

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Heliton Weide

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VIGAS DE TRANSIÇÃO SOBRE OS  
EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM GLOBAIS DE TORÇÃO EM  
EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO**

Santa Maria, RS  
2023

**Heliton Weide**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VIGAS DE TRANSIÇÃO SOBRE OS EFEITOS DE  
SEGUNDA ORDEM GLOBAIS DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS ESBELTOS DE  
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS  
2023

**Heliton Weide**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VIGAS DE TRANSIÇÃO SOBRE OS EFEITOS DE  
SEGUNDA ORDEM GLOBAIS DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS ESBELTOS DE  
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

**Aprovado em 13 de fevereiro de 2023:**

---

**André Lübeck (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Alisson Simonetti Milani (UNIPAMPA)**

---

**Eduardo da Luz Sonda (Eng. Civil - UFSM)**

Santa Maria, RS  
2023

## DEDICATÓRIA

*Com imensa gratidão, dedico este trabalho à minha família. A vocês, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigado por serem minha base, por me inspirarem e por serem um exemplo de amor e dedicação.*

## AGRADECIMENTOS

*Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família: minha mãe, Rosemara, meu pai, Lauri, e meu irmão, Marlon, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram incondicionalmente em todas as minhas escolhas. Obrigado por serem minha fonte de amor e motivação, e por me ensinarem o valor da dedicação e do esforço.*

*Gostaria também de agradecer ao meu orientador, André Lübeck, que foi fonte de conhecimento e apoio durante todo o processo de produção deste trabalho. Sua dedicação à educação foi fundamental para a realização deste sonho.*

*Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos que fizeram parte desta jornada, pela amizade, colaboração e incentivos. Juntos, compartilhamos momentos inesquecíveis e crescemos juntos, tornando tudo isso ainda mais especial.*

*Este trabalho é resultado de muito esforço e dedicação, mas também é uma prova de amor e gratidão a todos vocês que tornaram tudo isso possível. Muito obrigado.*

*" A dedicação é o que permite às pessoas alcançarem o que antes parecia impossível."*

*(Steve Jobs)*

## RESUMO

### ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VIGAS DE TRANSIÇÃO SOBRE OS EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM GLOBAIS DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO

AUTOR: Heliton Weide  
ORIENTADOR: André Lübeck

O crescimento populacional, econômico e o avanço tecnológico permitiram a construção de edificações múltiplos pavimentos de elevada altura e esbeltas. Estas edificações, de modo geral, possuem critérios de dimensionamento que exigem maior atenção em relação a sua estabilidade e conforto dos usuários, sendo um destes necessidade da avaliação da torção destes edifícios. A maioria dos arranjos arquitetônicos atuais tem em sua proposta a abertura de grandes vãos, que são comuns em áreas de lazer ou em garagens. Deste modo, é ampliado o uso da solução construtiva da viga de transição sobre as quais nascem pilares que irão atender os pavimentos superiores e que tem em sua característica grandes dimensões e configurações de armadura a fim de resistir aos esforços gerados, comumente de grande magnitude. A verificação dos efeitos globais de segunda ordem, é uma análise importante para garantir a estabilidade e conforto dos usuários. A norma NBR 6118:2014 especifica os métodos de verificação desses efeitos, mas os métodos sugeridos levam em conta apenas deslocamentos translacionais dos pavimentos, o que pode causar problemas na análise dos efeitos causados por deslocamentos rotacionais. Franco (2003) apresentou um método simplificado para análise desses efeitos, levando em conta o coeficiente  $\gamma_{\theta}$ . Neste trabalho, foi avaliada a influência do posicionamento das vigas de transição nos efeitos de segunda ordem globais relacionados à torção de edifícios esbeltos, através do uso do coeficiente  $\gamma_{\theta}$ . Foram analisados 4 modelos de prédios diferentes, todos com 40 pavimentos e altura de 120 metros, mas sendo 2 modelos com geometria regular e 2 modelos com geometria irregular. Um dos modelos de planta regular e um de planta irregular contavam com núcleo rígido (pilares parede). As vigas de transição foram localizadas no primeiro pavimento das edificações, na posição dos pórticos das fachadas, de modo a simular seu uso comum em aberturas. Os resultados indicaram que para a maioria dos modelos que apresentavam plantas regulares tiveram diminuição do valor do coeficiente  $\gamma_{\theta}$  com a disposição de vigas de transição, enquanto para os modelos com plantas irregulares, a utilização da viga de transição causou o aumento do mesmo coeficiente. A análise também indicou que os modelos com núcleo rígido em sua planta tiveram um aumento do valor do coeficiente  $\gamma_{\theta}$  quando posicionadas as vigas de transição.

**Palavras-chave:** *Análise estrutural. Vigas de transição. Efeitos de 2º ordem torcionais.*

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TRANSITION BEAMS ON THE GLOBAL SECOND-ORDER TORSION EFFECTS IN CONCRETE-REINFORCED BUILDINGS

Author: Heliton Weide

Advisor: André Lübeck

Population growth, economic growth, and technological advancements have allowed for the construction of multi-story, high-rise, and slender buildings. These buildings generally have design criteria that require greater attention to stability and user comfort, including the assessment of building torsion. Most current architectural designs feature large openings, common in recreational areas or garages. This increases the use of the transition beam solution, which supports the pillars serving the upper floors and has large dimensions and reinforcement configurations to resist generated forces, often of great magnitude. Verifying global second-order effects is an important analysis to ensure stability and comfort for users. NBR 6118:2014 specifies methods for verifying these effects, but the suggested methods only consider translational floor displacements, which can cause problems in analyzing effects caused by rotational displacements. Franco (2003) presented a simplified method for analyzing these effects, taking into account the  $\gamma\theta$  coefficient. This study evaluated the influence of the positioning of transition beams on the global second-order effects related to the torsion of slender buildings, using the  $\gamma\theta$  coefficient. Four different building models were analyzed, all with 40 floors and a height of 120 meters, with 2 models having regular geometry and 2 models having irregular geometry. One of the regular floor plan models and one of the irregular floor plan models had a rigid core (wall pillars). The transition beams were located on the first floor of the buildings, in the positions of the façade portals, to simulate their common use in openings. The results indicated that for the majority of the models with regular floor plans, the value of the  $\gamma\theta$  coefficient decreased with the arrangement of transition beams, while for the models with irregular floor plans, the use of the transition beam caused an increase in the same coefficient. The analysis also indicated that the models with a rigid core in their floor plan had an increase in the value of the  $\gamma\theta$  coefficient when the transition beams were positioned.

**Keywords:** Structural analysis, Transition beams, Second-order effects.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de efeitos de 1° e 2° ordem .....	17
Figura 2: Posicionamento dos eixos para localização do centro de torção.....	19
Figura 3: Esquema de viga de transição. ....	20
Figura 4: Viga de transição em destaque .....	20
Figura 5: Deformação em vigas de transição.....	22
Figura 6: Diagrama de envoltório de esforços para uma viga de transição no Sistema TQS.....	23
Figura 7: Configuração do multiplicador de inércia no Sistema TQS.....	23
Figura 8: Binários de força .....	24
Figura 9: Deslocamentos causados pela ação dos binários de força .....	25
Figura 10: Definição do centro de torção pelos binários de força.....	25
Figura 11: Modelo M01 .....	29
Figura 12: Modelo M02.....	29
Figura 13: Modelo M03 .....	30
Figura 14: Modelo M04.....	30
Figura 15: Centro de rigidez utilizado no modelo .....	31
Figura 16: Pavimento Tipo M01.....	32
Figura 17: Pavimento Transição M01-VT1 .....	33
Figura 18: Pavimento Transição M01-VT2.....	34
Figura 19: Pavimento Tipo M02.....	35
Figura 20: Pavimento Transição M02-VT1.....	36
Figura 21: Pavimento Transição M02-VT2.....	37
Figura 22: Pavimento Tipo M03.....	38
Figura 23: Pavimento Transição M03-VT1 .....	39
Figura 24: Pavimento Transição M03-VT2.....	40
Figura 25: Pavimento Tipo M04.....	41
Figura 26: Pavimento Transição M04-VT1 .....	42
Figura 27: Pavimento Transição M04-VT2.....	43
Figura 28: Extração de esforços pelo Sistema TQS .....	45
Figura 29: Resultados do coeficiente $\gamma_\theta$ para o Modelo M01 .....	49
Figura 30: Centro de torção M01 – Sonda (2023).....	50

Figura 31: Centro de torção M01-VT1 .....	51
Figura 32: Centro de torção M01-VT2 .....	52
Figura 33: Resultados do coeficiente $\gamma_\theta$ para o Modelo M02.....	53
Figura 34: Centro de torção M02 – Sonda (2023).....	54
Figura 35: Centro de torção M02-VT1 .....	54
Figura 36: Centro de torção M02-VT2 .....	55
Figura 37: Resultados do coeficiente $\gamma_\theta$ para o Modelo M03.....	56
Figura 38: Centro de torção M03 – Sonda (2023).....	57
Figura 39: Centro de torção M03-VT1 .....	57
Figura 40: Centro de torção M03-VT2 .....	58
Figura 41: Resultados do coeficiente $\gamma_\theta$ para o Modelo M04.....	59
Figura 42: Centro de torção M04 – Sonda (2023).....	60
Figura 43: Centro de torção M04-VT1 .....	60
Figura 44: Centro de torção M04-VT2 .....	61

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Análise do modelo M01-VT1 .....	47
Tabela 2: Comparativo entre modelos de plantas regulares .....	61
Tabela 3: Comparativo entre modelos de plantas irregulares.....	62
Tabela 4: Comparativo entre modelos de plantas com núcleo rígido.....	62

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.1.2 OBJETIVOS .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1.1 EFEITOS DE 1° E 2° ORDEM .....	16
2.1.2 COEFICIENTE $\gamma\theta$ .....	17
2.1.3 CENTRO DE TORÇÃO DE UM EDIFÍCIO .....	18
2.1.4 VIGAS DE TRANSIÇÃO .....	19
2.1.5 TRATAMENTO ESPECIAL PARA VIGAS DE TRANSIÇÃO NO CAD/TQS .....	21
2.1.6 CÁLCULO DE CENTRO DE TORÇÃO.....	24
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
3.1.1 MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES.....	28
3.1.2 PAVIMENTO DE TRANSIÇÃO .....	31
3.1.3 NÚCLEO RÍGIDO .....	31
3.1.4 MODELOS COM GEOMETRIA REGULAR.....	32
3.1.5 PAVIMENTO TIPO M01.....	32
3.1.5.1 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M01-VT1.....	33
3.1.5.2 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M01-VT2.....	34
3.1.6 PAVIMENTO TIPO M02.....	35
3.1.6.1 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M02-VT1.....	36
3.1.6.2 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M02-VT2.....	37
3.1.7 MODELOS COM GEOMETRIA IRREGULAR.....	38
3.1.8 PAVIMENTO TIPO M03.....	38
3.1.9 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M03-VT1 .....	39
3.1.10 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M03-VT2.....	40
3.1.11 PAVIMENTO TIPO M04 .....	41
3.1.12 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M04-VT1 .....	42
3.1.13 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M04-VT2.....	43
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>44</b>
4.1.1 CÁLCULO DO COEFICIENTE PELO $\gamma\theta$ PELO CAD/TQS.....	44
4.1.2 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANALISADOS.....	48
4.1.3 MODELO M01 .....	48
4.1.4 MODELO M02 .....	52
4.1.1 MODELO M03 .....	55
4.1.2 MODELO M04 .....	58
4.1.3 ANÁLISE ENTRE MODELOS DE PLANTAS REGULARES .....	61
4.1.4 ANÁLISE ENTRE MODELOS DE PLANTAS IRREGULARES .....	62
4.1.5 ANÁLISE ENTRE MODELOS ENTRE PLANTAS COM NÚCLEO RÍGIDO .....	62
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>63</b>
5.1.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	64
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de verticalização das cidades, com a construção de prédios cada vez mais altos, é um fenômeno global que está diretamente ligado ao aumento populacional em torno dos grandes centros urbanos nas últimas décadas. Em razão desse processo de urbanização, para atender a demanda de espaço, os edifícios altos e esbeltos tem sido cada vez mais objeto de interesse do mercado da construção civil. Concomitantemente a essa demanda, houve aperfeiçoamento de métodos construtivos, materiais utilizados, softwares de cálculo e análise estrutural, além da mudança nos aspectos arquitetônicos relativos à grandes edificações.

Em relação a critérios de projeto, tem-se que a concepção de uma estrutura esbelta requer uma análise de projeto mais aprimorada, principalmente quando são levados em conta os efeitos de cargas de vento e desaprumo. Deste modo, durante a análise estrutural de um edifício alto, é necessária uma atenção maior em relação aos esforços horizontais que influenciam na estabilidade global da edificação, principalmente pelos efeitos de segunda ordem, que são esforços decorrentes da ação conjunta de forças horizontais e verticais.

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 define métodos de cálculo para a análise de efeitos de segunda ordem em estruturas, seja de forma simplificada, como o coeficiente  $\gamma_z$ , ou de maneira iterativa e refinada, a partir do processo P- $\Delta$ . Neste sentido, é importante salientar que estes processos levam em consideração apenas os deslocamentos translacionais, isto é, causados pela flexão global que a estrutura pode sofrer sob esforços laterais, o que pode não ser suficiente, tendo em vista que existem fatores que podem influenciar ou causar movimentos de rotação, como a incidência forças de ventos oblíquos, vizinhança e assimetrias em relação ao centro de gravidade da estrutura global da edificação.

Desta maneira, Franco (2003) também responsável, junto com Vasconcelos (1991), por ser um dos criadores do estudo acerca do coeficiente  $\gamma_z$ , apresentou o estudo do coeficiente  $\gamma_\theta$  para suprir a carência relativa à análise dos deslocamentos rotacionais nos efeitos globais de segunda ordem. Para o cálculo deste coeficiente, são avaliados fatores como a posição do centro de gravidade global da estrutura ou centro de torção, em conjunto com forças genéricas para o cálculo do ângulo de rotação causado no prédio e posteriormente o deslocamento global da estrutura.

Ademais, a popularização das habitações verticais também trouxe mudanças nas concepções arquitetônicas, não apenas esteticamente, no que diz respeito ao aumento dos vãos livres, mas também em termos de usabilidade, como em garagens. Deste modo, para possibilitar maiores vãos nos espaços de uso, é usual a mudança na disposição dos pilares, entretanto,

quando esta não é possível, é feita a solução pela utilização de vigas de transição, que são caracterizadas como vigas que tem função de transmitir os esforços de um pilar para os apoios mais próximos. Estas vigas, normalmente, costumam ter maiores dimensões e alta taxa de armadura, sendo, portanto, elementos de alto custo no projeto estrutural de um edifício.

Neste contexto, este trabalho busca avaliar a influência do dimensionamento das vigas de transição nos deslocamentos rotacionais causados por efeitos globais de segunda ordem, pela obtenção do coeficiente  $\gamma_\theta$ , em prédios altos e esbeltos de concreto armado, com a auxílio de simulações computacionais pelo software CAD/TQS, utilizando o método de Franco (2003).

### 1.1.1 JUSTIFICATIVA

A verificação dos efeitos globais de segunda ordem, isto é, a análise de equilíbrio da estrutura levando em conta seu estado já deformado, é especificada pela NBR 6118:2014 através de métodos que levam em consideração apenas deslocamentos translacionais dos pavimentos, havendo assim, uma carência de metodologia confiável e bem difundida para análise dos efeitos causados por deslocamentos rotacionais.

Existem alguns softwares de análise estrutural, como o SAP2000 e o ETABS, que já têm ferramentas para realizar análises de segunda ordem, incluindo o cálculo de deslocamentos rotacionais, mas não de coeficientes de segunda ordem, como o  $\gamma_\theta$ . Já outros softwares que utilizam análise por elementos finitos e são utilizados na análise estrutural, como o ANSYS e ABAQUS, também possuem a capacidade de realizar análises de segunda ordem, sendo esta, geralmente, uma funcionalidade que pode ser obtida com a utilização de um plug-in adicional ou extensão.

Sendo o cálculo do coeficiente  $\gamma_\theta$  realizado por cálculos relativamente simples, a facilidade de implementá-lo está bastante relacionada pelo conjunto de ferramentas que o software possui em seu sistema. Outros fatores como a complexidade do projeto estrutural e nível de conhecimento e habilidade do usuário com o software podem ser determinantes para a implementação deste coeficiente em análises estruturais.

Neste sentido, Franco (2003), apresentou um método simplificado para análise de efeitos de segunda ordem referentes aos deslocamentos rotacionais pela determinação do coeficiente  $\gamma_\theta$ . Este trabalho busca avaliar a influência do dimensionamento das vigas de transição nos efeitos de segunda ordem globais relacionados à torção de edifícios esbeltos, pela utilização do coeficiente  $\gamma_\theta$ .

## 1.1.2 OBJETIVOS

### 1.1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo avaliar, através de simulações, a influência da presença de vigas de transição nos efeitos de torção de segunda ordem para prédios esbeltos de concreto armado.

### 1.1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os efeitos de torção de segunda ordem para diferentes disposições de vigas de transição;
- Avaliar a influência da presença de vigas de transição para diferentes geometrias de edificação sobre os efeitos de torção.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No desenvolvimento de um projeto estrutural, normalmente se dá maior atenção para o dimensionamento de elementos como lajes, vigas, e pilares, onde há o cuidado para que as condições prescritas em norma sejam atendidas para cada elemento, de forma localizada. Entretanto, é necessário que estes elementos atendam, também, critérios de dimensionamento quanto ao comportamento da estrutura como um todo, ou seja, quando o conjunto de elementos estiver ligado e recebendo cargas.

No projeto de edifícios esbeltos, normalmente a estabilização horizontal é o fator que se tem maior atenção durante a análise estrutural, sem comprometer aspectos arquitetônicos, econômicos e de segurança dos usuários.

De acordo com Vieira (2017), a ação do vento provoca grande efeitos em edifícios mais altos e esbeltos, de modo que quando a carga de vento é aplicada simultaneamente com as demais ações atuantes na estrutura são produzidos esforços adicionais. Ainda, Lacerda (2014) afirma que uma análise de estabilidade realizada de forma inadequada pode desconsiderar esforços horizontais de grande magnitude, que podem causar um aumento significativo nos esforços de segunda ordem da estrutura.

