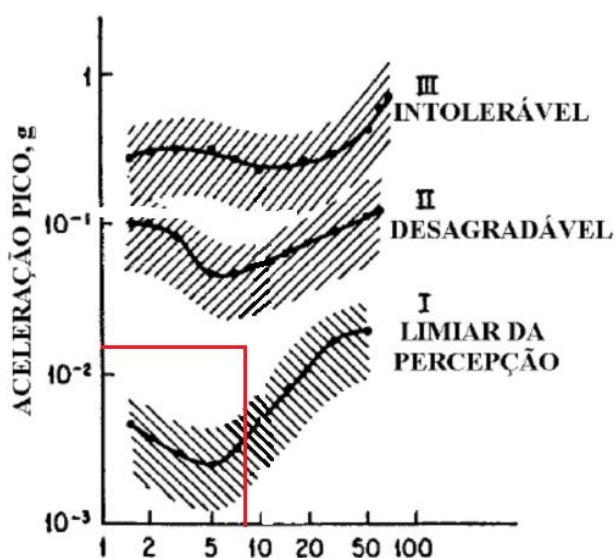
Fonte: Autor.

5. CONCLUSÃO

Para a estrutura em questão, percebe-se uma proximidade entre os resultados encontrados entre a norma ANSI/AISC e a análise dinâmica via MEF, tanto em termos de frequência natural fundamental, quanto de resposta em termos de aceleração. Fato esse evidencia a precisão da norma americana para cargas dinâmicas no modelo de objeto de estudo do presente trabalho.

Embora a metodologia americana e a análise dinâmica tenham mostrado grande proximidade nos valores obtidos, mostra-se que ambas ficaram acima do limiar de percepção humana. De acordo com o ábaco sensorial (Figura 48), verifica-se que a estrutura apresenta aceleração que a classifica entre o limiar da percepção e o desagradável, sendo este o mais próximo.

Figura 49 – Ábaco de resposta subjetiva de pessoas expostas a vibração



Fonte: Varela, 2004.

Com relação à NBR8800/2008, as condições de frequência e deslocamento foram atendidas. Muito embora a frequência natural e o deslocamento apresentem valores distantes dos limites, a resposta de aceleração infere vibrações que podem causar desconforto humano. Vale ressaltar que, no anexo L, a referida norma indica que a avaliação simplificada, realizada por meio de frequência natural e deslocamento, pode não constituir uma solução adequada.

Para trabalhos futuros recomenda-se alterar as configurações geométricas do piso, variando os comprimentos das vigas principal e secundária, e comparar os resultados numéricos com a norma americana. Além disso, pode-se aplicar a comparação em pisos de formato não convencionais. Recomenda-se, também, utilizar a rigidez das ligações em uma análise dinâmica, e avaliar os efeitos em relação às normas utilizadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P.H.V. **Estudo e verificação de ligações metálicas parafusadas e soldadas**. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, 2014.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Steel design guide 11: **Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity**. U.S.A.,2016.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC 360-10: **Specification for structural steel buildings**. U.S.A., June,22,2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro,2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas - procedimento**. Rio de Janeiro,2003.

CUNHA, R. N. **Análise da influência de modelos dinâmicos de caminhar humano na resposta de aceleração em pisos mistos de aço e concreto**. Tese (Mestrado) – UFS, Sergipe, Brasil, 2021.

CUNHA, R. N. **Análise de vibrações em pisos de edifícios formados por estruturas mistas de aço e concreto: uma comparação entre metodologias de cálculo**. Universidade Federal de Sergipe, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROPEAN STANDARD. Eurocode 3: **Design of steel structures**, December 2005.

FILHO.O.T.B; SILVA.A.C.V. **LIGAÇÕES PARA ESTRUTURAS DE AÇO: Guia prático para estruturas com perfis laminados**. 2 ed. São Paulo, 2005.

MELLO. A.V.A.; SILVA. J.G.S.; ANDRADE. S.A.L.; VELALSCO. P.C.G.S.; LIMA. L.R.O. **Estudo do conforto humano em pisos mistos (aço-concreto)**. Revista Escola de Minas. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rem/a/rWFDBJB5ndcFVNpkDmLXzmp/?format=pdf&lang=pt>.
Acesso em: 27 out. 2022.

MENEZES, L.M.R. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados no controle de vibrações em vigas e placas**. Tese (Mestrado) – UFAL, Alagoas, Brasil, 2020.

OLIVEIRA, T.J.L. **Pisos mistos aço-concreto com ligações semi-rígidas sob ação de cargas de gravidade: análise estática não-linear e dinâmica, experimental e numérica**. Tese (Doutorado) – COPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

PRETTI. L.A; FERREIRA. W.G.; CALENZANI. A.F.G. **Vibrações devidas ao caminhar e às atividades aeróbicas: uma verificação teórica**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Disponível em: SciELO - Brasil - Vibrações devidas ao caminhar e às atividades aeróbicas: uma verificação teórica Vibrações devidas ao caminhar e às atividades aeróbicas: uma verificação teórica. Acesso em: 01 nov. 2022.

SILVA, L.P.L. **Análise dinâmica da interação pessoa-estrutura via modelo biodinâmico com função de interação proposta**. Universidade Federal de Sergipe, 2022.

STRAP. Versão 2021. Structural Analysis Program. *Versão cedida pela Equilíbrio Estruturas LTDA*.

ZANONI.T. **Metodologia para a determinação da rigidez de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo não estendida**. Tese (Mestrado). UFP, 2018.

APÊNDICE A

Tabela 12 – Dados para o dimensionamento da ligação

Resistência de cálculo à tração de parafusos ASTM A325, (Kn)			
Diâmetro nominal do parafuso, "d", pol	5/8"	3/4"	7/8"
Área nominal do parafuso, cm ²	1,98	2,85	3,88
Resistência de cálculo, " ϕR_{nt} ", Kn	91,9	132,3	180,1

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Dados para o dimensionamento da ligação

Resistência de cálculo ao cisalhamento simples de um parafuso ASTM A325, (Kn)			
Diâmetro nominal do parafuso, "d", pol	5/8"	3/4"	7/8"
Área nominal do parafuso, cm ²	1,98	2,85	3,88
Resistência de cálculo, " ϕR_{nv} ", Kn	44,6	64,2	87,4

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Dados para o dimensionamento da ligação

Resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre furos padrão (Kn)			
Diâmetro nominal do parafuso, "d", pol	5/8"	3/4"	7/8"
Área nominal do parafuso, cm ²	1,98	2,85	3,88
Resistência de cálculo, " ϕR_{nv} ", Kn	44,6	64,2	87,4

Fonte: Autor.