

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Carlos Vinicius Veloso Schopf

**ANÁLISE DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM DE TOR-  
ÇÃO EM EDIFÍCIOS DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO**

Santa Maria, RS  
2024

**Carlos Vinicius Veloso Schopf**

**ANÁLISE DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO**

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

Orientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS

2024

**Carlos Vinicius Veloso Schopf**

**ANÁLISE DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO**

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

Aprovado em 17 de janeiro de 2024:

---

André Lübeck, Prof. Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Almir Barros da Silva Santos Neto, Prof. Dr. (UFSM)

---

Eduardo da Luz Sonda, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS

2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Fernando Carlos (*in memoriam*) e Maria Amelia por toda a dedicação, amor e afeto que sempre tiveram comigo, pelo incentivo a buscar meus sonhos e enfrentar meus medos.

À minha prima Liane, irmã de coração, pelos anos de convivência em Santa Maria, que tornaram os dias de faculdade mais leves.

À minha namorada Fernanda, por todo amor, carinho e companheirismo de todos os dias, e pela paciência e apoio nesta reta final de graduação.

À Letícia Barcellos, Luan Somavilla e Mauricio Machado, que além de colegas da graduação, se tornaram grandes amigos, deixando a jornada universitária mais tranquila.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Lübeck, pelos ensinamentos, suporte e apoio durante a graduação e período de orientação.

À TQS Informática, pelo fornecimento de uma licença estudantil do programa, possibilitando a realização deste trabalho.

À Technisan Engenharia, por proporcionar uma oportunidade de aprendizado profissional e de atuação na área de cálculo estrutural em estruturas de concreto armado.

Por fim, agradeço à UFSM, por proporcionar desde 1960 um ensino público gratuito e de qualidade.

## RESUMO

### ANÁLISE DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM DE TORÇÃO EM EDIFÍCIOS DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO

AUTOR: Carlos Vinicius Veloso Schopf

ORIENTADOR: André Lübeck

A utilização lajes lisas, ou seja, de ligação direta entre laje e pilar, tem sido uma solução estrutural cada vez mais adotada em obras no Brasil. A escolha por este tipo estrutura se dá pela simplificação de alguns processos construtivos, tais como o recorte e execução de formas, escoramento e concretagem. Além disso, a ausência de vigas proporciona uma maior liberdade arquitetônica, já que estes elementos não condicionam a posição de paredes ou divisórias. Ademais, evita-se a necessidade de furos em vigas para a passagem de tubulações, evitando retrabalhos e patologias. Consequentemente, com a adoção de lajes lisas, há um aumento na velocidade de execução da edificação e uma maior qualidade final. Porém, a estabilidade global é um ponto crítico no dimensionamento deste tipo de edificação, tendo em vista que não há a formação de pórticos realizando o contraventamento, e o equilíbrio da estrutura está condicionado à rigidez das lajes e pilares, somente. A norma brasileira NBR 6118:2023 especifica métodos de avaliação da estabilidade global, e consequentemente dos efeitos globais de segunda ordem apenas para deslocamentos translacionais. Além da falta de recomendação normativa para a consideração de efeitos de torção nas edificações, existem poucos estudos explorando o assunto. Assim, este trabalho analisa, por meio do coeficiente de instabilidade à torção  $\gamma_\theta$ , proposto por Franco (2003), em dez modelos computacionais elaborados com o auxílio do software TQS, simulando edificações de 10 pavimentos. Foram testadas cinco geometrias diferentes, com dois modelos para cada configuração, sendo um deles de tipologia estrutural tradicional, com lajes, vigas e pilares, e outro de lajes lisas, a fim de comparar a diferença no comportamento do parâmetro  $\gamma_\theta$  nas duas versões de cada versão analisada. Os resultados mostram que as edificações de lajes lisas sofrem um aumento no coeficiente de instabilidade à torção, ou seja, os efeitos globais de segunda ordem são mais preponderantes neste tipo de estrutura. Além disso, observou-se uma certa constância nos valores de  $\gamma_\theta$ , tanto nos modelos com vigas quanto nos modelos de lajes lisas, indicando que a presença de um núcleo rígido na edificação é um fator preponderante para a estabilidade global, devido a sua alta rigidez.

**Palavras-chave:** Efeito de torção. Efeito de segunda ordem. Análise estrutural. Estabilidade global de edifícios. Concreto armado.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF GLOBAL SECOND-ORDER TORSIONAL EFFECTS IN BUILDINGS WITH FLAT REINFORCED CONCRETE SLABS

AUTHOR: Carlos Vinicius Veloso Schopf

ADVISOR: André Lübeck

The use of flat slabs, i.e. with a direct connection between the slab and the column, has been a structural solution increasingly adopted in construction projects in Brazil. The choice of this type of structure is due to the simplification of some construction processes, such as the cutting and execution of forms, shoring and concreting. In addition, the absence of beams provides greater architectural freedom, since these elements do not condition the position of walls or partitions. In addition, there is no need to drill holes in beams for pipes, avoiding rework and pathologies. As a result, the use of flat slabs increases the speed of construction and the final quality of the building. However, global stability is a critical point in the design of this type of building, since there are no bracing frames, and the equilibrium of the structure is conditioned to the rigidity of the slabs and columns alone. The Brazilian standard NBR 6118:2023 specifies methods for assessing global stability, and consequently second-order global effects, only for translational displacements. In addition to the lack of normative recommendations for the consideration of torsional effects in buildings, there are few studies exploring the subject. Therefore, this work analyzes the torsional instability coefficient  $\gamma_{\theta}$ , proposed by Franco (2003), in ten computer models developed with the TQS software, simulating 10-storey buildings. Five different geometries were tested, with two models for each configuration, one with a traditional structural typology, with slabs, beams and columns, and the other with flat slabs, in order to compare the difference in the behavior of the  $\gamma_{\theta}$  parameter in the two versions of each version analyzed. The results show that buildings with flat slabs suffer an increase in the torsional instability coefficient, i.e. second-order global effects are more prevalent in this type of structure. In addition, a certain constancy in the  $\gamma_{\theta}$  values was observed in both the beam and flat slab models, indicating that the presence of a rigid core in the building is a preponderant factor for global stability, due to its high rigidity.