Deste modo, tem-se a análise de estabilidade global como de suma importância para garantir parâmetros não só de segurança, mas também de conforto ao usuário, devendo ser um parâmetro de atenção durante o dimensionamento da edificação.

### 2.1.1 EFEITOS DE 1º E 2º ORDEM

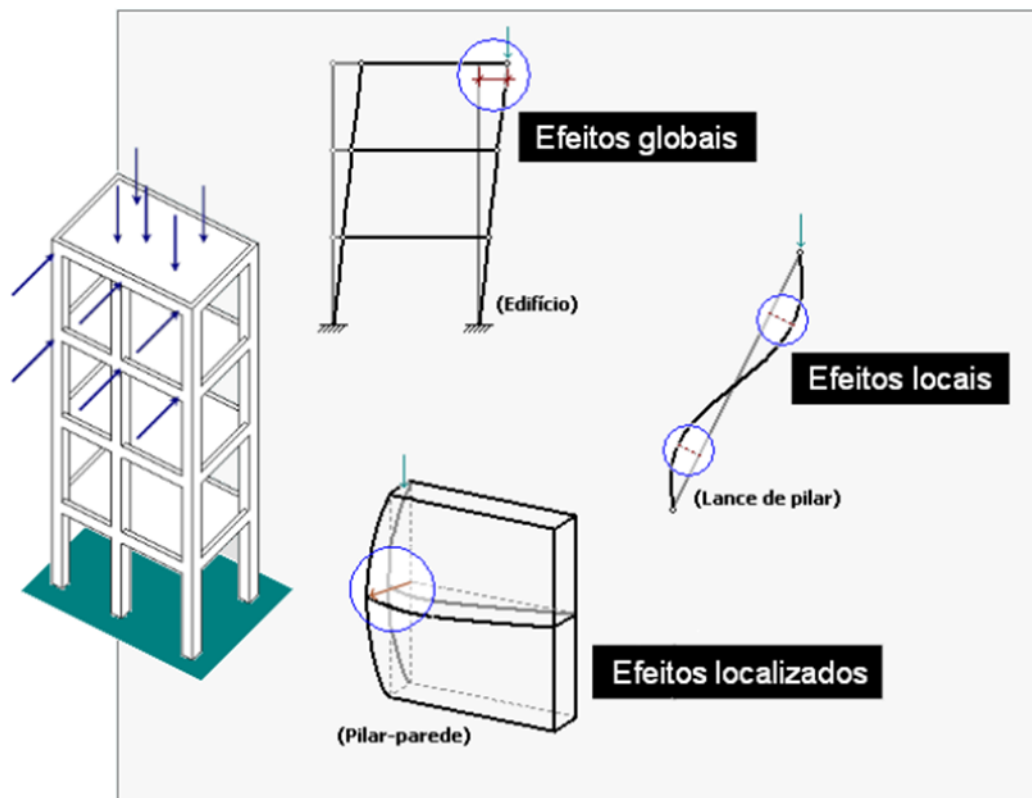
Os efeitos de primeira ordem em prédios de concreto armado referem-se às forças estáticas, como o peso do próprio edifício e cargas externas, como vento (uma ação dinâmica normalmente aplicada como estática) e cargas de uso aplicados na estrutura indeformada. O estudo desses efeitos é crucial para garantir parâmetros de resistência da estrutura e sua capacidade de suportar as cargas aplicadas, bem como a segurança da estrutura.

Enquanto isso, os efeitos de segunda ordem estão relacionados com as alterações na estrutura já deformada, por conta de esforços de flexão, torção e vibração. Estes efeitos afetam a estabilidade e o comportamento dinâmico do edifício, podendo causar problemas como fissuras, deslocamentos irregulares e instabilidade. Eles são geralmente medidos em termos de deslocamentos irregulares, curvaturas, vibrações e fissuração.



A norma NBR 6118:2014 divide os efeitos de segunda ordem presentes em uma estrutura de concreto em três categorias diferentes. Estes incluem os efeitos globais de segunda ordem, os efeitos locais de segunda ordem e os efeitos localizados de segunda ordem. Essa classificação é descrita no item 15.4.1 da norma. A Figura 1 indica as diferentes classificações para efeitos de segunda ordem.

Figura 1: Tipos de efeitos de 1° e 2° ordem



Fonte: Kimura (2008)

### 2.1.2 COEFICIENTE $\gamma_\theta$

A análise dos esforços de segunda ordem, como a realizada pelo coeficiente  $\gamma_z$ , considera, principalmente, os potenciais deslocamentos translacionais pela flexão da edificação. Entretanto, Wight e Macgregor (2012, p. 991) afirmam que a estrutura está sujeita a deslocamentos de rotação, causados pela incidência de força horizontais assimétricas e, também, pelo desalinhamento entre o centro de massa e rigidez da estrutura. Neste sentido, o coeficiente  $\gamma_\theta$  foi apresentado no estudo de Franco (2003), e busca atender os deslocamentos rotacionais que não são atendidos pelo  $\gamma_z$ .

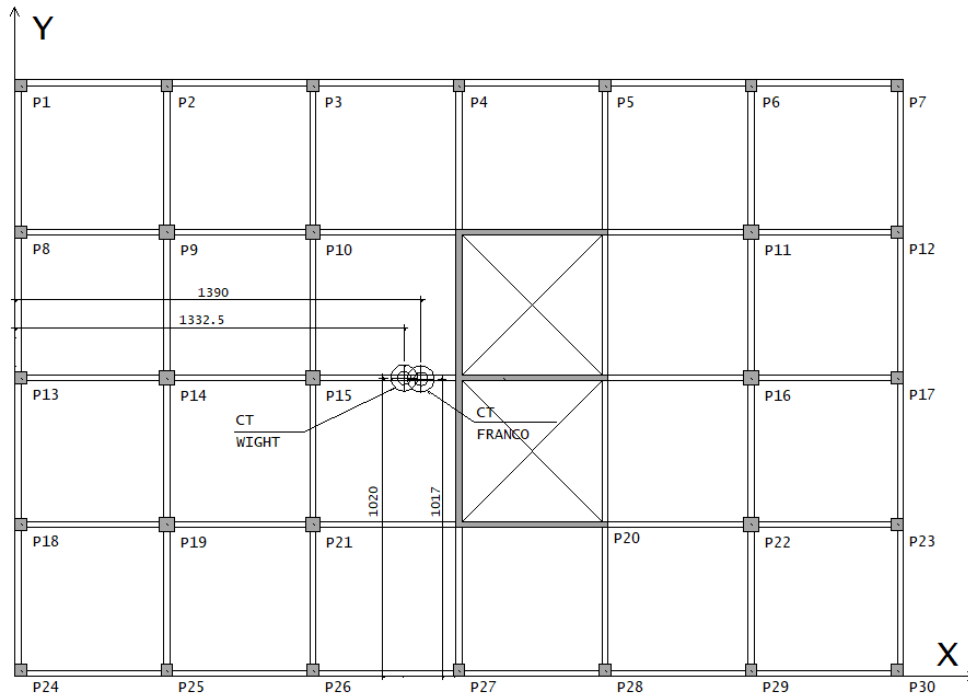
O coeficiente  $\gamma_\theta$  é uma medida utilizada para avaliar o impacto da torção em uma estrutura, é semelhante ao coeficiente  $\gamma_z$ , mas é voltado para considerar os efeitos de segunda ordem decorrentes da rotação do edifício em planta. Ele considera a relação entre a rotação na primeira ordem da estrutura e a rotação final a que ela está submetida, sendo assim ele é um indicador da magnitude da rotação na análise final de segunda ordem

### 2.1.3 CENTRO DE TORÇÃO DE UM EDIFÍCIO

O cálculo para a determinação do centro de torção (CT), ou rotação, da edificação é a primeira etapa do cálculo do  $\gamma_\theta$ , podendo ser definido como um ponto onde seria aplicada uma força em sentido de giro e os esforços de rotação resultariam nulos, sendo gerados unicamente movimentos de translação na estrutura. Para casos em que a edificação tenha uma geometria aproximadamente regular, Franco (2003) considera a utilização de um eixo médio de torção ao longo de sua altura para que, ao aplicar um esforço genérico horizontal, este possa ser decomposto em dois carregamentos  $F_x$ ,  $F_y$  e o esforço  $M_z$ .

Andrade (2020) salienta que, normalmente, a determinação do centro de torção dos pavimentos não é imediata, pois o eixo de simetria pode não coincidir com o centro de torção para prédios com geometria assimétrica, assim, o centro de torção precisa ser determinado. A Figura 2 indica o posicionamento do centro de torção em planta para os métodos de Wight (2016) e Franco (2003), abordados no estudo de Sonda (2023).

Figura 2: Posicionamento dos eixos para localização do centro de torção.



Fonte: Sonda (2023)

Neste sentido, há contribuições nos trabalhos de Wight e Macgregor (2012, p. 991) e Gustafsson e Hehir (2005, p.99) para encontrar a posição do CT, mas estas levam em consideração outros fatores como posicionamento de contraventamentos e rigidez de pilares parede, ademais, não há conhecimento sobre softwares que realizem automaticamente o cálculo desse ponto de forma automatizada.

O método de cálculo para a localização do CT apresentado por Franco (2003) consiste na interpretação de deslocamentos obtidos por uma análise computacional, para posteriormente, obter as coordenadas do centro de torção. Assim, se aplicado um carregamento que provoque apenas torção, e não movimentos de translação, podem ser obtidos os giros para determinados pilares em análise e obter a rotação do pavimento por métodos algébricos.

#### 2.1.4 VIGAS DE TRANSIÇÃO

A NBR 6118:2014 no item 14.4.1 define os elementos de vigas como, “elementos lineares onde a flexão é preponderante”. De acordo com Bastos (2017), os elementos lineares, também denominados como “barra”, podem ser definidos como aqueles os quais o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal.

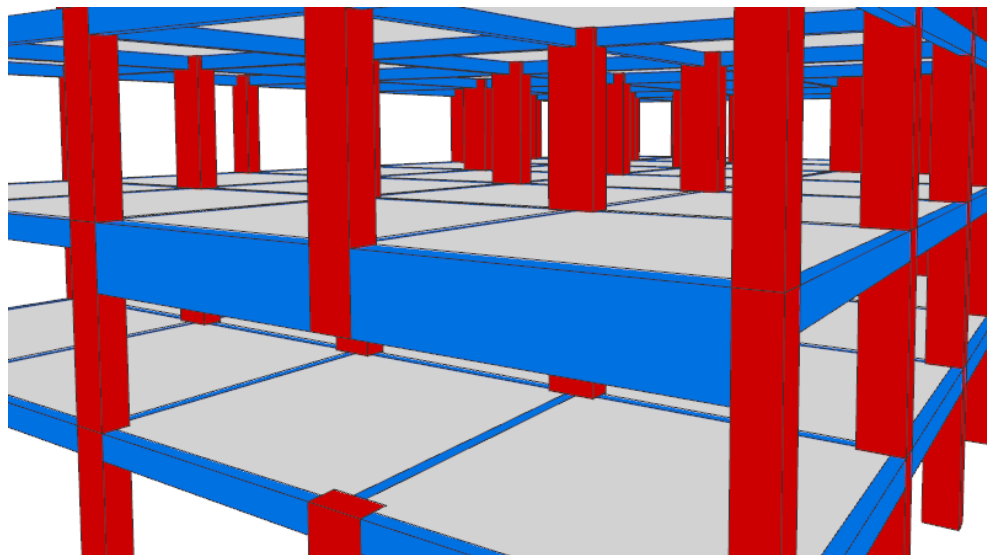
A viga de transição é uma solução estrutural que recebe a carga de um pilar superior e transfere esta carga para o apoio mais próximo. Assim, vale ressaltar que popularização de modelos arquitetônicos mais arrojados e com vãos maiores, aliada ao aumento da demanda por vagas de estacionamento em edificações, em razão do crescente aumento do número de automóveis por família nos últimos anos, consolidou a utilização das vigas de transição em projetos estruturais. As Figuras 3 e 4 apresentam exemplos de viga de transição.

Figura 3: Esquema de viga de transição.



Fonte: Rabelo (2012)

Figura 4: Viga de transição em destaque



Fonte: Autor (2023)

De acordo com Ching, Onouye e Zuberbuhler (2015), quando há o desvio de percurso de uma carga vertical, é necessário que esta carga seja redirecionada horizontalmente, por uma estrutura até os apoios verticais mais próximos, podendo ser uma viga ou treliça de transição.

Neste sentido, em decorrência do acúmulo de esforços causados na estrutura de transição horizontal, normalmente estes elementos possuem seções transversais robustas.

Longo (2019) salienta que além de serem vigas extremamente carregadas em aço, tem em sua característica uma grande altura, e, portanto, podem causar interferências para com o pé direito definido no projeto arquitetônico, sendo desta forma, elementos que precisam ser evitados.

As vigas de transição são elementos altamente rígidos e com grande influência na distribuição de esforços ao longo dos pavimentos de uma edificação, sendo seu posicionamento um fator que pode afetar a estabilidade global da edificação. Para tanto, Koerich (2015) afirma que é recomendável estabelecer o posicionamento de pilares semelhantes para todos os andares, evitando o emprego de elementos de transição, pois eles têm um efeito significativo na estabilidade geral da estrutura.

Ademais, Casotti (2020) destaca que as vigas de transição geram uma concentração de cargas nos pilares de apoio e sua transição afeta a rigidez horizontal do prédio, o que tem implicações tanto na estabilidade geral do edifício quanto nos deslocamentos horizontais máximos da estrutura.

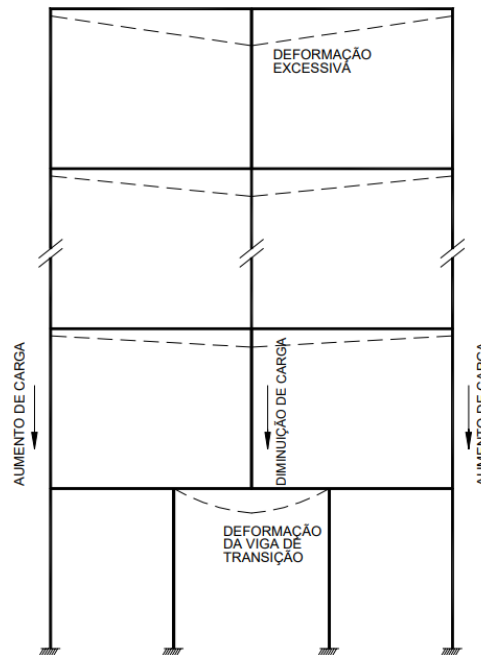
Desta forma, quando a viga de transição é modelada em um software de cálculo estrutural, de modo geral, são utilizados multiplicadores de inércia. O multiplicador de inércia à flexão das vigas de transição é um fator utilizado para simular a redução do deslocamento final dessas vigas e, conseqüentemente, aumentar o momento fletor solicitante nos elementos de suporte nos pavimentos superiores. Isso se deve ao fato de que as vigas de transição são geralmente projetadas para serem indeformáveis, já que qualquer deslocamento nessas vigas afeta o deslocamento de um pilar. O uso do multiplicador de inércia à flexão das vigas de transição é uma técnica utilizada como artifício para simular a rigidez dessas vigas, e será abordado na seção 2.1.5.

#### 2.1.5 TRATAMENTO ESPECIAL PARA VIGAS DE TRANSIÇÃO NO CAD/TQS

A análise de vigas de transição no âmbito dos softwares computacionais, de modo geral, possui peculiaridades em relação a considerações de rigidez. Wordell (2003) explica que quando a viga de transição é considerada como uma viga flexível, a deformação é muito grande e o pórtico redistribui os carregamentos, resultando em menor carga suportada pela viga de transição e redução dos momentos negativos nas vigas nesse apoio ao longo da altura da estrutura. Desta forma, uma solução para este problema é aumentar a rigidez da viga de

transição através de um multiplicador maior do que 1,0 na inércia da viga. Conseqüentemente, ao analisar o pórtico com a viga de transição com sua rigidez aumentada, a deformação é menor e se aproxima mais do processo real da construção. A Figura 5 exemplifica a deformação em vigas de transição.

Figura 5: Deformação em vigas de transição

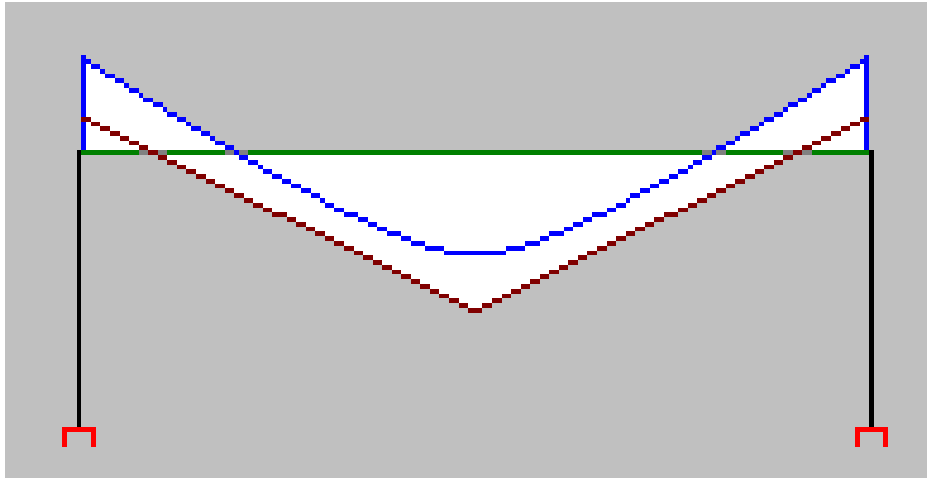


Fonte: Wordell (2003)

O algoritmo do modelador estrutural do sistema TQS, em modo padrão, define que quando uma viga recebe um pilar nascendo, esta é automaticamente considerada pelo algoritmo como uma viga de transição. Durante este processo, é importante salientar que o modelo de pórtico do sistema TQS realiza um tratamento especial para as vigas de transição. O cálculo da inércia à flexão da viga será calculado a partir da geometria da seção e sua rigidez é aumentada por um multiplicador de inércia à flexão. Esse tratamento deve-se a influência que esses elementos têm sobre a distribuição de esforços nos pavimentos suportados quando se faz uma análise monotônica global, sem a consideração do faseamento construtivo.

Deste modo, tem-se que o sistema TQS realiza um tratamento diferenciado para as vigas de transição, criando uma envoltória de esforços para a seção da viga enrijecida e também para a viga com seção normal, de modo que para estas duas, não sejam transferidos os esforços para os pilares mais próximos. A Figura 6 indica a envoltória de esforços realizado pela consideração das duas seções.

Figura 6: Diagrama de envoltório de esforços para uma viga de transição no Sistema TQS

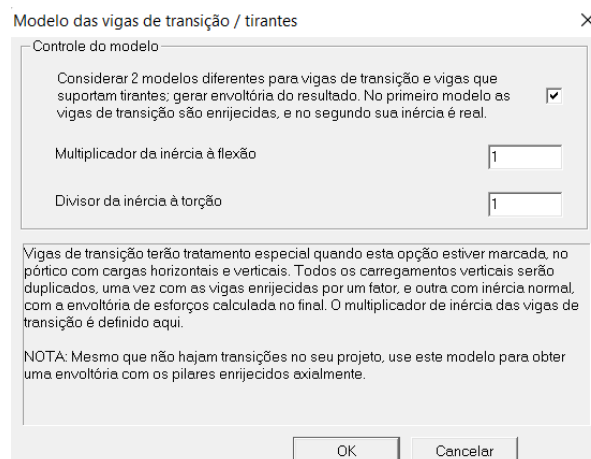


Fonte: TQS (2020)

O diagrama em vermelho trata-se da consideração de esforços pela viga com inércia multiplicada, enquanto o diagrama em azul trata-se do pórtico referente à viga com inércia normal. Este tratamento é realizado para garantir que o dimensionamento da viga de transição atenda todas as condições de contorno, pois para a situação de seção de rigidez aumentada possui os maiores momentos fletores positivos, enquanto a seção normal possui os maiores momentos negativos possíveis.

Para o presente trabalho, a fim de representar com maior grandeza os esforços de torção provenientes da ação dos binários indicados, preferiu-se por configurar o multiplicador de inércia à flexão para o valor de 1, de modo que não seja realizada o aumento da inércia para as vigas de transição. Para isto, foi definido nos Dados do edifício>Modelo>Viga de transição/Tirante, assim como segue na Figura 7.

Figura 7: Configuração do multiplicador de inércia no Sistema TQS.

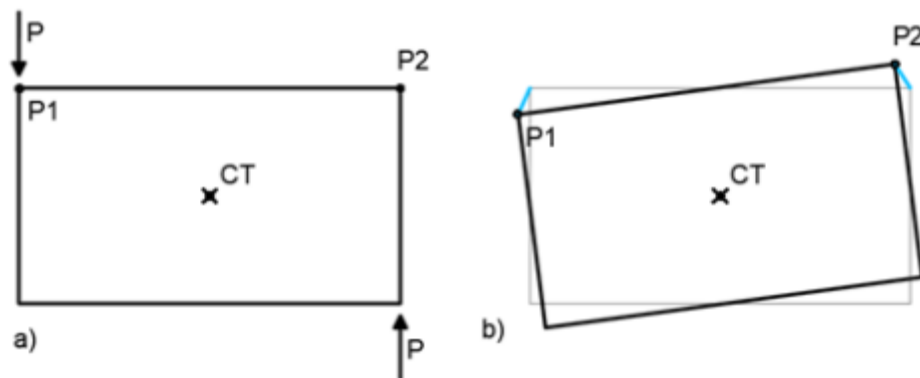


Fonte: Autor (2023)

### 2.1.6 CÁLCULO DE CENTRO DE TORÇÃO

A localização do centro de torção pode ser feita a partir da interpretação de deslocamentos obtidos por simulações computacionais. Para tanto, torna-se necessário que os deslocamentos causados na estrutura sejam unicamente de torção, para proporcionar o correto movimento de torção, sem translações de pavimentos. Para isto, Andrade (2020) indica que podem ser utilizadas duas cargas genéricas P1 e P2, de modo a gerar um binário de forças que provoque o giro do pavimento e, posteriormente, sejam possíveis as demais análises por este deslocamento. A Figura 8 apresenta os binários de força para gerar o efeito de torção no prédio.

Figura 8: Binários de força

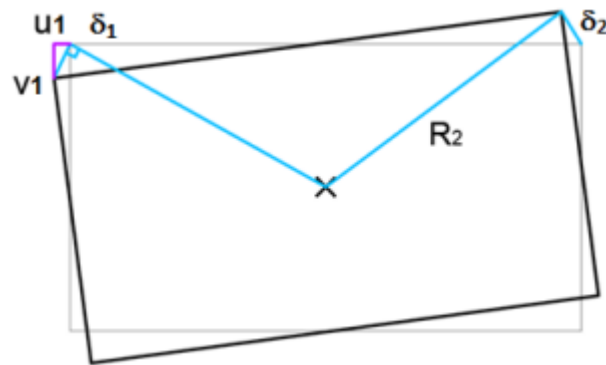


Fonte: Andrade (2020)

Posterior a simulação da ação dos binários causar o deslocamento de torção no pavimento, é necessário obter os deslocamentos horizontais e verticais nos pontos onde ocorreu o deslocamento, sendo “u” os deslocamentos horizontais e “v” os deslocamentos verticais. Ainda, Andrade (2020) salienta que sendo rotações de ordem muito pequena, pode-se supor que o deslocamento  $\delta$  até um ponto P escolhido é perpendicular ao raio que liga a posição original do pavimento até o centro de torção. A Figura 9 apresenta a indicação dos deslocamentos u e v e o centro de torção a partir dos deslocamentos  $\delta_1$  e  $\delta_2$ .



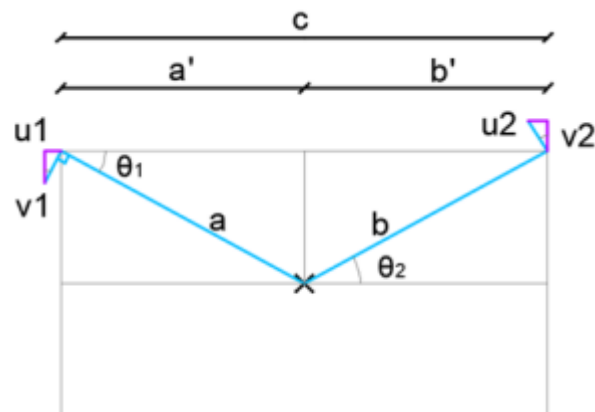
Figura 9: Deslocamentos causados pela ação dos binários de força



Fonte: Andrade (2020)

Com a análise dos pontos, P1 e P2, chega-se nos deslocamentos horizontais e verticais ( $u_i$ ,  $v_i$ ), os quais são necessários para a obtenção do ângulo  $\theta_i = \arctg(u_i/v_i)$ , que é necessário para encontrar os raios “a” e “b”, que ligam perpendicularmente o CT até o deslocamento causado. A Figura 10 apresenta a representação os parâmetros citados, além da medida “c”, que corresponde a distância entre eixo dos pilares analisados, e as distâncias a’ e b’, que são as projeções dos raios a e b, necessários para encontrar o CT do pavimento.

Figura 10: Definição do centro de torção pelos binários de força



Fonte: Andrade (2020)

Para a obtenção dos valores e a e b pode ser realizada, para o exemplo, pelas Equações 1 e 2, sendo:

$$a \cdot \text{sen}\theta_1 = b \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (1)$$

$$a \cdot \text{cos}\theta_1 = a', \quad b \cdot \text{cos}\theta_2 = b' \quad (2)$$

$$c = a' + b' = a \cdot \cos\theta_1 + b \cdot \cos\theta_2 \quad (3)$$

Assim, pela Equação 1, pode se obter:

$$b = \frac{a \cdot \operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} \quad (4)$$

Posteriormente, faz-se a substituição da Equação 4 na Equação 3, tendo, então:

$$c = a \cdot \cos\theta_1 + \left(\frac{a \cdot \operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}\right) b \cdot \cos\theta_2 \quad (5)$$

$$c \cdot \operatorname{sen}\theta_2 = a \cdot \cos\theta_1 \cdot \operatorname{sen}\theta_2 + a \cdot \operatorname{sen}\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \quad (6)$$

$$a = \frac{c \cdot \operatorname{sen}\theta_2}{\cos\theta_1 \cdot \operatorname{sen}\theta_2 + \operatorname{sen}\theta_1 \cdot \cos\theta_2} = \frac{c \cdot \operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2)} \quad (7)$$

Deste modo, é possível definir o valor de “a” para o ponto fictício P1. Andrade (2020) reforça que este é um método aproximado, pois leva em conta a perpendicularidade do raio até do CT aos pontos deslocados analisados.

Após obter as coordenadas do CT, é possível calcular o coeficiente  $\gamma_\theta$  para avaliar a instabilidade a torção da estrutura. O trabalho de Franco (2003) apresenta a Equação 8 para o cálculo deste coeficiente.

$$\gamma_\theta = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_t}{M_{t,I}}} \quad (8)$$

Sendo:

$M_{t,I}$  = Momento total de 1ª ordem devido à torção;

O acréscimo do momento de torção de 1ª ordem devido aos deslocamentos, dado por  $\Delta M_t$  é calculado pela Equação 9:

$$\Delta M_t = \frac{P \cdot R^2 \cdot \theta_{I,N}}{H} \quad (9)$$

Sendo:

P = carga vertical total do edifício;

R = raio de giração das massas de um pavimento em relação ao CT do pavimento;

$\theta_{I,N}$  = rotação de 1ª ordem no topo do edifício;

H = altura total do edifício.

### 3. METODOLOGIA

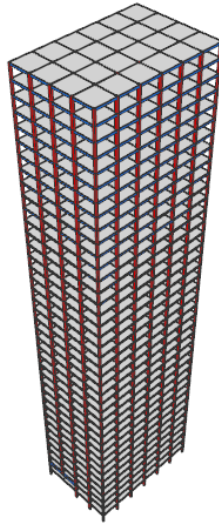
#### 3.1.1 MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES

As simulações das estruturas foram processadas em uma versão acadêmica do software de cálculo estrutural CAD/TQS V-22, gentilmente cedido sem custos à Universidade Federal de Santa Maria. Foram modeladas e analisadas estruturas de edifícios fictícios para viabilizar a análise comparativa em diferentes situações de posicionamento do centro de torção. Assim, realizou-se a modelagem de 4 estruturas diferentes, de modo a possibilitar diferentes localizações do centro de torção para cada edifício e analisar a influência do núcleo rígido nos deslocamentos de 2 modelos. Ademais, contam as seguintes configurações para os edifícios modelados:

- 120 metros de altura total;
- 3 metros de altura entre pisos;
- Núcleo rígido e pórticos compostos por pilares e vigas;
- Vigas com seção transversal de 20cm x 40cm;
- Lajes maciças com espessura de 12cm;
- Núcleo rígido em formato de “E”, com dimensões de aproximadamente 10,00 metros de comprimento e 5,00 metros de largura, com paredes com espessura de 20cm;
- Seções de pilares de 40x40cm, 40x45cm, 50x50cm, 40x65cm e 40x85cm.

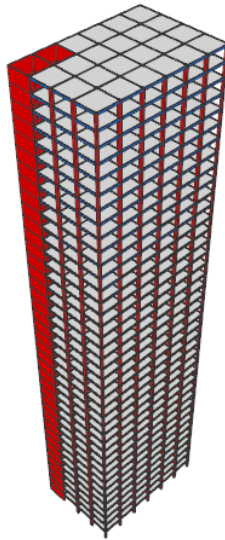
Os modelos foram originalmente desenvolvidos e testados por Sonda (2023). As dimensões dos pilares foram determinadas por ele a partir de um pré-dimensionamento. Todas as dimensões e características dos modelos foram mantidas, sendo apenas inseridas as vigas de transição com a supressão de um tramo de pilar no pavimento térreo. As Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam imagens dos modelos analisados sem a disposição de vigas de transição.

Figura 11: Modelo M01



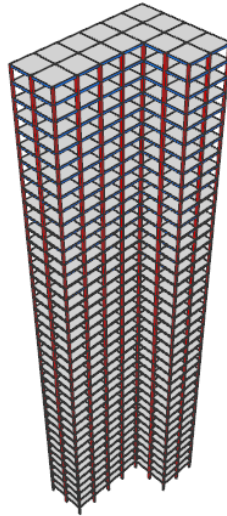
Fonte: Autor (2023)

Figura 12: Modelo M02



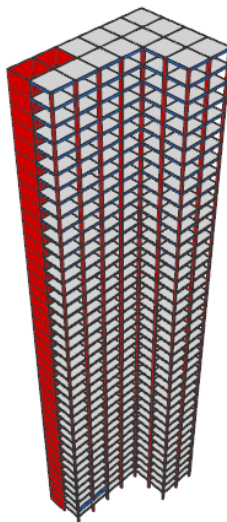
Fonte: Autor (2023)

Figura 13: Modelo M03



Fonte: Autor (2023)

Figura 14: Modelo M04



Fonte: Autor (2023)

O posicionamento das vigas de transição foi especificado para os pórticos externos do edifício, de modo a simular entradas de garagem, onde seria comum a utilização da viga de transição. Para estas, foi adotada uma altura estimada de 10% do vão entre pilares e com largura igual à dos pilares, ou seja, as vigas têm largura semelhante à dos pilares das fachadas externas e possuem 100 centímetros de altura, em razão do vão da viga de transição ser de 10 metros.

A escolha das plantas analisadas foi de acordo com os modelos apresentados por Sonda (2023) que apresentaram maior coeficiente  $\gamma_\theta$ . Neste sentido, avaliou-se 4 modelos distintos, sendo 2 modelos com geometria regular, com e sem núcleo rígido, e 2 modelos com geometria irregular, com e sem núcleo rígido. O pré-dimensionamento destes modelos deu-se de acordo com Sonda (2023).

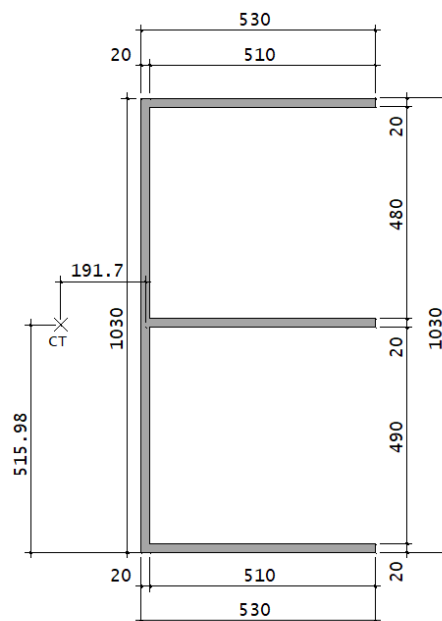
### 3.1.2 PAVIMENTO DE TRANSIÇÃO

Para a modelagem da viga de transição, foi designado no modelador estrutural do TQS um pavimento de transição, que foi utilizado para a disposição de vigas de transição de acordo com cada modelo. Nos pavimentos de transição, está com hachura em laranja a viga de transição, de forma a evidenciar sua localização na planta.

### 3.1.3 NÚCLEO RÍGIDO

O dimensionamento do centro rígido foi realizado por Sonda (2023), a partir do software PROPGE0 v2.04.30, sendo este disponibilizado gratuitamente pela “TQS Store”. A Figura 15 apresenta em planta o modelo dimensionado para o núcleo rígido utilizado

Figura 15: Centro de rigidez utilizado no modelo



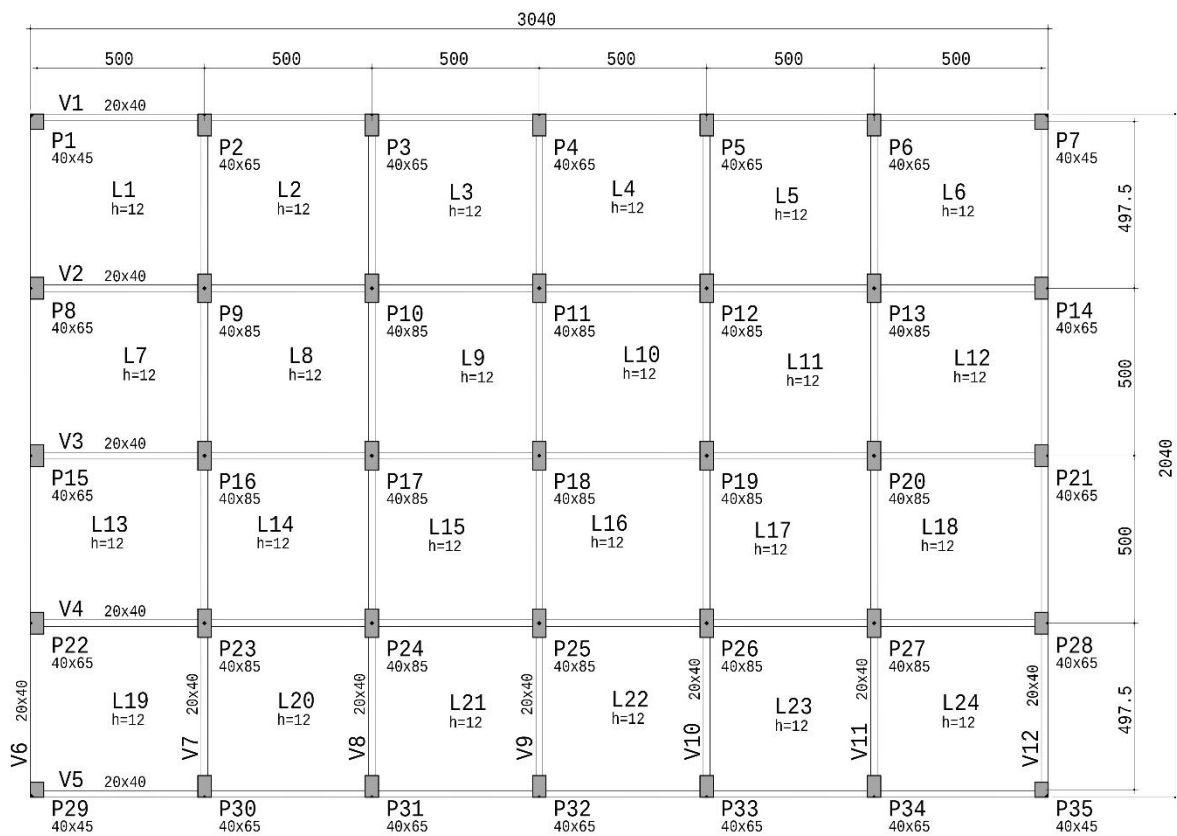
Fonte: Sonda (2023)

### 3.1.4 MODELOS COM GEOMETRIA REGULAR

Na sequência serão apresentadas as plantas dos modelos com geometria regular, assim como seus pavimentos de transição, onde está em evidência a viga de transição disposta. Estes projetos foram elaborados por Sonda (2023), e os modelos aqui apresentados são denominados como M03 e M04, referentes respectivamente aos modelos 1A e 6A dos estudos desse autor.