**Keywords:** Torsional effect. Second-order effect. Structural analysis. Global stability of buildings. Reinforced concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos de segunda ordem conforme NBR 6118:2023.....	13
Figura 2 - Comparação entre edifício com e sem núcleo rígido .....	14
Figura 3 - Cálculo do centro de torção pelo método gráfico de Franco.....	19
Figura 4 - Determinação do CT por método analítico.....	20
Figura 5 - Comparativo entre grandes e pequenos deslocamentos de rotação .....	21
Figura 6 - Sistemas estruturais torcionalmente restringidos (a) e não restringidos (b) .....	22
Figura 7 - Representação tridimensional do modelo 02CL .....	23
Figura 8 - Planta de formas do modelo 02C.....	25
Figura 9 - Planta de formas do modelo 02CL.....	25
Figura 10 - Planta de formas do modelo 04C.....	26
Figura 11 - Planta de formas do modelo 04CL.....	27
Figura 12 - Planta de formas do modelo 06C.....	28
Figura 13 - Planta de formas do modelo 06CL.....	28
Figura 14 - Planta de formas do modelo 08C.....	29
Figura 15 - Planta de formas do modelo 08CL.....	30
Figura 16 - Planta de formas do modelo 08CI.....	31
Figura 17 - Planta de formas do modelo 08CIL.....	31
Figura 18 - Edifício 02CL submetido a carregamento que gera torção .....	32
Figura 19 - Centro de torção do modelo 02CL .....	33
Figura 20 - Reações verticais nos apoios do edifício .....	34
Figura 21 - Comparativo entre os centros de torção dos modelos 02C e 02CL .....	37
Figura 22 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 04C e 04CL.....	38
Figura 23 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 06C e 06CL.....	39
Figura 24 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 08C e 08CL.....	40
Figura 25 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 08CI e 08CIL.....	41
Figura 26 - Resumo de Resultados para $\gamma\theta$ .....	42
Figura 27 - $\gamma z$ para vento $0^\circ$ e $180^\circ$ .....	44
Figura 28 - $\gamma z$ para vento $90^\circ$ e $270^\circ$ .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades geométricas do modelo 02CL .....	34
Tabela 2 - Resumo de Resultados .....	43

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	JUSTIFICATIVA .....	11
1.2	OBJETIVOS .....	11
1.2.1	Objetivo geral.....	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	ESTABILIDADE GLOBAL .....	13
2.1.1	Estabilidade global em edifícios sem vigas .....	14
2.2	COEFICIENTE $\gamma_z$ .....	15
2.3	COEFICIENTE $\gamma_\theta$ .....	16
2.4	CENTRO DE TORÇÃO.....	18
3	METODOLOGIA .....	23
3.1	Edifícios Estudados.....	24
3.1.1	Modelo 02.....	24
3.1.2	Modelo 04.....	26
3.1.3	Modelo 06.....	27
3.1.4	Modelo 08C .....	29
3.1.5	Modelo 08CI .....	30
3.2	Procedimento de cálculo .....	32
4	RESULTADOS.....	37
4.1	Comparação entre os modelos analisados .....	38
4.1.1	Modelo 04.....	38
4.1.2	Modelo 06.....	39
4.1.3	Modelo 08C .....	40
4.1.4	Modelo 08CI .....	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46

5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	47
REFERÊNCIAS.....	48

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização das cidades, associada também com a disponibilidade de terrenos cada vez menores, força o crescimento verticalizado das zonas urbanas, com edificações cada vez mais altas e esbeltas. Essas características, juntamente com uma corrida cada vez maior para reduzir prazos e ter celeridade nas obras, está popularizando a execução de edificações de lajes lisas, ou seja, edificações que não contam com vigas em sua estrutura, havendo uma ligação direta entre as lajes e os pilares.

Conforme Carvalho e Pinheiro (2009), a utilização de lajes lisas apresenta diversas vantagens, tal como uma maior liberdade arquitetônica, ao proporcionar que a execução de paredes divisórias não esteja condicionada à posição de vigas, tanto de piso quanto de teto. Também há uma simplificação nos processos de execução de formas, escoramento e concretagem, proporcionando maior velocidade construtiva para a obra. Além disso, evita-se a necessidade de furos em vigas para a passagem de tubulações, mitigando assim a chance de ocorrência de patologias relacionadas à esta prática, além de garantir uma maior qualidade final para a obra.

Por outro lado, a utilização desta tipologia estrutural traz algumas desvantagens, ainda conforme Carvalho e Pinheiro (2009), tais como o efeito de punção na ligação laje-pilar, elevação nos deslocamentos transversais dos pavimentos e instabilidade frente as ações horizontais.

Segundo Franco (2003), os efeitos de torção nas edificações, em certos casos, podem ser preponderantes ou até mesmo decisivos para a estabilidade global de uma estrutura. Porém, existe uma grande lacuna de estudos acerca do comportamento de edificações frente aos efeitos de segunda ordem relacionados aos deslocamentos de rotação, incluindo também edificações de lajes lisas.

Além disso, a norma brasileira que trata de estruturas de concreto armado, NBR 6118:2023, em seu capítulo sobre estabilidade global (item 15.5 da referida diretriz), dispõe apenas de métodos para a avaliação dos efeitos de segunda ordem devido à deslocamentos de translação, com os cálculos do parâmetro de instabilidade  $\alpha$  e do coeficiente  $\gamma_z$ , sendo este último o mais utilizado atualmente. Não há recomendação normativa para estimar os efeitos de segunda ordem relacionados à torção.

Levando em conta as ponderações expostas, este trabalho se propõe a avaliar os deslocamentos oriundos dos efeitos de segunda ordem associados à rotação

da edificação, a partir do cálculo do coeficiente  $\gamma_\theta$  proposto por Franco (2003), modelando computacionalmente edifícios de 10 pavimentos e de diferentes geometrias, comparando os resultados obtidos para o coeficiente de instabilidade à torção ( $\gamma_\theta$ ) de um edifício de tipologia estrutural convencional, com lajes, vigas e pilares com o coeficiente  $\gamma_\theta$  obtido para uma edificação de lajes lisas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A motivação para a elaboração do presente trabalho se dá pela escassez de estudos referentes aos efeitos de segunda ordem causados por ações de torção em edificações no geral, e em especial em prédios que contam com o sistema estrutural de ligação direta entre lajes e pilares, com a ausência de vigas aporticando a estrutura, sendo que esta tipologia é cada vez mais comum em obras no Brasil. É necessário ter uma melhor compreensão sobre a estabilidade global deste tipo de edificação frente a ações de torção.

Ademais, a NBR 6118:2023, normativa brasileira para estruturas de concreto armado, não indica nenhuma avaliação para os efeitos de segunda ordem globais de torção, sendo em que alguns casos, estes efeitos podem ser cruciais para o dimensionamento e enrijecimento da estrutura a fim de combater a instabilidade.

Isto posto, o presente trabalho avalia os efeitos de torção em edificações de lajes lisas, que têm como característica deletéria justamente uma maior instabilidade frente a ações horizontais, que podem gerar efeitos de torção nos pavimentos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Comparar, por meio de modelagens computacionais, os efeitos de segunda ordem de torção, a partir do cálculo do coeficiente  $\gamma_\theta$ , em edifícios com e sem vigas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar a influência da geometria da edificação sobre a posição do Centro de Torção (CT);

Analisar a influência da geometria sobre o coeficiente  $\gamma_\theta$ .