### 3.1.5 PAVIMENTO TIPO M01

Figura 16: Pavimento Tipo M01



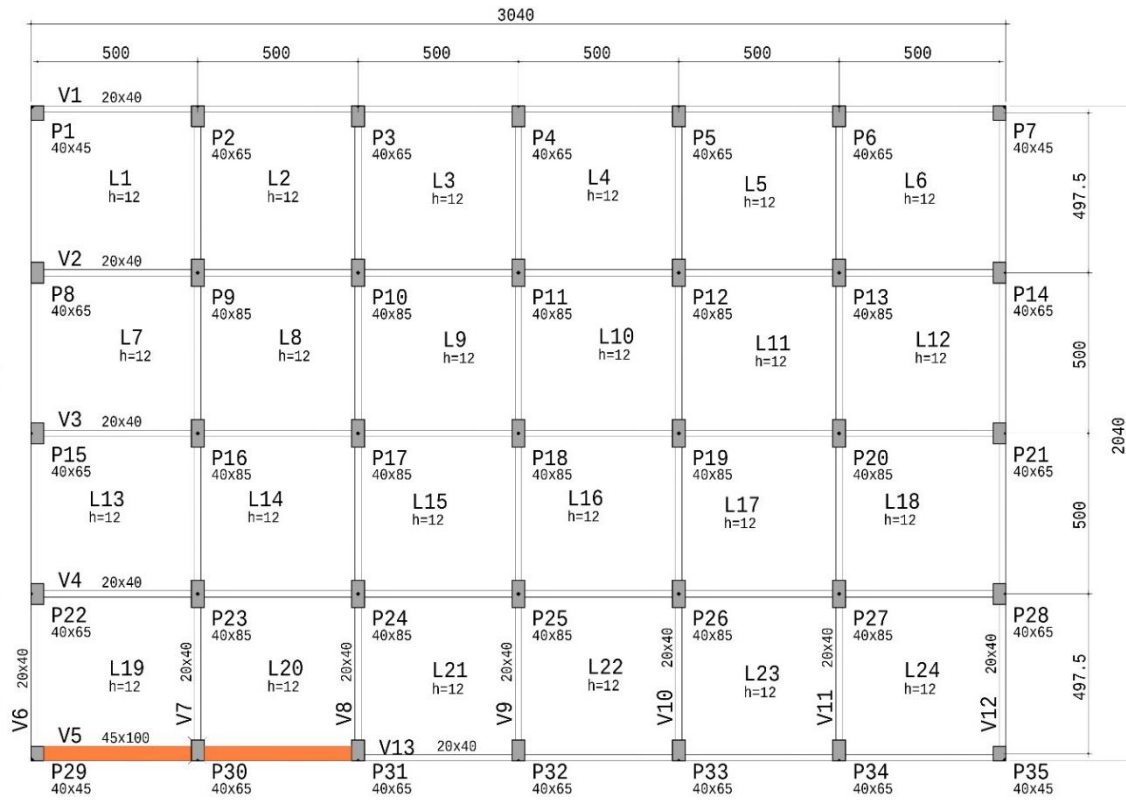
Fonte: Autor (2023)





### 3.1.5.2 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M01-VT2

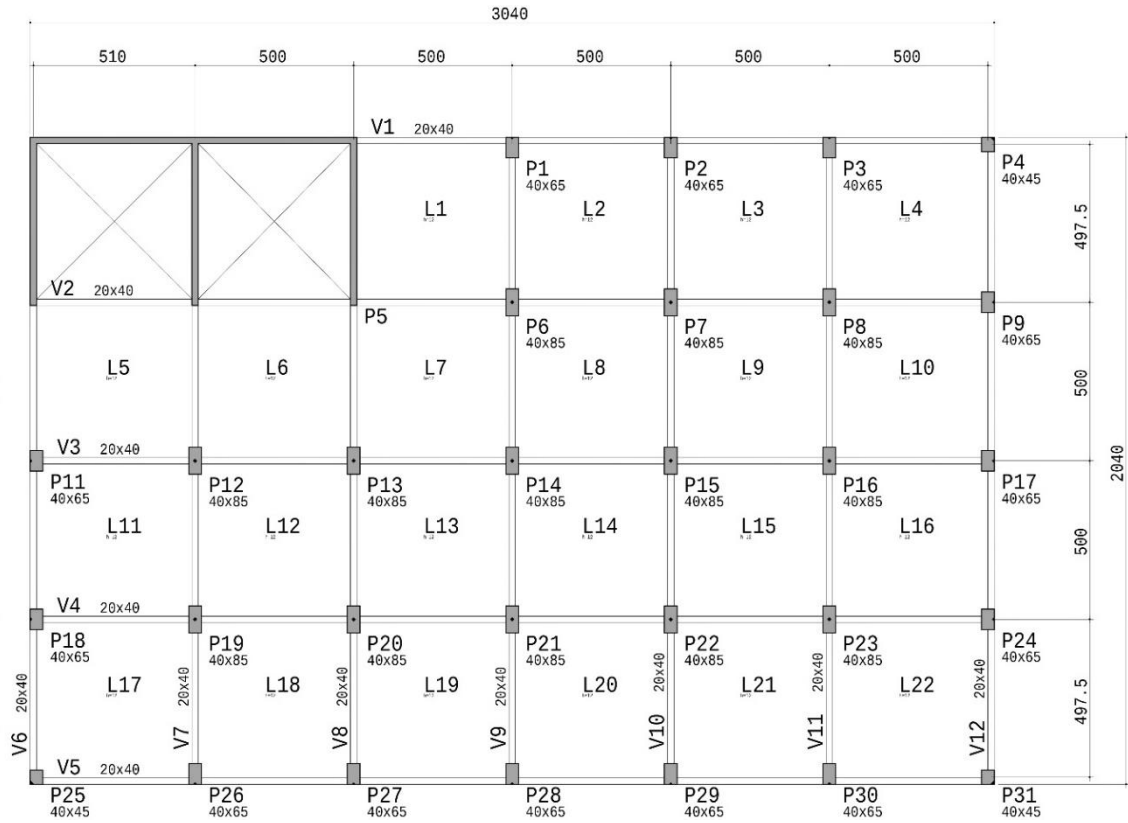
Figura 18: Pavimento Transição M01-VT2



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.6 PAVIMENTO TIPO M02

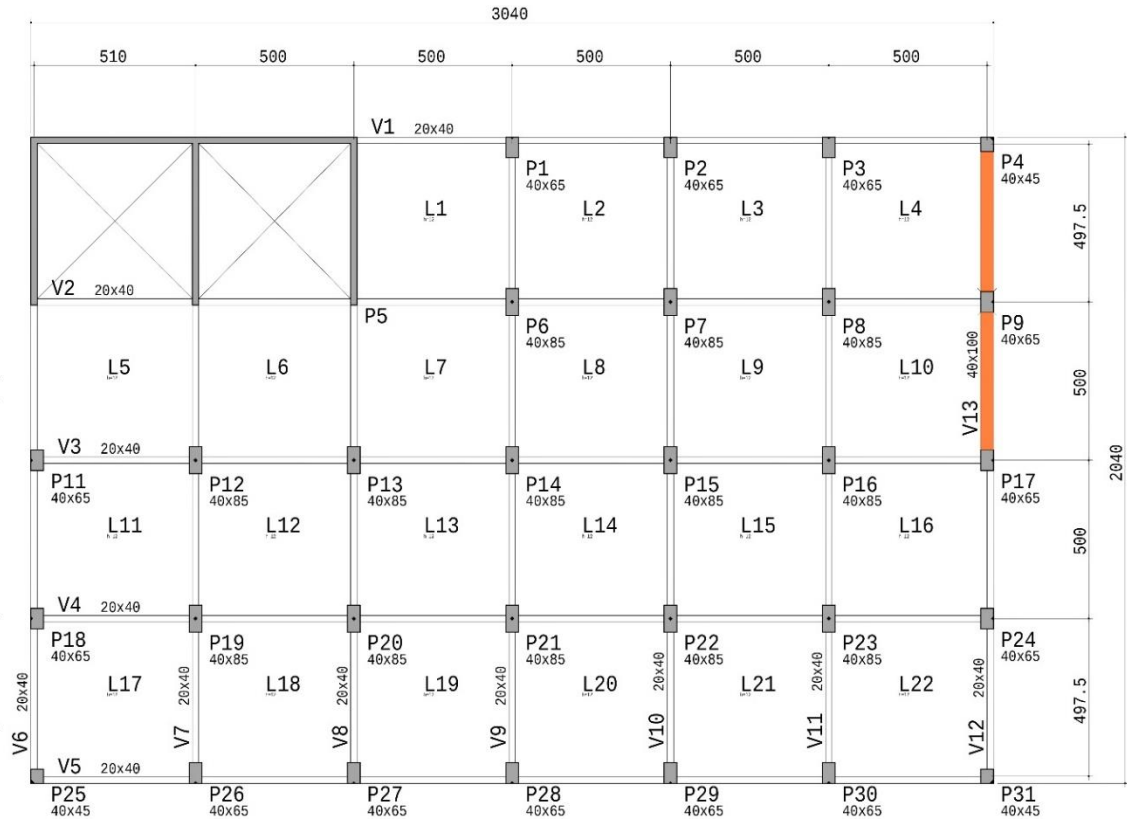
Figura 19: Pavimento Tipo M02



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.6.1 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M02-VT1

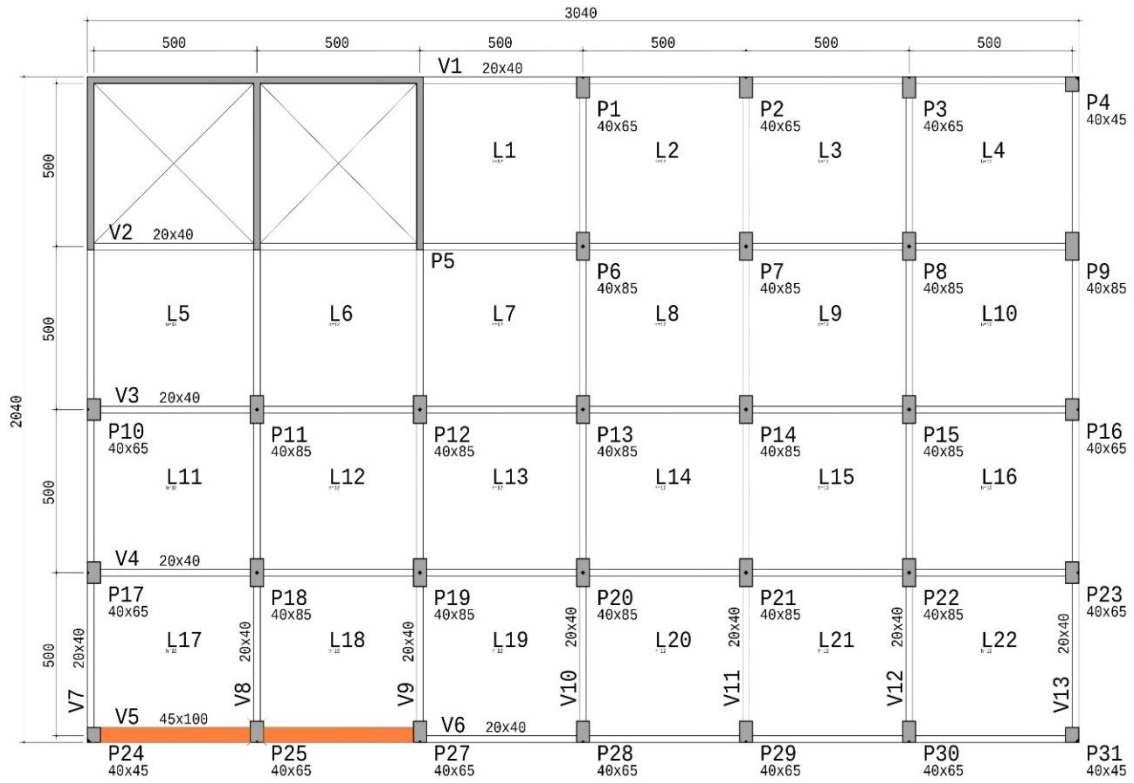
Figura 20: Pavimento Transição M02-VT1.



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.6.2 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M02-VT2

Figura 21: Pavimento Transição M02-VT2.



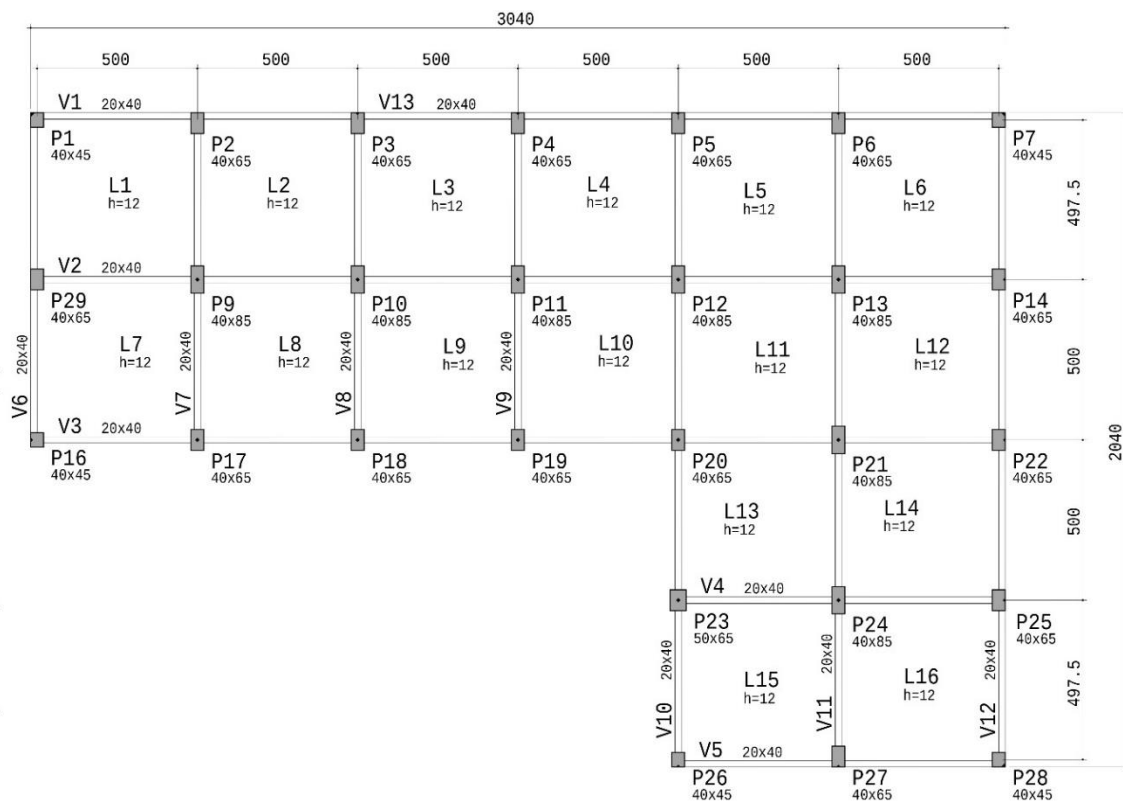
Fonte: Autor (2023)

### 3.1.7 MODELOS COM GEOMETRIA IRREGULAR

Da mesma forma da sessão anterior, serão apresentadas as plantas dos modelos com geometria irregular, assim como os respectivos pavimentos de transição. Estes modelos foram criados por Sonda (2023), sendo os modelos aqui nomeados como M03 e M04 relativos, respectivamente, aos modelos 7A e 8A de seu estudo.