Comparar o comportamento do coeficiente  $\gamma_\theta$  para os casos de edificações com e sem vigas;

Calcular o parâmetro  $\gamma_z$  dos modelos estudados, como parâmetro de referência da estabilidade global.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

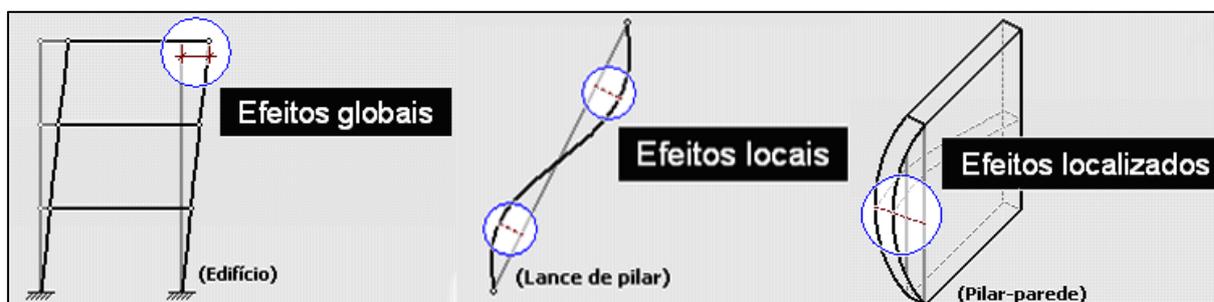
### 2.1 ESTABILIDADE GLOBAL

São chamados de efeitos de primeira ordem aqueles esforços obtidos com a estrutura com sua geometria indeformada, de acordo com Kimura (2018). Contudo, toda ação na estrutura gerará um deslocamento e, a partir daí, surgem esforços adicionais, sendo estes esforços chamados de efeitos de segunda ordem. Pode-se dizer que os efeitos de segunda ordem são proporcionais aos deslocamentos. Quanto mais deslocável for uma edificação, mais proeminentes serão seus efeitos de segunda ordem. Em certos casos, tais efeitos são desprezíveis, como é melhor exemplificado no item 2.1 deste trabalho.

A NBR 6118:2023, em seu item 15.4.1, especifica três tipos de efeitos de segunda ordem geométricos, conforme ilustrado na Figura 1.

Os chamados efeitos globais são aqueles relacionados à deslocabilidade dos nós da estrutura. Já os efeitos locais de segunda ordem referem-se à perda da retilidade do eixo das barras (flambagem). O terceiro tipo de classificação se dá em elementos como os pilares-parede, onde uma região apresenta uma não-retilidade maior do que a do eixo, diz-se que nesta região ocorrem efeitos localizados de segunda ordem.

Figura 1 - Efeitos de segunda ordem conforme NBR 6118:2023



Fonte: Adaptado de Kimura (2018).

A partir da magnitude dos efeitos globais de segunda ordem, pode-se classificar a estrutura conforme sua deslocabilidade. Segundo a NBR 6118:2023, no item 15.4.2, chamam-se estruturas de nós fixos aquelas em que os deslocamentos horizontais são baixos e por isso pode-se desprezar os efeitos globais de segunda ordem.

Enquadram-se como estruturas de nós fixos aquelas que têm esforços de 2ª ordem inferiores a 10% dos efeitos de primeira ordem.

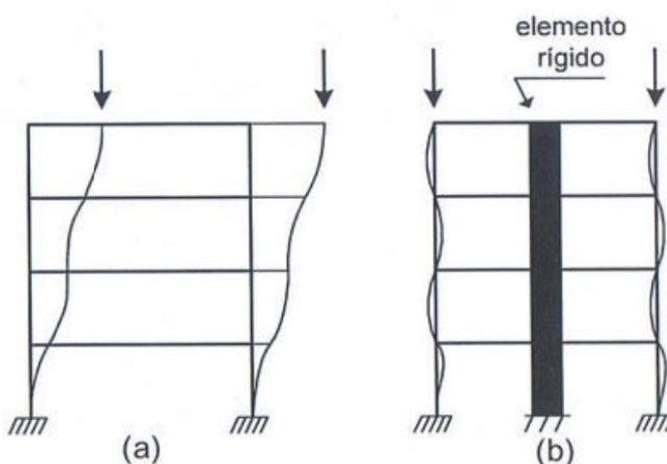
Já aquelas estruturas que têm deslocamentos maiores, gerando assim esforços de segunda ordem de maior grandeza (acima do valor de 10% já citado), são ditas de nós móveis, devendo passar obrigatoriamente por uma análise rigorosa de estabilidade global.

### 2.1.1 Estabilidade global em edifícios sem vigas

A estabilidade global em edifícios de lajes lisas deve ser avaliada cuidadosamente. Devido à ausência de vigas, não há formação de pórticos resistentes, sem a atuação de vigas e pilares contraventando conjuntamente a estrutura. Com isso, a rigidez das lajes, formando o chamado diafragma rígido, se torna fundamental para a estabilidade da edificação.

Pode-se ainda, dispor de elementos especiais de contraventamento, visando diminuir a deslocabilidade desse tipo de edificação. Araújo (2014) preconiza que a inclusão de núcleos rígidos ou pilares-parede, contribui significativamente para atenuar os problemas de deslocabilidade em edifícios de lajes lisas, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Comparação entre edifício com e sem núcleo rígido



Fonte: Araújo (2014).

Buscando avaliar a importância da contribuição da rigidez à flexão das lajes na estabilidade global de edifícios sem vigas, Goulart (2008) testou dois edifícios com

lajes nervuradas contando apenas com vigas de bordo, sendo um deles com um núcleo rígido e outro sem. Além destes, um edifício de estrutura convencional, com lajes, vigas e pilares foi analisado.

O autor adotou diferentes valores de rigidez para os elementos de contraventamento, e demonstrou que as lajes têm grande importância para a estabilidade de edificações sem a presença do efeito pórtico, com uma diminuição significativa nos valores de  $\gamma_z$ , quando comparado com a análise que considerava apenas vigas e pilares atuando para resistir aos carregamentos horizontais.

Na mesma lógica, Gutierre (2016) apurou a influência das lajes para a estabilidade global em edifícios com diferentes soluções estruturais, com a variação da tipologia das lajes entre maciças e nervuradas, a presença ou não de um núcleo rígido, além do efeito pórtico, avaliando quando este ocorre em apenas uma direção da edificação e também quando há contribuição na rigidez em ambos os sentidos.