### 3.1.8 PAVIMENTO TIPO M03

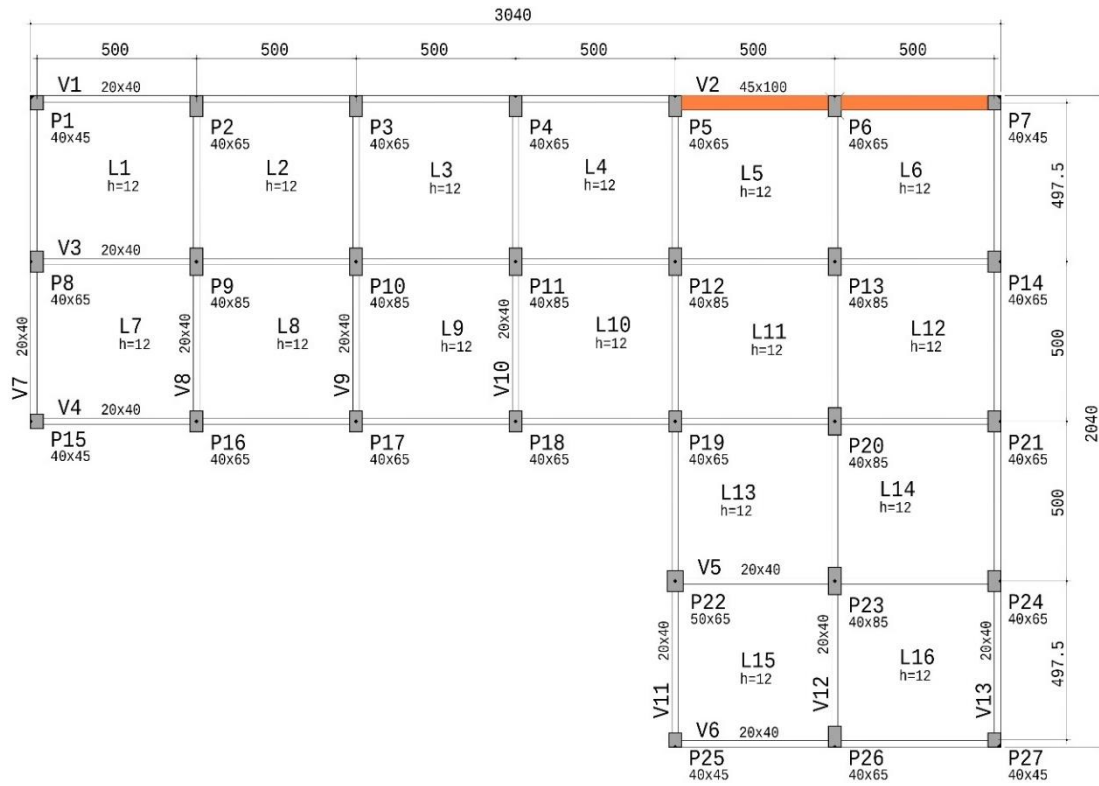
Figura 22: Pavimento Tipo M03



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.9 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M03-VT1

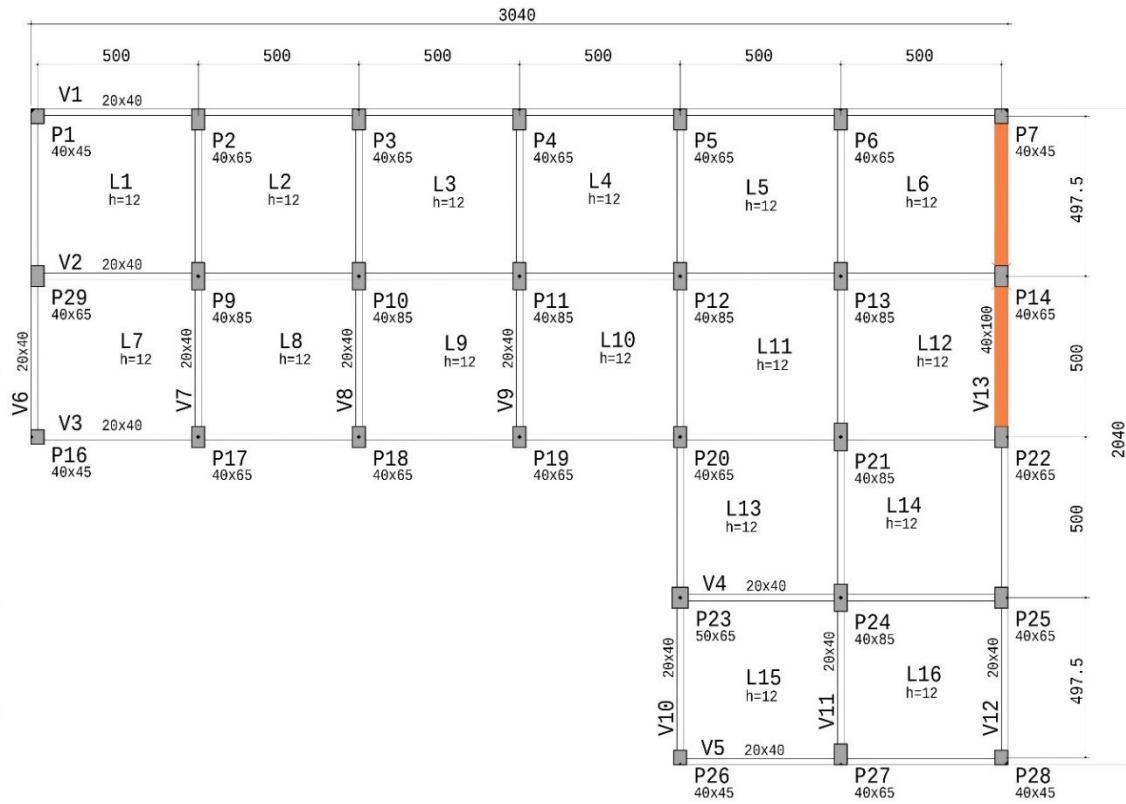
Figura 23: Pavimento Transição M03-VT1



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.10 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M03-VT2

Figura 24: Pavimento Transição M03-VT2

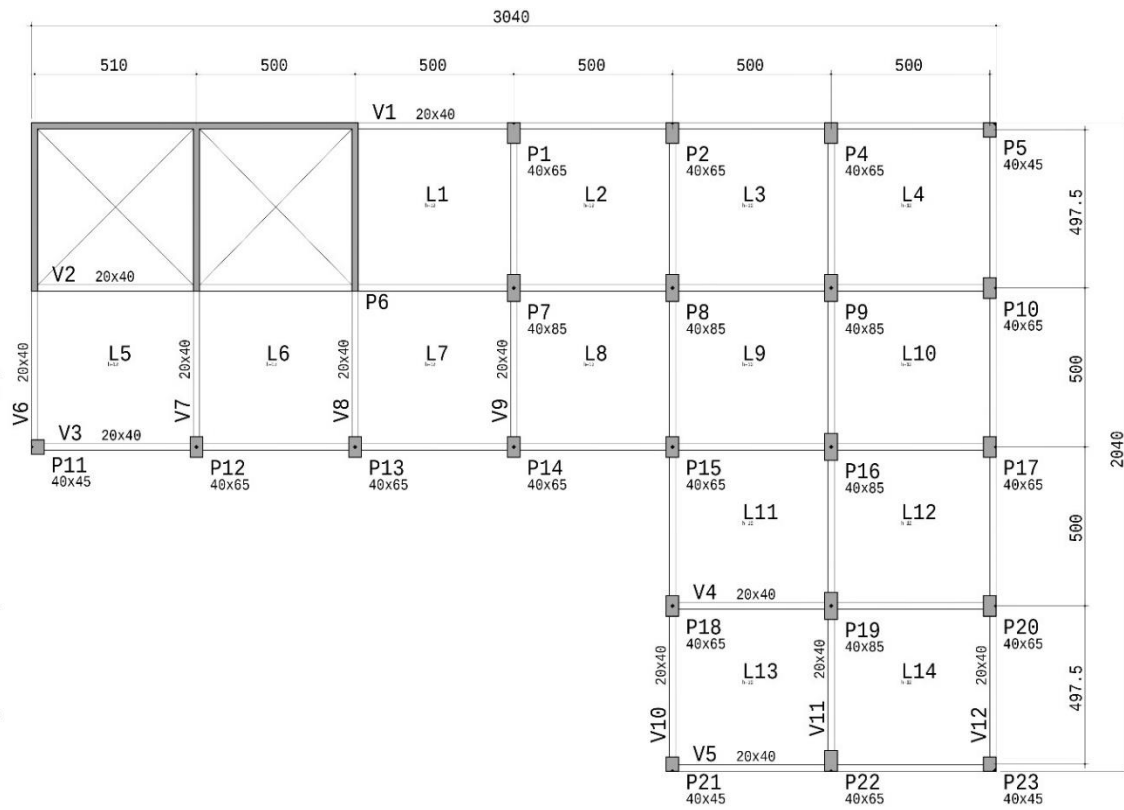


Fonte: Autor (2023)



### 3.1.11 PAVIMENTO TIPO M04

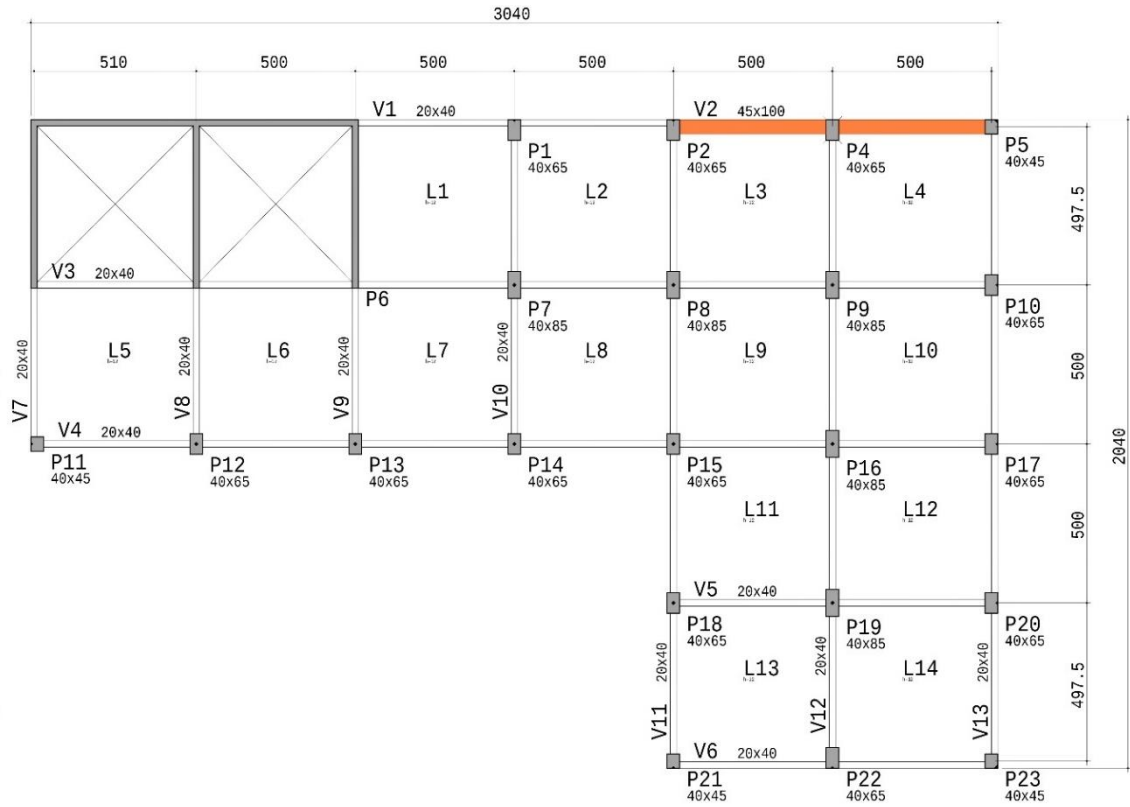
Figura 25: Pavimento Tipo M04



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.12 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M04-VT1

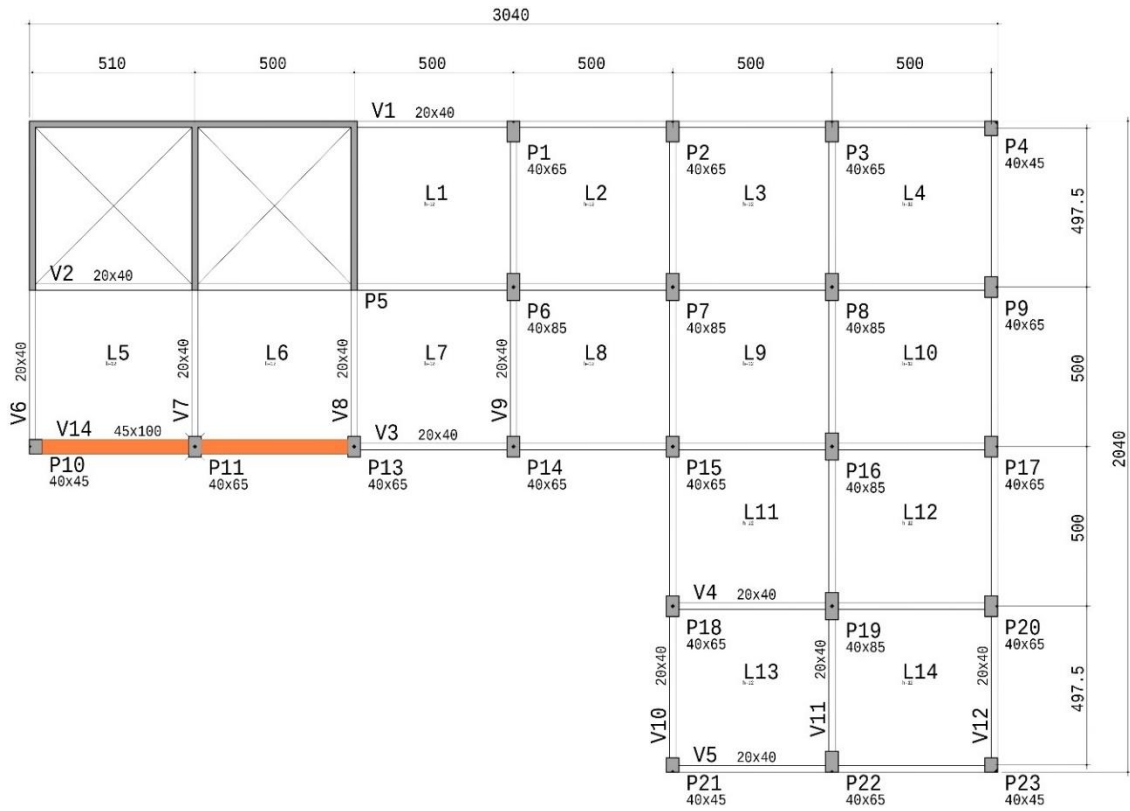
Figura 26: Pavimento Transição M04-VT1



Fonte: Autor (2023)

### 3.1.13 PAVIMENTO TRANSIÇÃO M04-VT2

Figura 27: Pavimento Transição M04-VT2



Fonte: Autor (2023)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da variação do coeficiente  $\gamma_\theta$  foi realizada em 4 diferentes modelos de prédio, para 2 casos diferentes de posicionamento de vigas de transição, resultando, portanto, em 8 casos avaliados. Neste sentido, a nomenclatura dos modelos é dada como Mi-Vi, assim, representando o número do modelo de estrutura e posicionamento da viga de transição, respectivamente.

### 4.1.1 CÁLCULO DO COEFICIENTE PELO $\gamma_\theta$ PELO CAD/TQS

O procedimento de cálculo do coeficiente  $\gamma_\theta$  é exemplificado para o modelo M01-VT1, e os parâmetros de cálculo seguem a mesma nomenclatura utilizada por Andrade (2020). Para os demais modelos o cálculo foi realizado de modo semelhante, mas que não serão aqui detalhados.

Primeiramente, é necessário calcular o parâmetro R, para tanto, são extraídas as reações verticais  $P_j$  nos pilares da fundação. No software CAD/TQS, estas informações foram obtidas pelo relatório de esforços, encontrado ao seguir o caminho de abas Edifício > Editar > Critérios > Pórtico espacial > Listagem. A Figura 28 apresenta o cálculo de esforços apresentados para o M1-VT1, sendo escolhidos para análise os casos de pior situação, relativos ao Caso 1.

Figura 28: Extração de esforços pelo Sistema TQS

Elem	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Fz tf	Fz tf	Fz tf
P1	326.95	251.34	94.96
P2	363.36	285.00	124.04
P3	369.62	275.28	116.72
P4	396.40	277.48	118.54
P5	416.55	276.25	117.18
P6	451.99	282.38	122.87
P7	230.49	155.46	54.69
P9	776.60	514.59	260.29
P10	674.32	447.05	226.43
P11	690.67	456.10	231.92
P12	682.57	452.36	228.69
P13	706.48	464.33	238.92
P14	373.18	270.23	114.48
P15	634.51	439.67	184.34
P16	708.20	466.65	238.64
P17	684.67	452.68	229.50
P18	693.06	455.63	232.24
P19	685.15	453.00	229.63
P20	703.28	463.31	237.22
P21	383.56	268.60	112.34
P22	317.61	231.80	97.50
P23	705.11	463.60	238.51
P24	682.99	452.58	228.81
P25	689.57	455.35	231.59
P26	682.37	452.54	228.78
P27	702.21	463.89	238.66
P28	399.81	271.24	115.12
P29	247.67	165.12	58.52
P30	450.64	281.94	122.68
P31	415.36	275.92	117.04
P32	395.22	277.15	118.41
P33	368.92	275.28	116.72
P34	357.04	281.19	122.43
P35	188.17	154.43	54.11

## Observações:

- 1 - Os valores apresentados referem-se às reações nos apoios
- 2 - Esforços com valores característicos
- 3 - Forças em tf
- 4 - Momentos em tfm
- 5 - Sistema de coordenadas GLOBAL
- 6 - A força X positiva empurra o apoio da esquerda para a direita
- 7 - O momento X positivo gira o apoio em torno do eixo X no sentido horário
- 8 - A força Y positiva empurra em planta o apoio de baixo para cima
- 9 - O momento Y positivo gira o apoio em torno do eixo Y no sentido horário
- 10 - A força Z positiva empurra o apoio de cima para baixo
- 11 - O momento Z positivo gira o apoio em torno do eixo Z no sentido horário
- 12 - CA é a cota de arrasamento/assentamento da fundação
- 13 - O peso próprio das fundações não está incluído no modelo

Fonte: Autor (2023)

Deste modo, obtidos os valores do esforço normal  $P_j$  em cada um dos pilares é necessário, também, obter as distâncias  $R_j$  do centro de cada pilar até o CT, para assim possuir todos os parâmetros para o cálculo do raio de giração das massas da estrutura. Na Equação 10 é apresentada a Equação para o cálculo da distância  $R_j$  de M01-VT1.

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r P_j \cdot R_j^2}{\sum_{j=1}^r P_j}} \quad (10)$$

Outros parâmetros necessários para o cálculo do  $\gamma_\theta$  são facilmente obtidos por informações do software, como a altura H do prédio e o parâmetro  $\theta_{I,N}$ , que representa a rotação de primeira ordem, que pode ser obtida em Pórtico TQS > Relatório > Processamento de esforços, que é representado neste relatório como “rot Z”. Neste sentido, ao escolher o valor da rotação de primeira ordem, é necessário escolher o nó que representa um pilar externo que sofreu um giro considerável, a fim de obter um resultado representativo de rotação. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos para a primeira análise do modelo M01-VT1, salientando que a ausência do Pilar 8 indica o local onde foi posicionada a viga de transição.

Tabela 1: Análise do modelo M01-VT1

Pilar	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Pj (kN)	Rj (m)	PjR <sup>2</sup> (kN.m <sup>2</sup> )
1	0,2	20,175	3337,30	18,014	1082955,94
2	5,2	20,075	3910,60	14,054	772404,60
3	10,2	20,075	3891,00	11,069	476708,30
4	15,2	20,075	4118,90	9,875	401657,11
5	20,2	20,075	4310,30	11,069	528079,09
6	25,2	20,075	4548,50	14,054	898399,82
7	30,2	20,175	2414,70	18,014	783571,66
8	0,2	15,2		15,811	
9	5,2	15,2	7669,00	11,180	958625,00
10	10,2	15,2	6684,00	7,071	334200,00
11	15,2	15,2	6761,30	5,000	169032,50
12	20,2	15,2	6732,70	7,071	3366350
13	25,2	15,2	6819,50	11,180	852437,50
14	30,2	15,2	3818,30	15,811	954575,00
15	0,2	10,2	5509,00	15,000	1239525,00
16	5,2	10,2	7044,60	10,000	704460,00
17	10,2	10,2	6830,60	5,000	170765,00
18	15,2	10,2	6881,60		
19	20,2	10,2	6823,50	5,000	170587,50
20	25,2	10,2	6864,30	10,000	686430,00
21	30,2	10,2	3927,70	15,000	883732,50
22	0,2	5,2	3964,20	15,811	991050,00
23	5,2	5,2	6843,30	11,180	855412,50
24	10,2	5,2	6733,10	7,071	336655,00
25	15,2	5,2	6758,40	5,000	168960,00
26	20,2	5,2	6687,90	7,071	334395,00
27	25,2	5,2	6735,50	11,180	841937,50
28	30,2	5,2	3994,70	15,811	998675,00
29	0,2	0,225	2476,40	18,014	803593,35
30	5,2	0,325	4526,60	14,054	894074,23
31	10,2	0,325	4281,40	11,069	524538,39
32	15,2	0,325	4089,00	9,875	398741,39
33	20,2	0,325	3851,10	11,069	471819,92
34	25,2	0,325	3682,40	14,054	727331,54
35	30,2	0,225	2006,50	18,014	651110,50
			<b>175527,90</b>		<b>21403075,85</b>

Fonte: Autor (2023)

Para o restante do cálculo do momento adicional de torção, foram obtidos, portanto, os fatores:

$$P = 175527,900 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 H &= 120 \\
 \theta_{I,N} &= 0,0048 \\
 \Delta M_t &= \frac{P \cdot R^2 \cdot \theta_{I,N}}{H} = \frac{21403075,85 \cdot 0,0048}{120} = 820,45 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ainda, para o cálculo do fator  $M_{t,I}$ , foi considerada a utilização de dois binários de força ( $P_b$ ) de 10 kN em sentidos opostos, de modo que houvesse um movimento de torção pura, assim como foi explicado na Seção 2.2.3. Deste modo, o cálculo do  $M_{t,I}$  para 40 pavimentos, considerando que a distância  $c = 30m$ , tem-se:

$$M_{t,I} = n \cdot P_b \cdot c = 40 \cdot 9,8066 \cdot 30 = 11767,92 \text{ kN}$$

Por fim, é obtido o coeficiente  $\gamma_\theta$ , Andrade (2020) explica este coeficiente como uma relação entre a rotação da análise de primeira ordem, aqui caracterizada como o fator  $\theta_{I,N}$ , e a rotação causada pela análise de segunda ordem.

$$\gamma_\theta = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_t}{M_{t,I}}} = \frac{1}{1 - \frac{820,45 \text{ kN}}{11767,92 \text{ kN}}} = 1,075$$

Assim, tem-se que para o caso M01-VT1, é esperada uma rotação 1,075 vezes superior nos efeitos de segunda ordem globais da edificação, quando comparado com o valor de rotação calculado para a análise de primeira ordem.

#### 4.1.2 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANALISADOS

A avaliação dos efeitos de segunda ordem relativo ao posicionamento das vigas de transição foi realizada através da comparação entre os modelos obtidos por Sonda (2023) e os modelos Mi-VTi realizados neste trabalho. Para esta análise, foram avaliados fatores como o valor de  $\gamma_\theta$  e o posicionamento do centro de torção obtidos para os modelos citados.

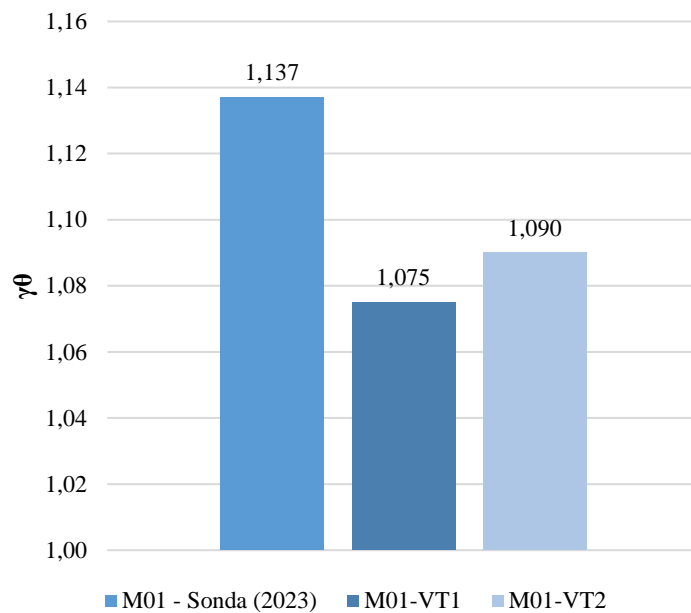
#### 4.1.3 MODELO M01

Para o modelo M01, foram obtidos para ambas as disposições de viga de transição valores menores do coeficiente  $\gamma_\theta$  quando comparados ao modelo original. Foi obtido que o



modelo M01-VT1 apresentou um decréscimo de 5,46% no valor do coeficiente  $\gamma_\theta$ , enquanto para o modelo M01-VT2, o decréscimo foi de 4,31% para o mesmo coeficiente. A Figura 29 apresenta o coeficiente  $\gamma_\theta$  para o Modelo M01.

Figura 29: Resultados do coeficiente  $\gamma_\theta$  para o Modelo M01

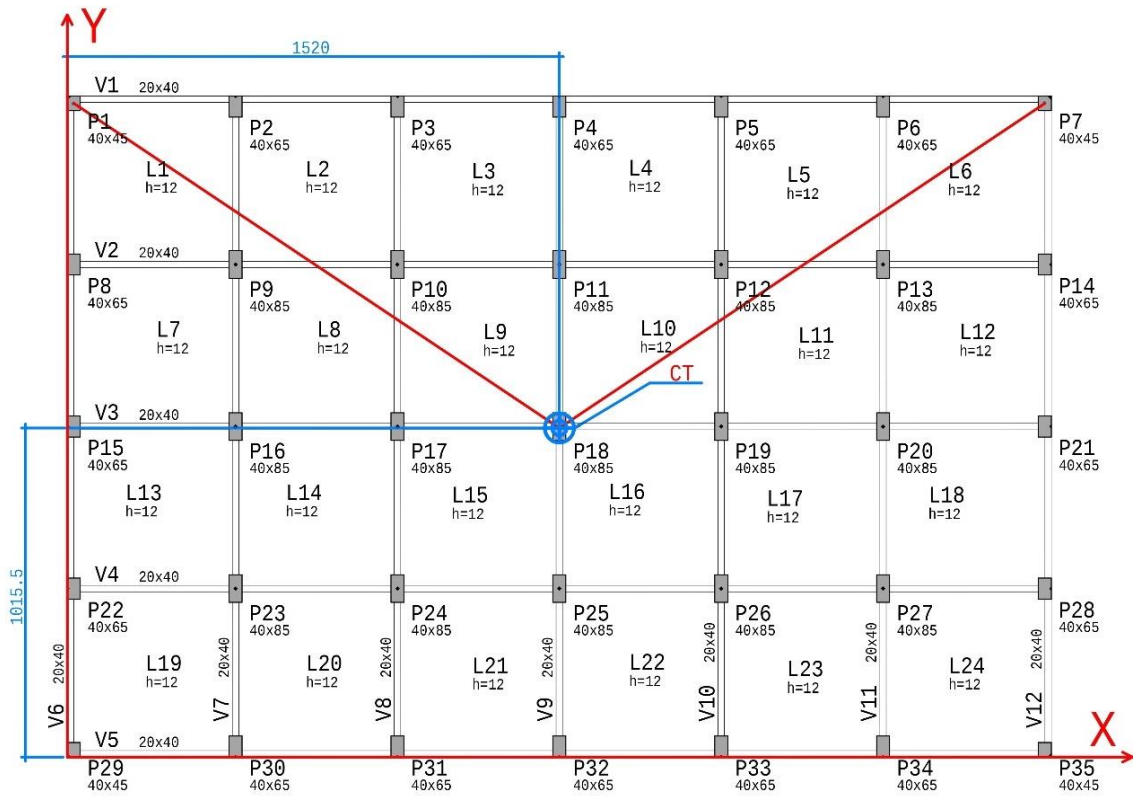


Fonte: Autor (2023)

Em relação à comparação das disposições de vigas dos modelos M01-VT1 e M01-VT2, tem-se que o primeiro modelo obteve uma maior rigidez à rotação de segunda ordem. O modelo M01-VT2 apresentou um coeficiente  $\gamma_\theta$  1,41% maior quando comparado com o modelo M01-VT1, configurando assim uma rigidez à torção infinitamente maior resistência à esforços de torção. Deste modo, para ambos os casos a disposição da viga de transição possibilitou à estrutura uma maior rigidez para resistir a forças de torção, sendo esta maior para o caso do modelo M01-VT2.

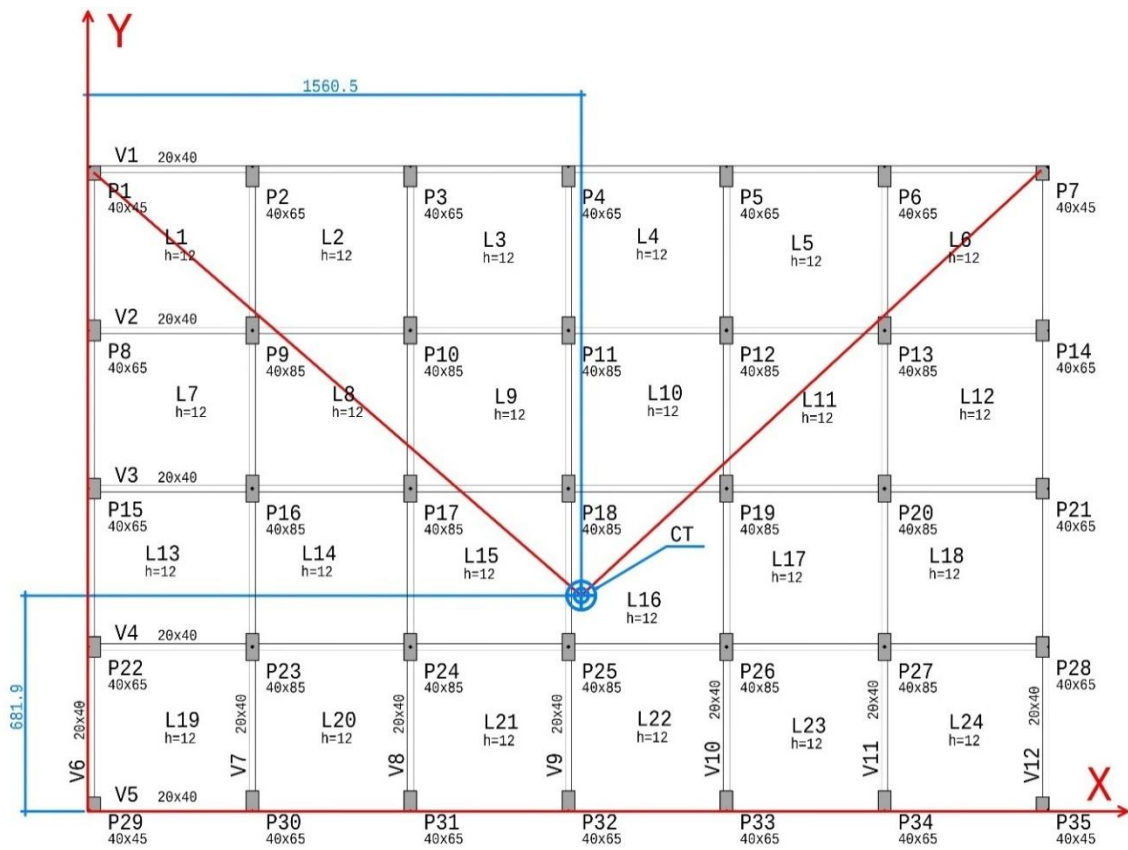
Em relação a mudança do posicionamento do centro de torção com o posicionamento das vigas de transição, foi concluído que o maior deslocamento do centro de torção foi obtido no modelo M01-VT1, quando comparado com o modelo M02-VT2. As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os centros de torção em planta para os modelos M01, M01-VT1 e M01-VT2, respectivamente.

Figura 30: Centro de torção M01 – Sonda (2023)



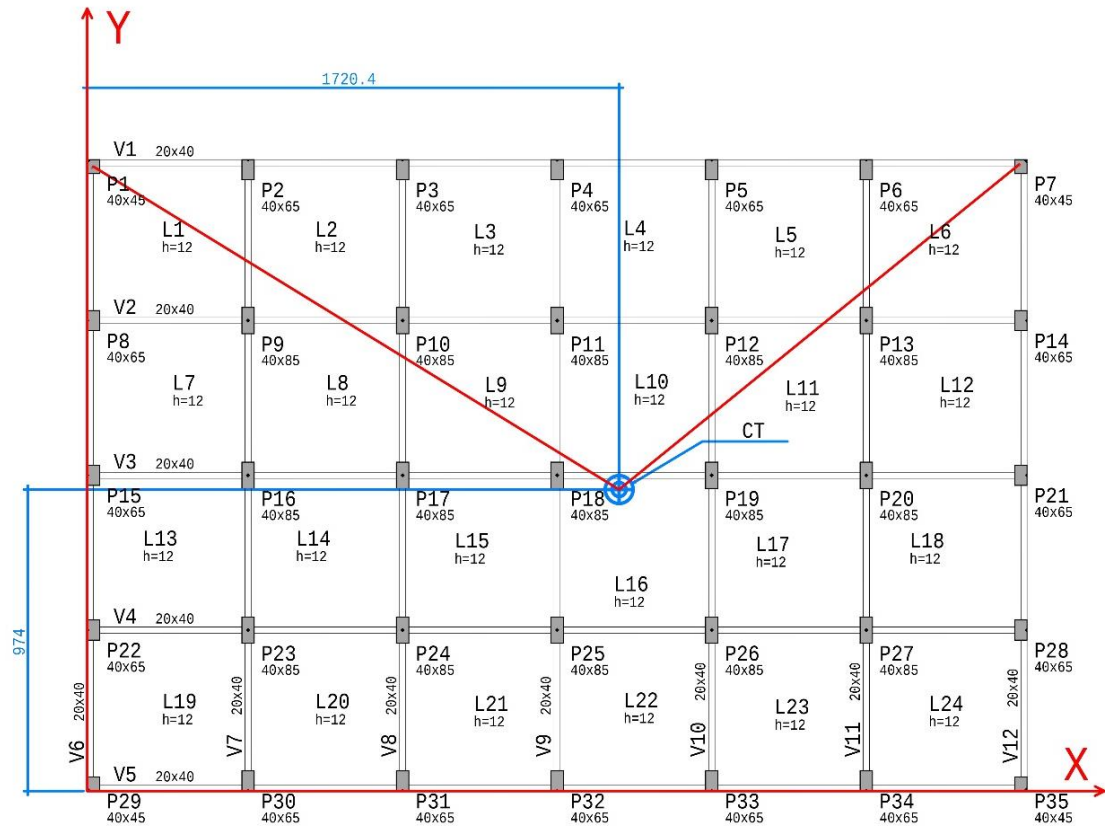
Fonte: Sonda (2023)

Figura 31: Centro de torção M01-VT1



Fonte: Autor (2023)