O estudo foi realizado com dois modelos para cada edifício, sendo que um deles levava em conta apenas a rigidez das vigas e pilares e o outro incluía as lajes na análise. Os resultados mostraram uma melhoria nos parâmetros de estabilidade global a partir da inclusão da rigidez das lajes no modelo, especialmente em estruturas não aporticadas.

Igualmente, Feitosa (2016) avaliou a importância de uma série de parâmetros e critérios relacionados à estabilidade das edificações de laje lisas, tais como a rigidez das ligações entre vigas e pilares, espessura das lajes e dos núcleos-rígidos, contribuição das lajes para a rigidez à flexão transversal, dentre outros. Pode-se destacar a importância da espessura das lajes, bem como dos núcleos rígidos para a estabilidade da edificação. Além disso, a inclusão da rigidez à flexão das lajes na modelagem, contribuiu significativamente para reduzir os parâmetros de instabilidade.

## 2.2 COEFICIENTE $\gamma_z$

Franco e Vasconcellos (1991) introduziram um método para avaliar a sensibilidade de um edifício aos deslocamentos translacionais sem a necessidade de realizar-se uma análise de segunda ordem, trata-se do parâmetro  $\gamma_z$ .

O processo é feito calculando-se um momento de tombamento ( $M_{1,tot,d}$ ), que é o somatório dos momentos gerados na base da estrutura considerando as ações

horizontais de cálculo atuantes, considerando-se uma determinada combinação para o estado limite último.

Em seguida, calcula-se a parcela adicional de momento ( $\Delta M_{tot,d}$ ) atuando na estrutura, fazendo-se o somatório do produto entre as ações verticais atuantes em cada elemento de contraventamento e o respectivo deslocamento gerado pela análise de primeira ordem, citada anteriormente.

A equação para o cálculo do coeficiente é a seguinte:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (1)$$

O coeficiente  $\gamma_z$  é válido para estruturas reticuladas de mais de quatro pavimentos, de acordo com o item 15.5.3 da NBR 6118:2023. Considera-se que os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados quando  $\gamma_z < 1,10$ , ou seja, os efeitos de segunda ordem são inferiores a 10% dos efeitos de primeira ordem calculados.

O limite para a utilização do método de cálculo do  $\gamma_z$  é de 1,30. Estruturas que resultem em valores acima deste limite devem ter sua estabilidade global analisada por um método mais refinado.

Além disso, o coeficiente de instabilidade à translação  $\gamma_z$  pode ser utilizado, com boa aproximação, como majorador das ações horizontais, a fim de levar em conta os efeitos de segunda ordem. Caso  $1,10 < \gamma_z < 1,30$ , o item 15.7.2 da NBR 6118:2023 prescreve que as ações horizontais atuantes na estrutura devem ser multiplicadas por  $0,95 \cdot \gamma_z$ .

### 2.3 COEFICIENTE $\gamma_\theta$

Similar ao parâmetro  $\gamma_z$ , Franco (2003) desenvolveu o chamado “coeficiente de instabilidade à torção”, de sigla  $\gamma_\theta$ , a partir do conceito de centro de torção, que será pormenorizado no item 2.4 do presente trabalho. Conforme o autor, este fator permite, de maneira simplificada, apenas com uma análise de primeira ordem, avaliar a suscetibilidade da estrutura aos efeitos torcionais, indicando se os efeitos de segunda ordem à torção são significativos.

O cálculo do parâmetro  $\gamma_\theta$  se dá pela comparação da rotação de primeira ordem na estrutura e a rotação final da mesma, considerando o incremento das rotações, causado pelos efeitos de segunda ordem relacionados ao giro inicial. Dessa maneira, conforme Franco (2003), o coeficiente  $\gamma_\theta$  serve também para fins de majoração dos efeitos de primeira ordem, porém sua aplicação prática ainda carece de maiores estudos a fim de se determinar uma rotina prática de análise.

O cálculo do coeficiente de instabilidade à torção de Franco (2003) é dado pela seguinte equação:

$$\gamma_\theta = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_t}{M_{t,I}}} \quad (2)$$

Sendo:

$\Delta M_t$  acréscimo de momentos devido aos deslocamentos rotacionais de primeira ordem

$M_{t,I}$  momento total de primeira ordem de torção

A fim de analisar os efeitos de segunda ordem devidos à torção, Sonda (2023) estudou edificações de diferentes geometrias, alturas e posicionamentos de elementos de elevada rigidez. Foram testadas seis geometrias diferentes, por meio do cálculo do parâmetro  $\gamma_\theta$  proposto por Franco (2003).

Como resultados, Sonda (2023) destaca que existe uma maior sensibilidade aos efeitos de torção em edificações de maior altura. Além disso, a presença de um elemento de alta rigidez contribuiu para a diminuição dos valores de  $\gamma_\theta$ . O autor também avaliou a possibilidade de haver uma correlação entre os parâmetros  $\gamma_\theta$  e  $\gamma_z$ , o que não se confirmou, indicando que os efeitos de torção não devem ser menosprezados.

Da mesma maneira, Weide (2023) avaliou a influência da inclusão de vigas de transição em edificações de concreto armado nos efeitos de segunda ordem relacionados à torção. O coeficiente  $\gamma_\theta$  foi calculado para 4 modelos de edificações diferentes, sendo duas de geometria regular e duas de geometria irregular, variando nos modelos a presença de um núcleo rígido e também o posicionamento da viga de transição.

Nos modelos de geometria regular, a mudança na rigidez proporcionada pela viga de transição leva a uma redução nos valores de  $\gamma_\theta$ . Porém, quando comparados os modelos com e sem núcleo rígido, a sensibilidade das estruturas com pilares-parede e vigas de transição é maior. Além disso, nos modelos de geometria irregular, houve um aumento dos coeficientes  $\gamma_\theta$ . Destaca-se também que as maiores variações na sensibilidade à torção ocorrem nos modelos em que há uma maior alteração no posicionamento do centro de torção proposto por Franco (2003).

## 2.4 CENTRO DE TORÇÃO

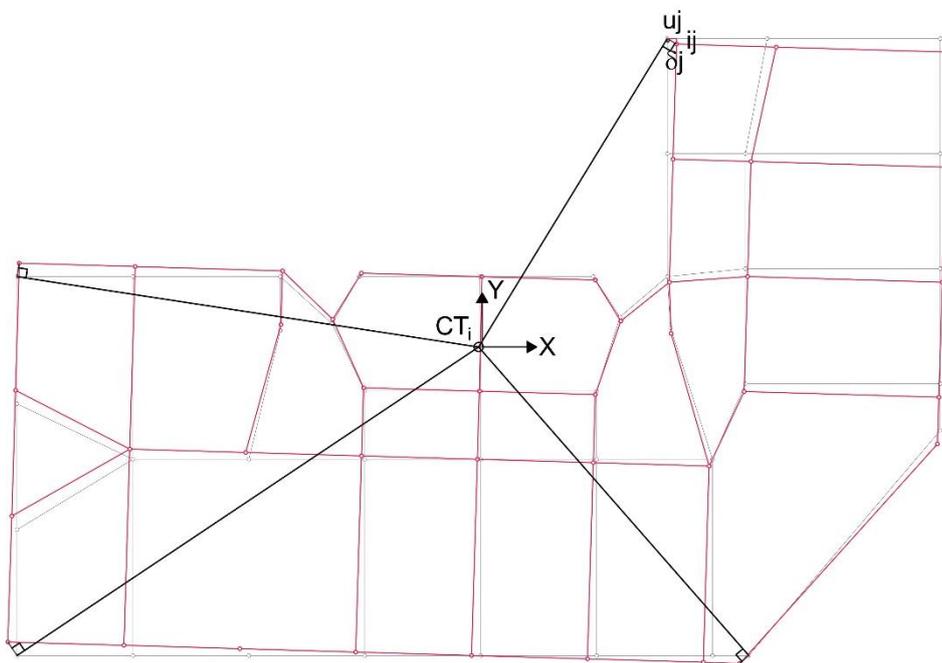
Ao aplicar-se um binário ou um momento de torção pura em um determinado pavimento de uma edificação, haverá um único ponto que não sofrerá deslocamentos rotacionais de corpo rígido, apenas deslocamentos translacionais. Chama-se este ponto de centro de torção (CT).

Conforme Andrade (2018), a posição do CT pode ser definida como um “ponto médio” entre os elementos de contraventamento da edificação, dependendo da rigidez de cada um destes elementos. Ainda segundo o autor, o centro de torção pode ser deslocado para uma determinada região, caso haja concentração de elementos de elevada rigidez nessa região.

Segundo Franco (2003), naqueles edifícios de geometria regular, um eixo de torção vertical pode ser obtido de maneira simplificada, com boa aproximação, pela adoção de uma reta vertical correspondente à média dos centros de torção de cada pavimento. Ao sofrer ações torcionais, o edifício tende a rotacionar em torno desse eixo de torção. Além disso, os carregamentos horizontais, podem ser decompostos em três parcelas aplicadas no CT, sendo elas:  $F_x$  e  $F_y$ , provocando deslocamentos translacionais em  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $M_z$ , provocando rotações em  $z$ . Sendo  $z$  a direção vertical da altura da edificação.

O centro de torção, a partir do método proposto por Franco (2003), pode ser calculado de forma gráfica após uma modelagem computacional. Impõe-se um carregamento de torção pura em um pavimento da edificação e analisa-se os deslocamentos de dois nós desse pavimento. De acordo com o autor, o CT está localizado na intersecção entre duas retas, sendo elas perpendiculares ao deslocamento dos nós analisados, como é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Cálculo do centro de torção pelo método gráfico de Franco



Fonte: Adaptado de Franco (2003).

Este método pode ser ainda adaptado para um cálculo analítico, como demonstrou Andrade (2018), considerando o ângulo de rotação formado pelo deslocamento de cada nó e as relações trigonométricas de sua posição no pavimento, conforme a Figura 4.

Partindo do pressuposto de que os nós analisados estão distantes a mesma altura  $h$  do centro de torção, tem-se que:

$$a \times \text{sen } \theta_1 = b \times \text{sen} \theta_2 \quad (3)$$

$$a \times \text{cos} \theta_1 = a' \quad (4)$$

$$b \times \text{cos} \theta_2 = b' \quad (5)$$

$$c = a' + b' \quad (6)$$

Isolando o coeficiente  $b$ , obtém-se:

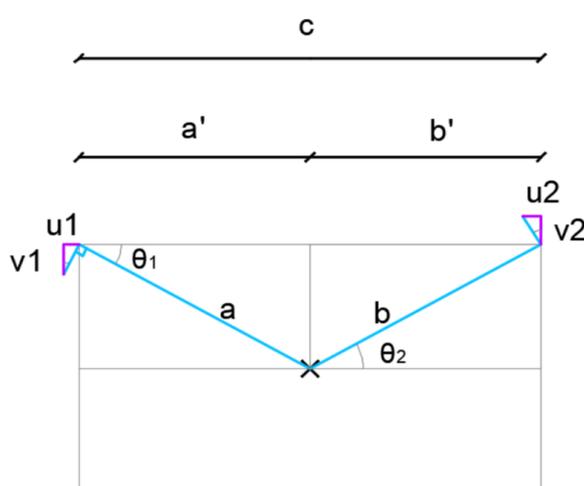
$$b = \frac{a \times \text{sen} \theta_1}{\text{sen} \theta_2} \quad (7)$$

Substituindo a equação (7) na equação (6) e manipulando algebricamente, chega-se a:

$$a = \frac{c \times \text{sen}\theta_2}{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)} \quad (8)$$

Sendo  $c$  a distância conhecida entre os pilares analisados, pode-se encontrar o valor de  $a$  e sua direção em relação a um pilar de coordenadas conhecidas, ou seja, a posição do centro de torção.

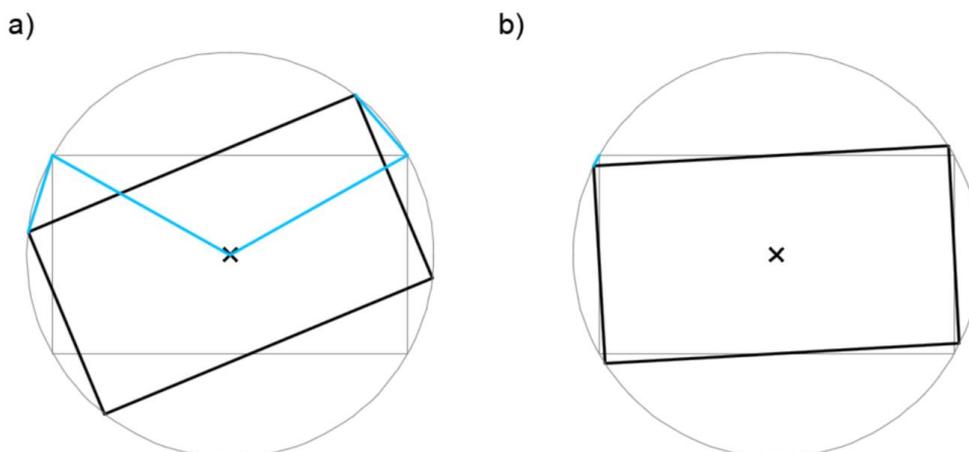
Figura 4 - Determinação do CT por método analítico



Fonte: Andrade (2018).