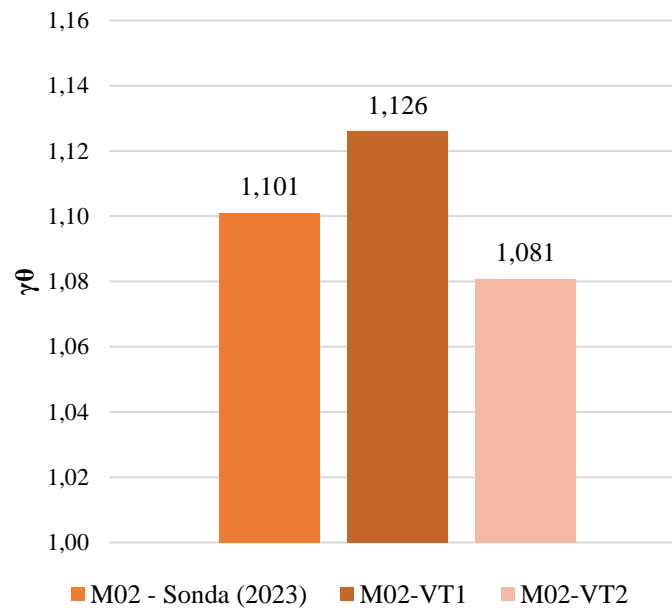
Figura 32: Centro de torção M01-VT2



Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.4 MODELO M02

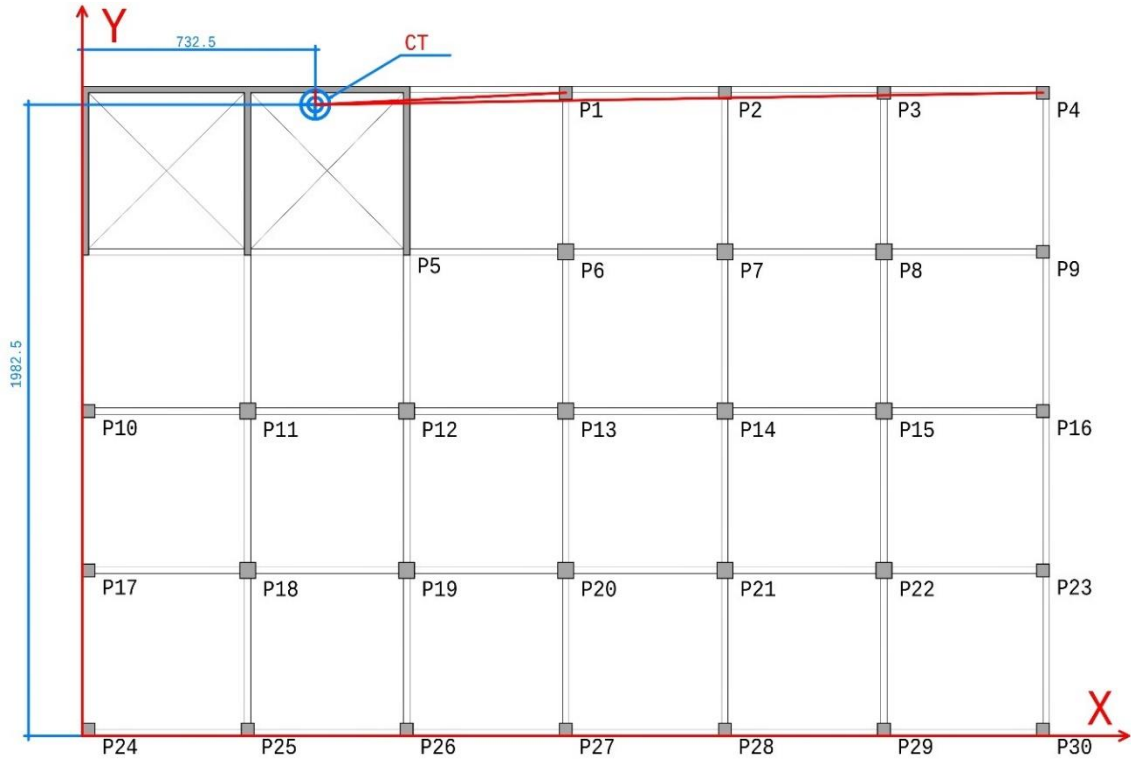
O modelo M02 apresentou diferenças no valor do coeficiente  $\gamma_{\theta}$ , dependendo da disposição da viga de transição utilizada. O posicionamento da viga de transição do modelo M02-VT1 resultou em um aumento 2,27% no coeficiente  $\gamma_{\theta}$ , enquanto que no modelo M02-VT2, houve um valor 1,82% menor quando comparados ao modelo M02 original. Desta forma, a primeira disposição de viga de transição aumentou a flexibilidade da estrutura em relação aos esforços de torção, enquanto a segunda aumentou a rigidez a esses esforços. A Figura 33 apresenta o gráfico de análise do modelo M02 em relação a disposição de vigas de transição.

Figura 33: Resultados do coeficiente  $\gamma_0$  para o Modelo M02

Fonte: Autor (2023)

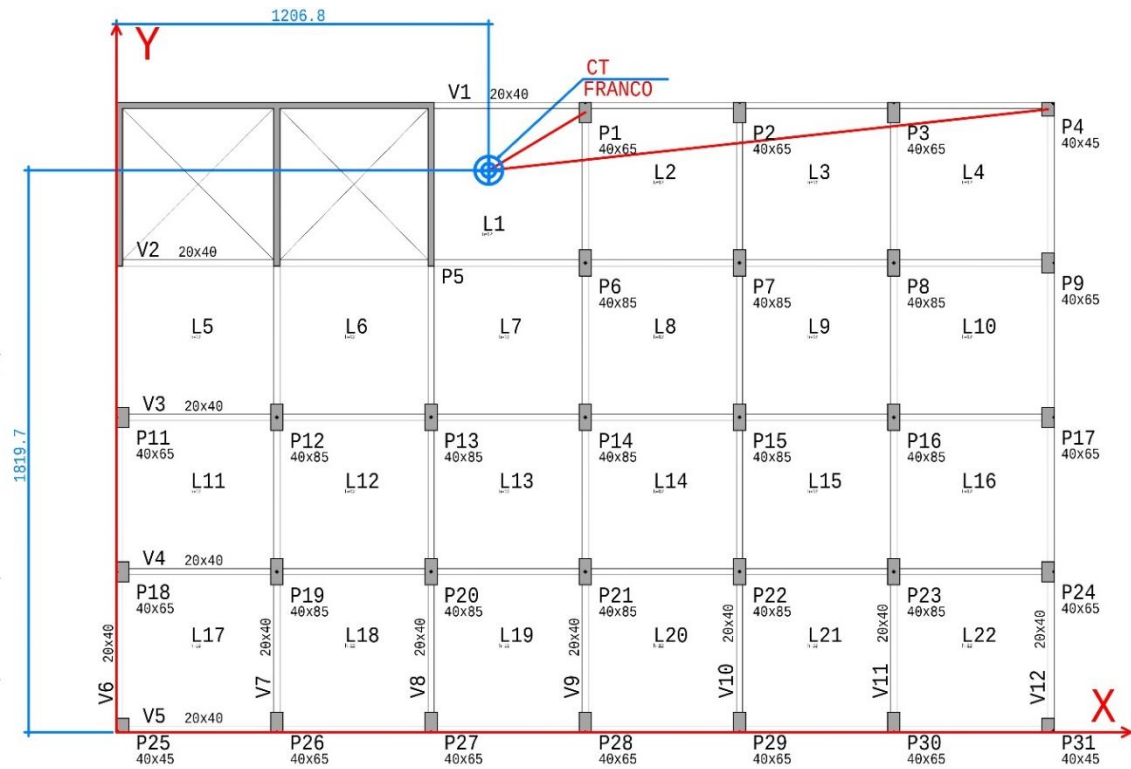
Ao avaliar a variação do ponto de transição entre os modelos, foi observado que o modelo M03-VT2 apresentou um deslocamento significativamente maior do que o modelo M03-VT1. As imagens mostrando os pontos de torção para cada modelo podem ser vistas nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34: Centro de torção M02 – Sonda (2023)



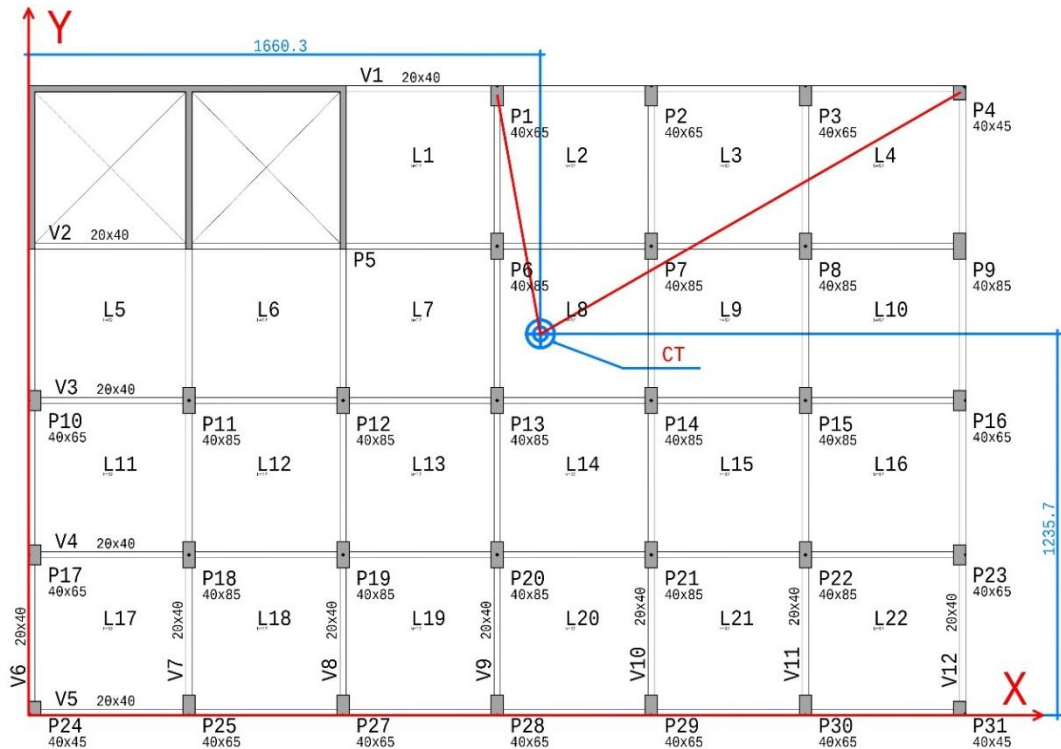
Fonte: Autor (2023)

Figura 35: Centro de torção M02-VT1



Fonte: Autor (2023)

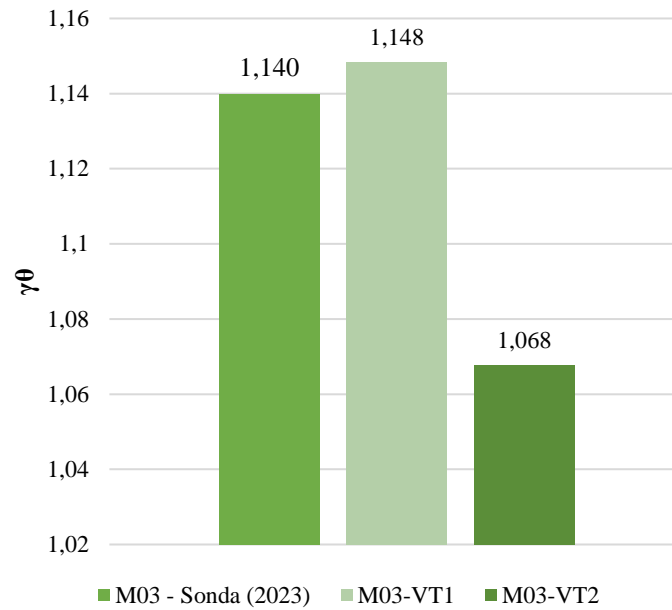
Figura 36: Centro de torção M02-VT2



Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.1 MODELO M03

Para o modelo M03, as duas disposições de viga de transição resultaram em diferentes efeitos no valor do coeficiente  $\gamma_{\theta}$ . No caso do posicionamento da viga de transição do modelo M03-VT1, foi produzido um aumento de 0,73% no coeficiente  $\gamma_{\theta}$ , enquanto que para o modelo M03-VT2 houve uma diminuição de 6,33% quando comparado ao modelo original. Deste modo, tem-se que a primeira disposição de viga de transição acarretou em uma flexibilização da estrutura quanto a esforços de torção, enquanto a segunda representou um aumento da rigidez à torção. A Figura 37 apresenta o gráfico de análise para o modelo M03.

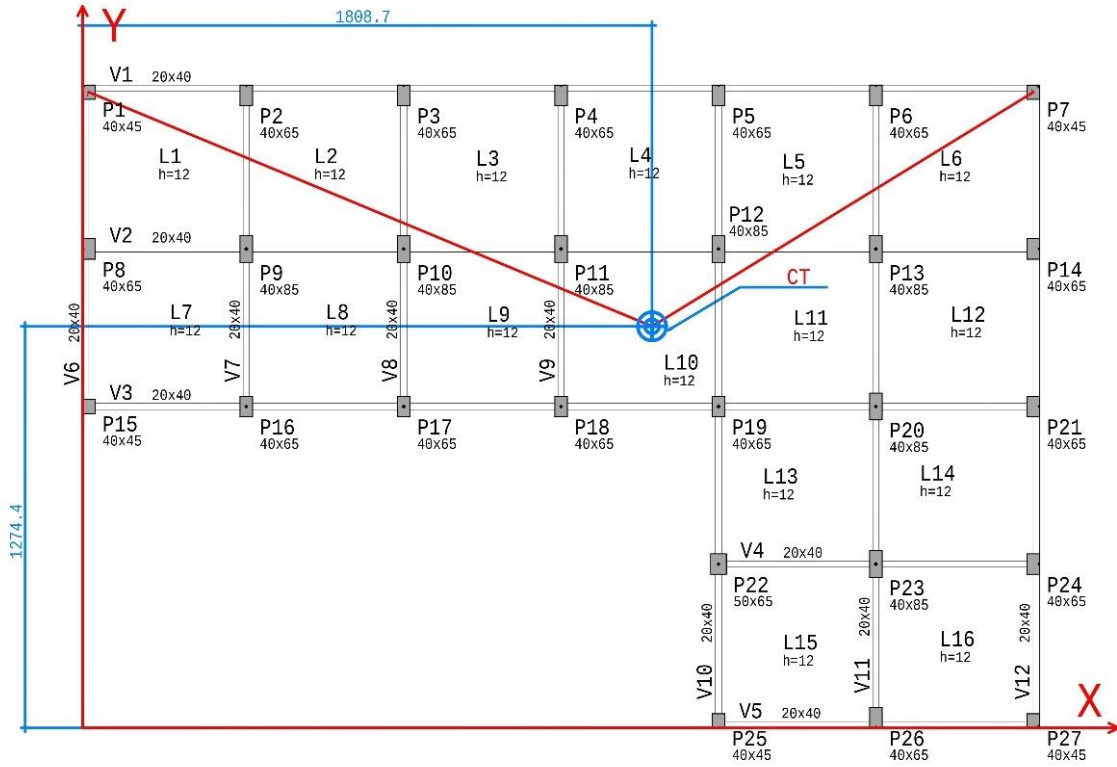
Figura 37: Resultados do coeficiente  $\gamma_0$  para o Modelo M03

Fonte: Autor (2023)

Quando analisada a mudança no centro de transição para cada modelo, tem-se que o modelo M03-VT2 resultou em um significativo deslocamento quando comparado com o modelo M03-VT1. Os centros de torção para os modelos analisados são apresentados nas Figuras 38, 39 e 40.

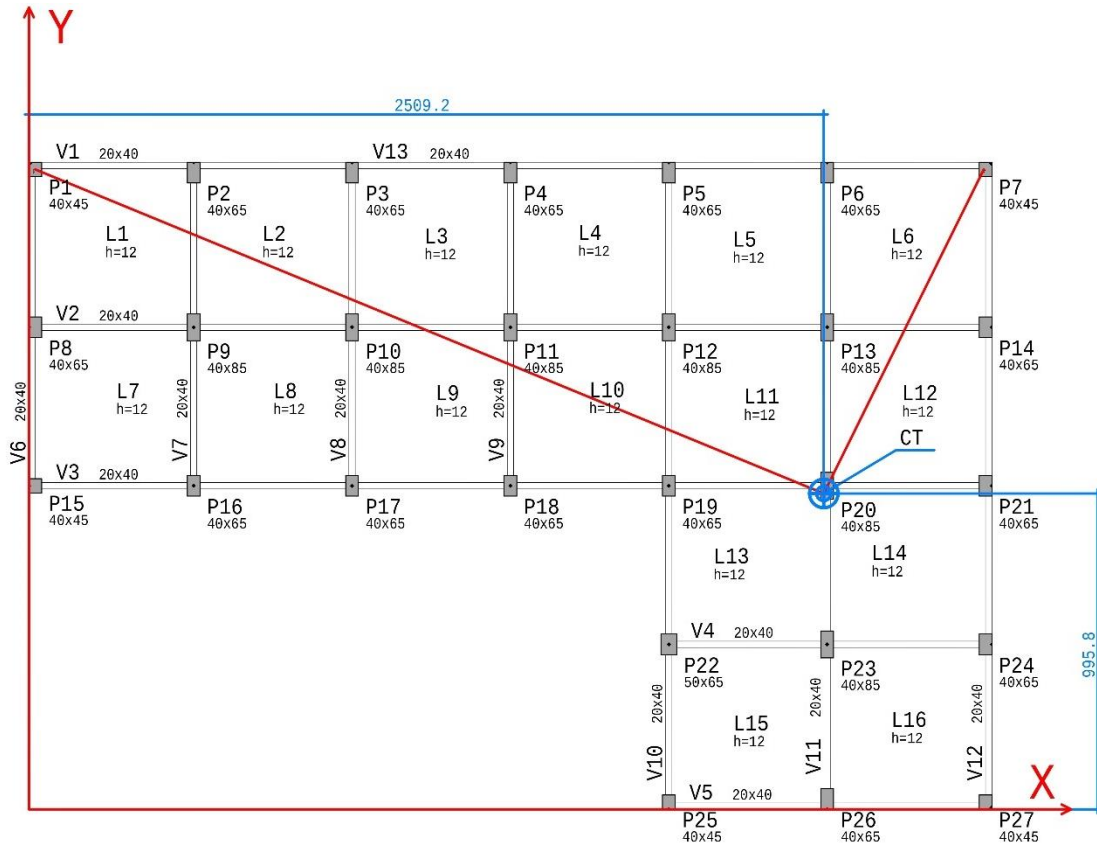


Figura 38: Centro de torção M03 – Sonda (2023)



Fonte: Autor (2023)

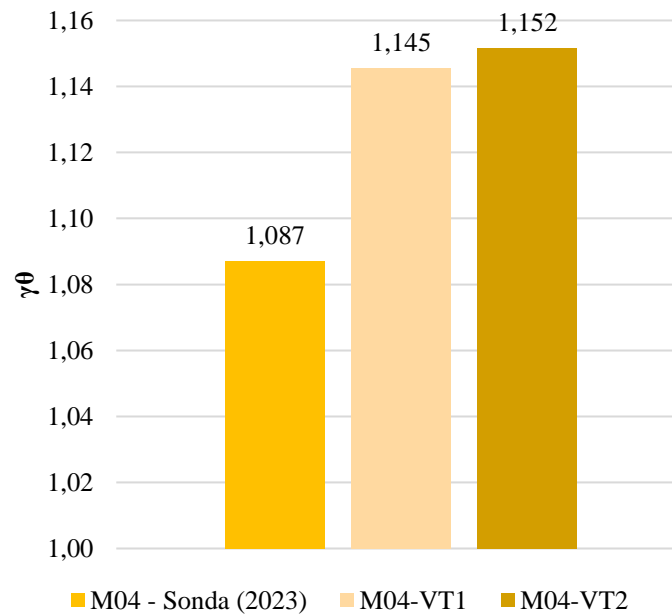
Figura 39: Centro de torção M03-VT1



Fonte: Autor (2023)