O método gráfico de Franco (2003) é válido apenas para pequenos deslocamentos, pois adota-se uma hipótese simplificadora, considerando que os mesmos são perpendiculares à reta que passa pelo centro de torção, conforme já citado anteriormente. Em grandes deslocamentos, essa premissa não é válida, como mostra-se na Figura 5, já que o deslocamento é na verdade secante à trajetória de rotação, o que implica que o ângulo entre o deslocamento analisado e a reta que passa pelo CT não é reto, como postulado por Andrade (2018).

Figura 5 - Comparativo entre grandes e pequenos deslocamentos de rotação



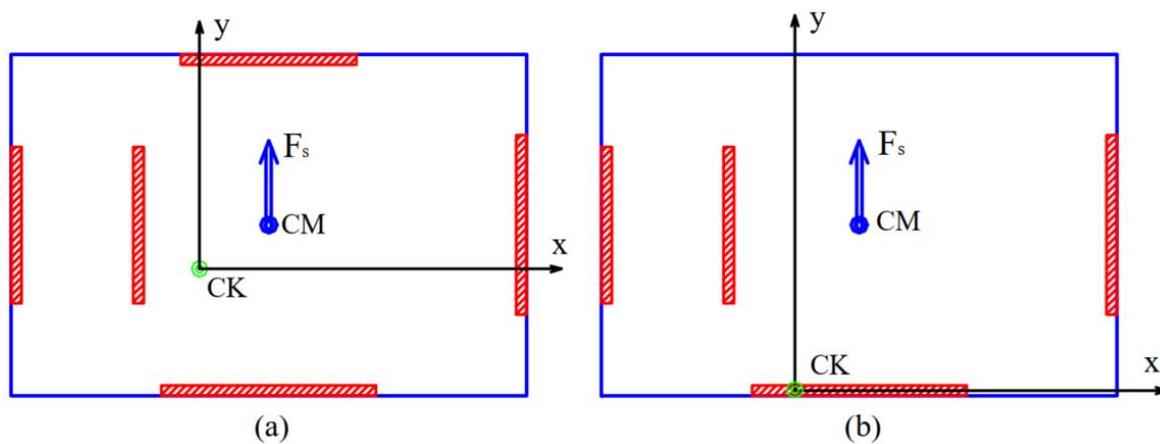
Fonte: Andrade (2018).

Ainda sobre o centro de torção, estudos mostram que a inclusão de elementos especiais de contraventamento, tais como pilares-parede e núcleos rígidos, tendem a deslocar a posição do CT, devido à elevada rigidez destes elementos.

Crisafulli *et al.* (2004), ao avaliar a resposta de edificações frente ações de torção geradas por sismos, classificam os sistemas estruturais em duas classes, conforme sua capacidade de limitar as rotações dos pavimentos: Torcionalmente restrin- gidas e torcionalmente não restrin- gidas, de acordo com a resposta inelástica da es- trutura.

A classificação, como se exemplifica na Figura 6, se dá de acordo com a ex- centricidade existente entre o centro de massas e o centro de rigidez, respectivamente chamados de CM e CK pelos autores, sendo que estruturas com maiores excentrici- dades, causadas pelas assimetrias nos elementos de contraventamento, têm menor capacidade de combater as rotações causadas pela torção de seus pavimentos.

Figura 6 - Sistemas estruturais torcionalmente restringidos (a) e não restringidos (b)

Fonte: Crisafulli *et al.* (2004)

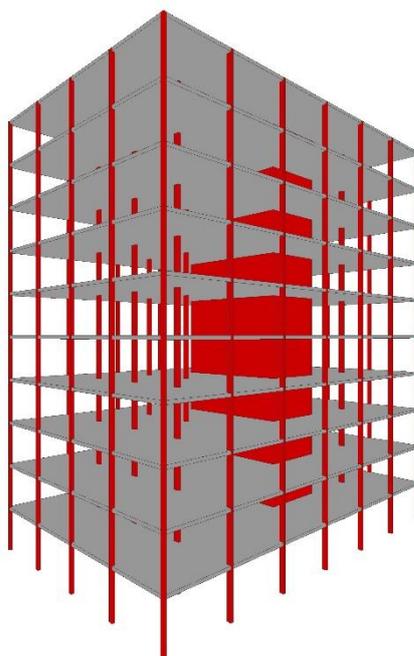
Acerca da magnitude dos deslocamentos de rotação de edifícios sujeitos à torção, Özmen *et al.* (2014) afirmam que as rotações variam conforme o posicionamento do núcleo rígido, atingindo maiores valores quando estes se localizam mais distantes do centro de massas.

### 3 METODOLOGIA

Foram estudados edifícios com 5 configurações geométricas distintas, baseados nos modelos 02, 04, 06 e 08 originalmente propostos por Sonda (2023), sendo três deles de planta com geometria regular e dois com geometria em formato de L.

A fim de comparar o comportamento à torção das edificações, foram executados dois modelos para cada geometria, sendo um deles de tipologia estrutural convencional, com lajes, vigas e pilares, e outro de lajes lisas, sem vigas, com ligação direta entre laje e pilar. Uma representação tridimensional do modelo 02, sem vigas, pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Representação tridimensional do modelo 02CL



Fonte: Autor (2024).

Apesar das ações do vento não serem necessárias para o cálculo do coeficiente de instabilidade à torção, as mesmas foram calculadas automaticamente pelo software TQS, a fim de possibilitar o cálculo do parâmetro  $\gamma_z$  e utilizá-lo como um parâmetro balizador da estabilidade global das edificações analisadas, tendo em vista que este é um método vastamente utilizado.

Devido à alta deslocabilidade dos modelos sem vigas, todos os modelos deste estudo contam com 10 pavimentos, com 3 metros de distância entre pisos, totalizando

30 metros de altura total. Como Sonda (2023) testou apenas a geometria 02 com 10 pavimentos, os demais edifícios foram criados baseando-se no pré-dimensionamento de pilares que o referido autor realizou para aquele modelo, contando com seções transversais de 20x25cm, 20x35cm e 20x45cm, além do núcleo rígido, em formato de “E”, com medidas de aproximadamente 10m de comprimento, 5m de largura e espessura de 20cm em cada parede.

As vigas, para aqueles modelos que contam com este elemento, têm seção transversal de 20x40cm. As lajes maciças tiveram sua altura definida conforme o tipo do edifício: em modelos com vigas, utilizou-se 12cm; em modelos lisos, adotou-se uma espessura de 20cm. Para este último caso, espessuras menores resultavam em situações em que o dimensionamento dos elementos não seria possível.

Em todos os elementos de lajes foi adicionada uma carga uniformemente distribuída de 2,5kN/m<sup>2</sup>, além do peso-próprio, calculado automaticamente pelo software TQS. Para todos os elementos estruturais dos modelos estudados, utilizou-se uma resistência característica à compressão do concreto de 35MPa.

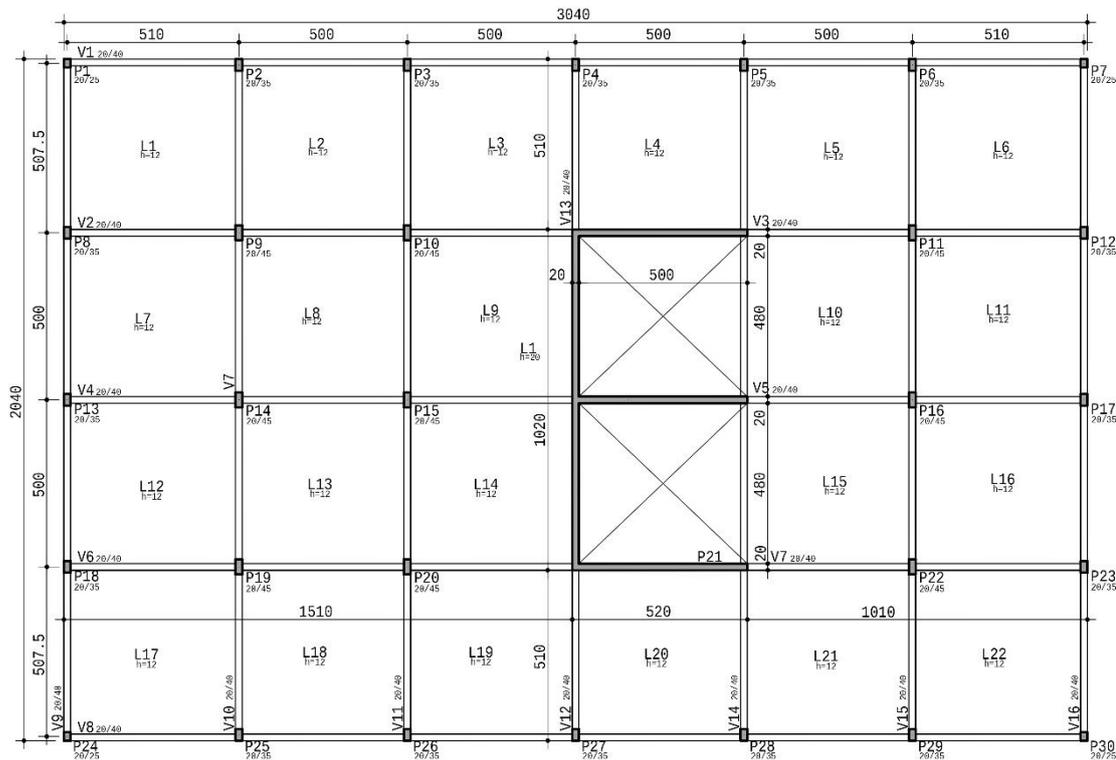
Ainda sobre a modelagem dos edifícios, a fim de considerar as lajes como parte contribuinte na absorção dos esforços horizontais, foi utilizado o modelo VI de análise do software TQS, discretizando as mesmas no pórtico espacial. Além disso, os pilares-parede presentes nos modelos tiveram suas barras discretizadas, a fim de simular mais fielmente o comportamento dos esforços.

### 3.1 Edifícios Estudados

#### 3.1.1 Modelo 02

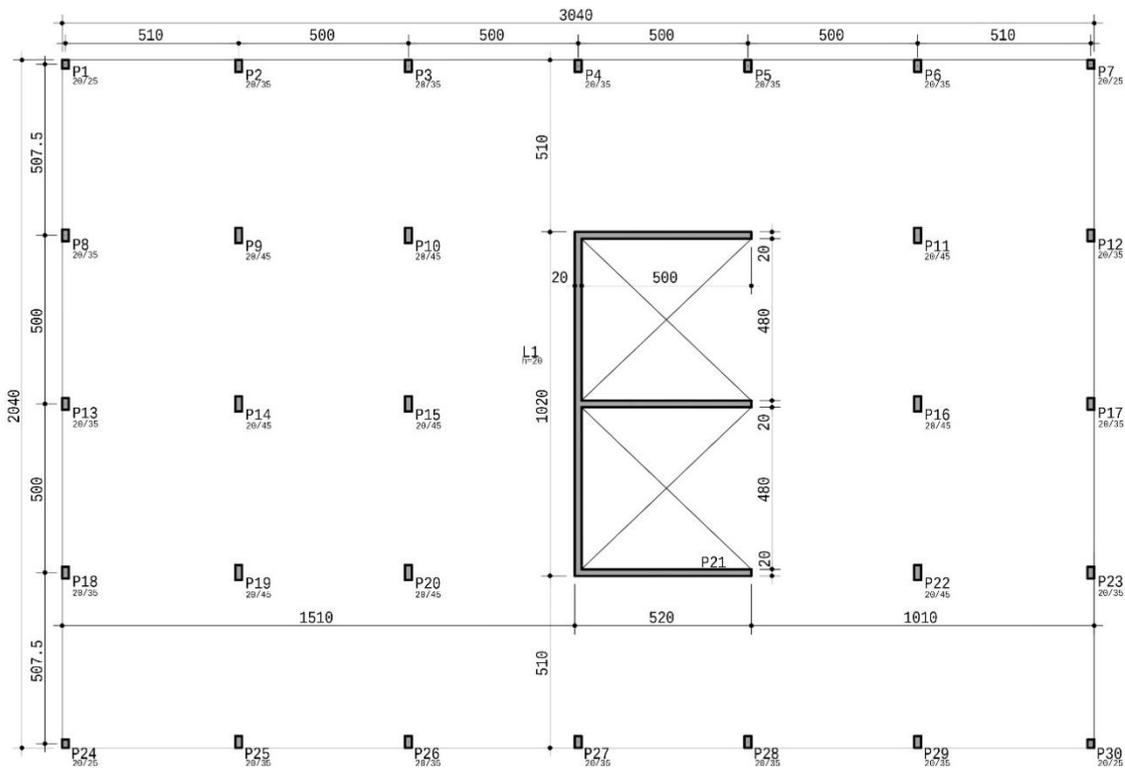
O modelo 02, que tem sua planta de formas da versão com vigas mostrada na Figura 8, e a versão de lajes lisas apresentada na Figura 9, apresenta um núcleo rígido no interior de sua planta, aproximadamente centralizado. Para o caso de torção pura, foram adicionadas cargas pontuais no plano do pavimento, na direção  $y$  (sistema de coordenadas cartesiano), em planta, com o valor de 10kN, nos pilares P1 e P30, formando um binário de forças. Para o cálculo do centro de torção, analisou-se o deslocamento dos pilares P1 e P7.