Figura 41: Resultados do coeficiente  $\gamma_\theta$  para o Modelo M04

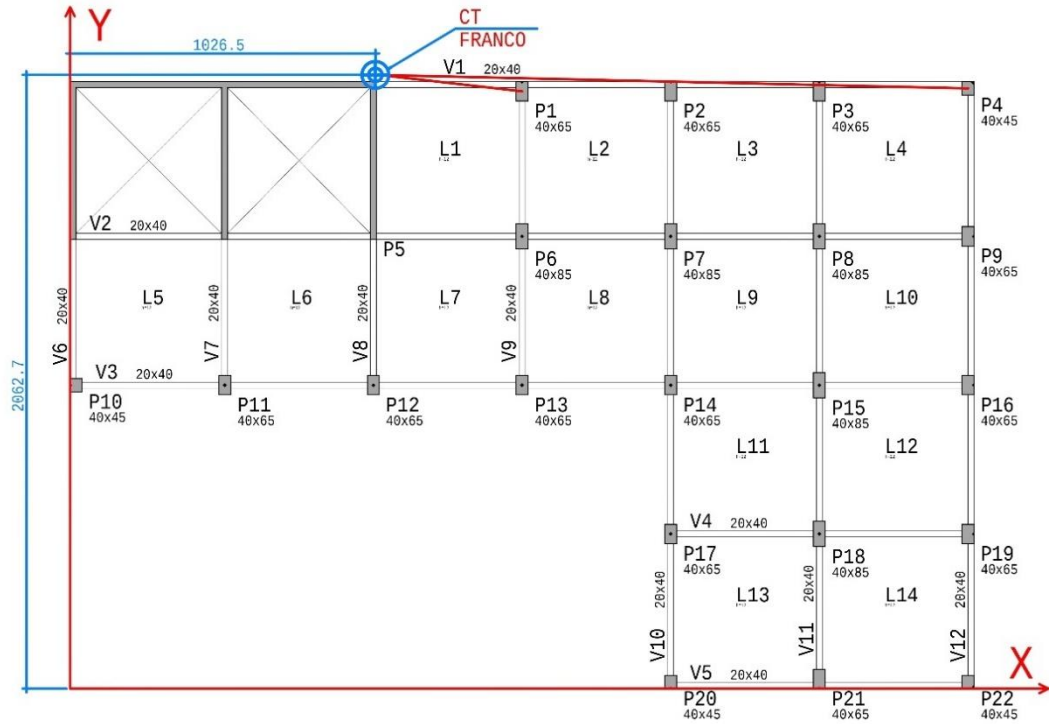


Fonte: Autor (2023)

Em relação ao modelo M04 original, tem-se que houve um aumento do coeficiente  $\gamma_\theta$  de 5,38% para o modelo M04-VT1 e de 5,94% para o modelo M04-VT2. Já para a comparação entre os modelos M04-VT1 e M04-VT2, tem-se que o segundo apresentou um valor de  $\gamma_\theta$  9,46% maior quando comparado ao primeiro, sendo, portanto, menos rígido à torção.

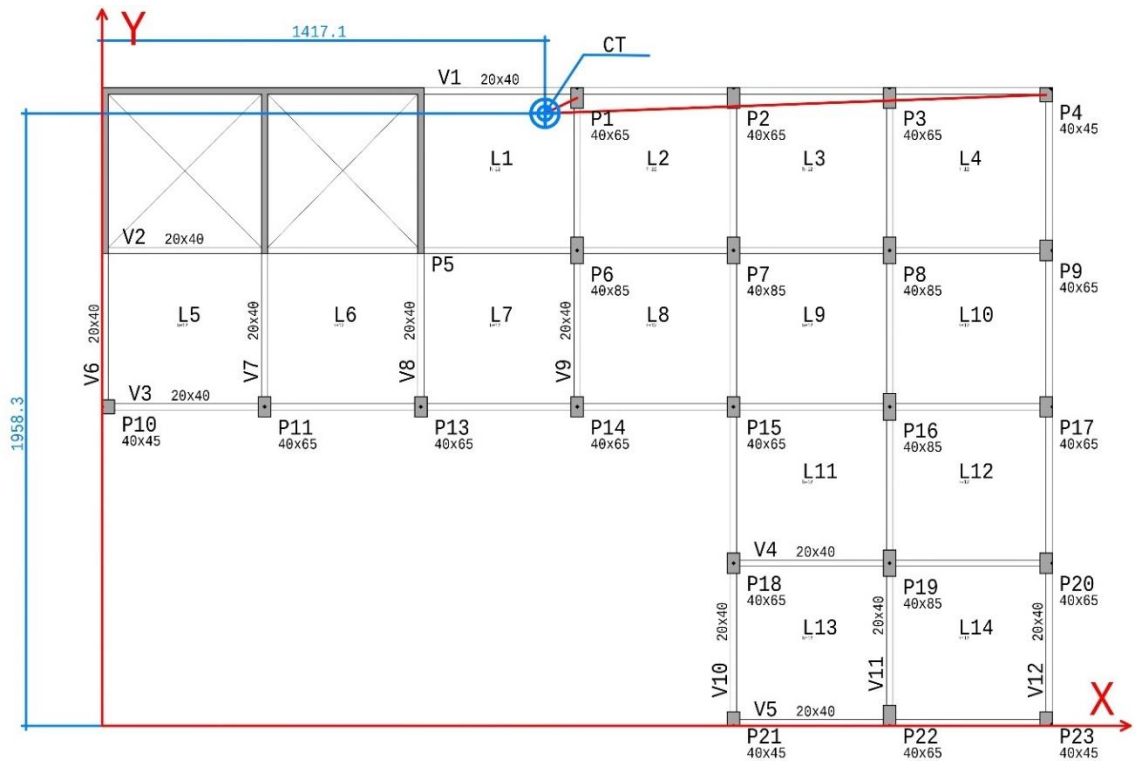
Para a avaliação do centro de torção dos modelos, embora a diferença seja pequena, foi obtido que o modelo M04-VT2 apresentou um maior deslocamento do centro de torção pelo método de Franco (2003) quando comparado com o modelo M04-VT1. As Figuras 42, 43 e 44 ilustram as localizações dos centros de torção no plano para os modelos M01, M01-VT1 e M01-VT2, respectivamente.

Figura 42: Centro de torção M04 – Sonda (2023)



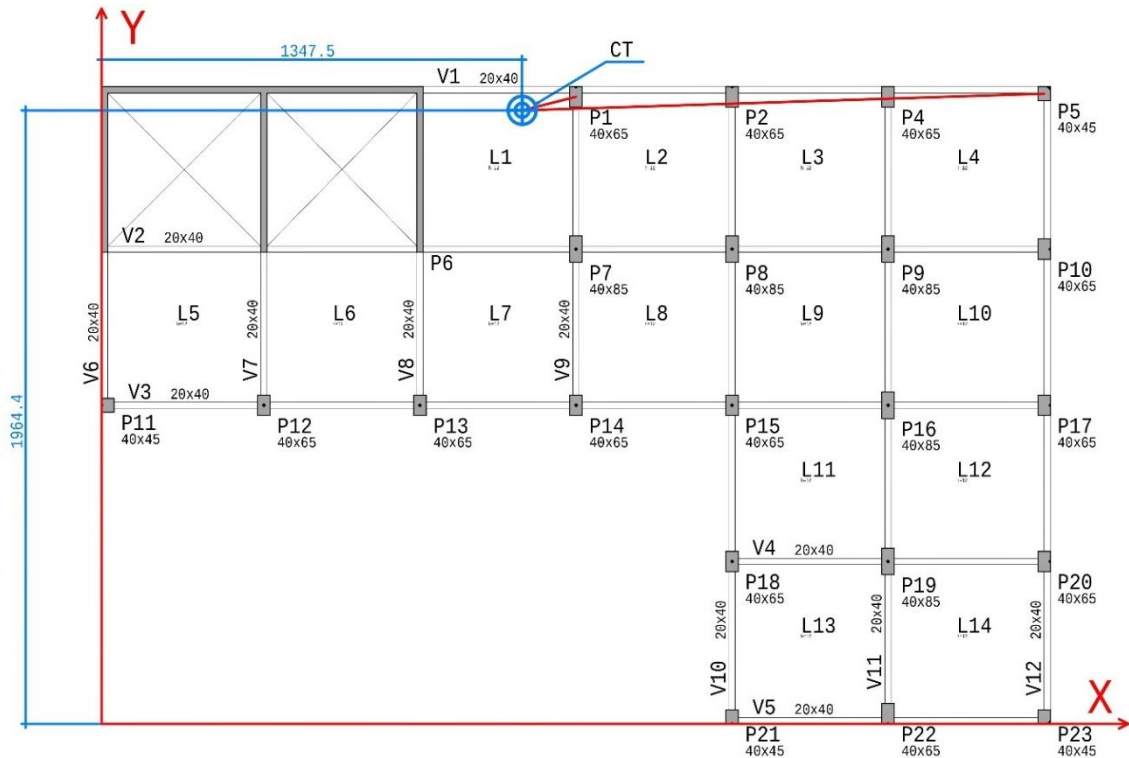
Fonte: Autor (2023)

Figura 43: Centro de torção M04-VT1



Fonte: Autor (2023)

Figura 44: Centro de torção M04-VT2



Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.3 ANÁLISE ENTRE MODELOS DE PLANTAS REGULARES

As plantas regulares podem contribuir para a estabilidade estrutural para efeitos de segunda ordem, pois elas possuem simetria e proporção regular em sua disposição, o que resulta em uma distribuição equilibrada de esforços e cargas. Além disso, uma estrutura com planta regular tem maior capacidade de resistir aos efeitos de segunda ordem, como a flexão não linear e a torção, devido ao seu equilíbrio geométrico. A Tabela 2 apresenta a comparação do coeficiente  $\gamma_{\theta}$  entre o modelo original de Sonda (2023) e os modelos onde há disposição de vigas de transição.

Tabela 2: Comparativo entre modelos de plantas regulares

Dados	M01			M02		
	1A-Sonda (2023)	VT1	VT2	6A-Sonda (2023)	VT2	VT2
$\gamma_{\theta}$	1,137	1,075	1,090	1,101	1,126	1,081
Diferença (%)		-5,46%	-4,31%		2,27%	-1,82%

Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.4 ANÁLISE ENTRE MODELOS DE PLANTAS IRREGULARES

Estruturas com plantas irregulares podem ser mais vulneráveis à instabilidade para efeitos de segunda ordem, devido à falta de simetria e proporção regular. Ademais, quando a planta de uma edificação é irregular, são facilitados os desequilíbrios nas cargas e esforços que atuam na estrutura, o que pode levar a problemas como flexão não linear e torção em seus elementos, principalmente quando é realizada a análise dos efeitos de segunda ordem. A Tabela 3 mostra as diferenças no valor do coeficiente  $\gamma_\theta$  entre o modelo original da Sonda (2023) e os modelos que têm a inclusão de vigas de transição.

Tabela 3: Comparativo entre modelos de plantas irregulares

Dados	M03			M04		
	7A-Sonda (2023)	VT1	VT2	8A-Sonda (2023)	VT1	VT2
$\gamma_\theta$	1,140	1,148	1,068	1,087	1,145	1,152
<b>Diferença (%)</b>		0,73%	-6,33%		5,38%	5,94%

Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.5 ANÁLISE ENTRE MODELOS ENTRE PLANTAS COM NÚCLEO RÍGIDO

A presença de um núcleo rígido em uma edificação pode aumentar a rigidez do edifício, o que resulta em uma redução no coeficiente  $\gamma_\theta$ . No entanto, a presença de um núcleo rígido também pode afetar a distribuição de cargas ao longo do edifício, o que também pode influenciar a distribuição de tensões e deformações na estrutura. A Tabela 4 apresenta a comparação entre resultados do coeficiente  $\gamma_\theta$  quando em relação ao modelo original da Sonda (2023) com os modelos que incluem vigas de transição nas plantas com núcleo rígido.

Tabela 4: Comparativo entre modelos de plantas com núcleo rígido

Dados	M02			M04		
	6A-Sonda (2023)	VT2	VT2	8A-Sonda (2023)	VT1	VT2
$\gamma_\theta$	1,101	1,126	1,081	1,087	1,145	1,152
<b>Diferença (%)</b>		2,27%	-1,82%		5,38%	5,94%

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho teve como objetivo modelar e analisar computacionalmente o comportamento estrutural de edifícios esbeltos com plantas regulares e irregulares quanto a influência da presença de vigas de transição sobre os efeitos de rotação de segunda ordem avaliados pelo coeficiente  $\gamma_\theta$  proposto por Franco (2003). Com base nas comparações dos coeficientes  $\gamma_\theta$  obtidos para cada um dos modelos estudados e nas características de cada um deles, foi possível concluir algumas situações:

- Os modelos que possuíam plantas com geometria regular, M01 e M02, para 3 dos 4 casos analisados obtiveram uma diminuição do coeficiente  $\gamma_\theta$ , ou seja, para estes casos a disposição específica da viga de transição aumentou a rigidez da estrutura a esforços de torção de segunda ordem. A maior diminuição do coeficiente  $\gamma_\theta$ , quando comparado com o modelo original foi de -5,46% para o modelo M01-VT1.
- Foi constatado que para modelos semelhantes, diferenciados pela existência de um núcleo rígido, como os modelos M01 e M02 ou M03 e M04, a utilização das vigas de transição proporcionou um aumento no coeficiente  $\gamma_\theta$  para todos os casos analisados. Para estes casos, tem-se que o maior aumento do valor do coeficiente em porcentagem foi para os modelos de planta irregular M03-VT2 e M04-VT2, onde houve o acréscimo 12,27% para o modelo com núcleo rígido.
- Já em relação aos modelos com planta de geometria irregular, M03 e M04, para 3 dos 4 casos analisados a disposição de vigas de transição propiciou um aumento no coeficiente  $\gamma_\theta$ , ou seja, tornou as estruturas mais vulneráveis a efeitos de segunda ordem. O maior valor de aumento para o coeficiente  $\gamma_\theta$  quando comparado ao modelo original foi o do modelo M04-VT2, com 5,94%.
- A comparação entre os modelos que possuíam núcleo rígido M02 e M04 indicou que para 3 dos 4 casos houve um aumento do coeficiente  $\gamma_\theta$  com a disposição das vigas de transição, sendo o maior valor de aumento em relação ao modelo original 5,94% para o modelo M04-VT2.
- Foi observado que os casos em que houve maior variação do coeficiente  $\gamma_\theta$  coincidem com os casos onde houve maior alteração nas coordenadas do centro de torção proposto por Franco (2003). Ainda, os modelos que possuem núcleo rígido foram os que apresentaram menor deslocamento do centro de torção analisado.

### 5.1.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa e análise dos resultados mostram a necessidade de mais estudos sobre os efeitos globais de torção em edifícios. Ainda não há ampla disseminação e aplicação da metodologia para avaliação desses efeitos nos projetos de edifícios no Brasil. Portanto, sugere-se a realização de novas pesquisas para abordar questões importantes no desenvolvimento do tema:

- Avaliar o efeito do coeficiente  $\gamma_{\theta}$  em relação ao coeficiente  $\gamma_z$  para edificações de em função de diferentes disposições de vigas de transição.
- Avaliar a influência do posicionamento de contraventamentos no coeficiente  $\gamma_{\theta}$  em prédios esbeltos.
- Avaliar o comportamento quanto a torção de edifícios com plantas reais.



## 6. REFERÊNCIAS

ALVES, Roger. **Estabilidade global em edifícios: análise comparativa dos efeitos de segunda ordem em um edifício de concreto armado**. 2022.

ANDRADE, Rodrigo Bezerra; NÓBREGA, Petrus Gorgônio Bulhões da. Efeitos de torção de segunda-ordem em edifícios de concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, 2020.

BASTOS, PAULO SÉRGIO. **Vigas de concreto armado**. Bauru: Universidade Estadual de São Paulo, 2017.

CASOTTI, João Caetano. **Diferentes modelos de transição aplicados em um modelo simplificado de edifício de 20 andares em concreto armado e suas implicações no custo da estrutura**. 2016.

CHING, Francis D. K.; ONOUYE, Barry S.; ZUBERBUHLER, Douglas. **Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projeto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman,

CRISAFULLI, F.; REBOREDO, A.; TORRISI, G. Consideration of torsional effects in the displacement control of ductile buildings. **13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, 2004.

FRANCO, Mario. **A torção nos edifícios altos**. Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

KIMURA, Alio Ernesto. **Cálculo de Pilares de Concreto Armado**. Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural, 2008.

KOERICH, B. R.; LORIGGIO, D. D. **Análise da Estrutura com Consideração dos Efeitos Globais de 2ª Ordem Através do Processo P-Delta**. In: ABNT 6118:2014 Comentários e Exemplos de Aplicação, São Paulo: IBRACON, 2015

LACERDA, M. M. S. et al. Avaliação dos critérios para análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado: estudo de caso. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.9, n.2, p.24-37, 201.

LINS, Fernando de Faria Vecchio. **Contribuição à avaliação da estabilidade global e pré-dimensionamento de pórticos planos em concreto pré-moldado**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LONGO, Luiz Filipe. **Vinculação de pilares em vigas de transição**. Disponível em:

MARTINI, Bruno Valar et al. **Confiabilidade estrutural a momentos fletores de vigas de transição protendidas com monocordoalhas engraxadas**. 2020.

RABELO, Bruno Vinhaes. **Análise de uma estrutura de edificação com viga de transição**. 2012.

RIBEIRO, Jairo Fonseca. **Estabilidade global em edifícios: Análise dos efeitos de segunda ordem nas estruturas de concreto**. 2010.

SONDA, Eduardo da Luz. **Análise da influência de vigas de transição sobre os efeitos de segunda ordem globais de torção em edifícios de concreto armado**. 2023.

VIEIRA, Vitor Vinicius Santos; RODRIGUES, S. J.; VELOSO, Luis Augusto Conte Mendes. Análise da estabilidade global de edifícios de concreto armado utilizando o coeficiente  $\gamma_z$ . **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 1113-1140, 2017.

WIGHT, James K. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. 7th edition. Pearson Education, 2016.

WORDELL, Fernando. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos**. 2003.