Figura 8 - Planta de formas do modelo 02C



Fonte: Adaptado de Sonda (2023).

Figura 9 - Planta de formas do modelo 02CL

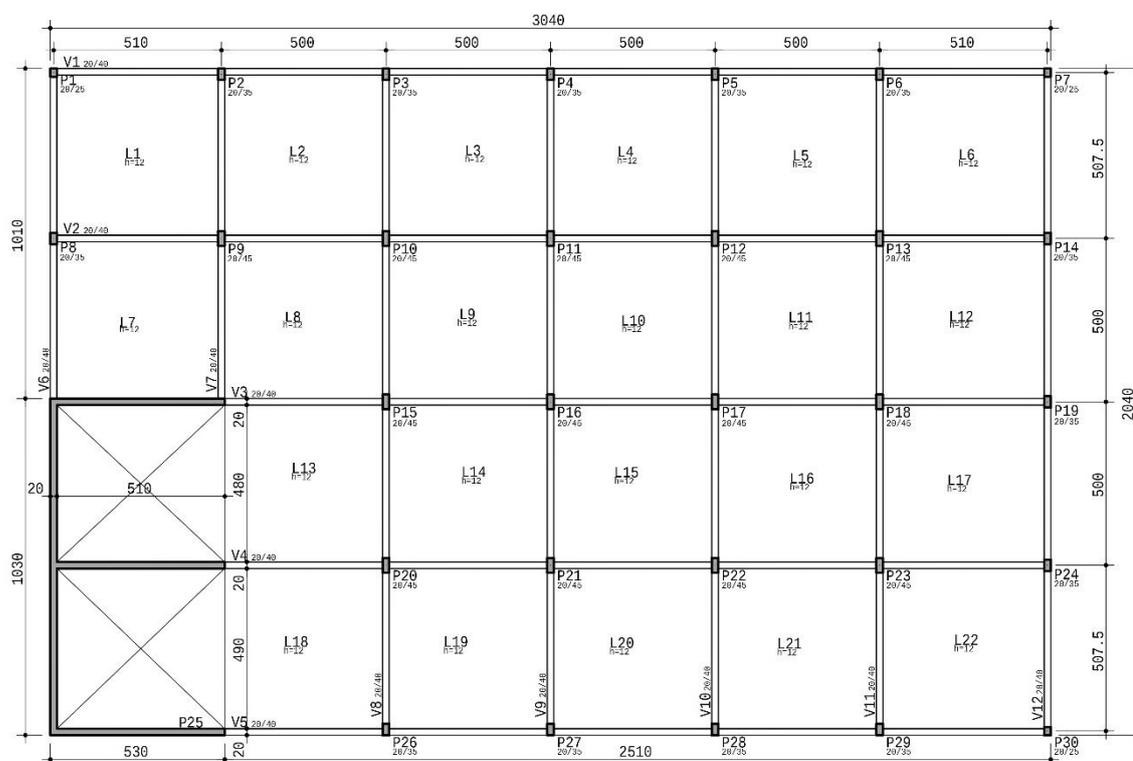


Fonte: Autor (2024).

### 3.1.2 Modelo 04

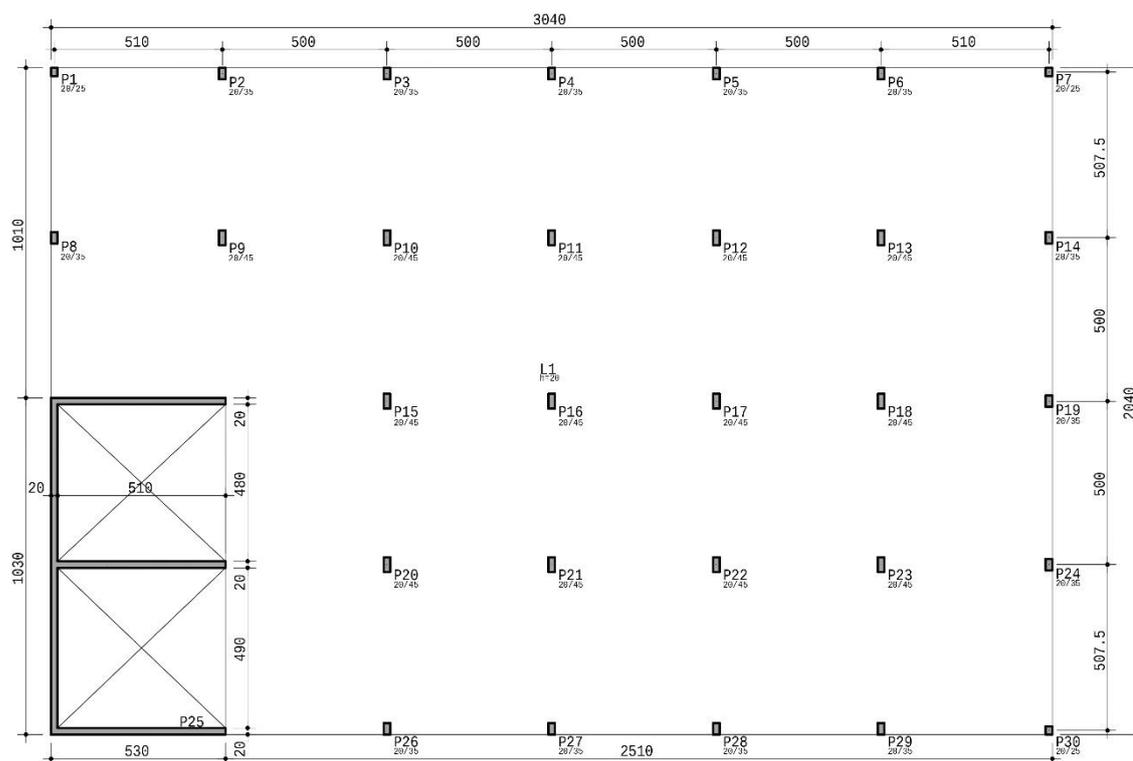
O modelo 04 dispõe de um núcleo rígido posicionado na extremidade da edificação, como pode ser visualizado na Figura 10 e na Figura 11. O mesmo apresenta pequenas diferenças na sua geometria, para alinhar o eixo de suas abas com o eixo das linhas de pilares. Similarmente ao modelo 02, o binário de forças de 10kN foi aplicado nos pilares P1 e P30. A análise dos deslocamentos para o cálculo do CT também se deu nos pilares P1 e P7.

Figura 10 - Planta de formas do modelo 04C



Fonte: Autor (2024).

Figura 11 - Planta de formas do modelo 04CL

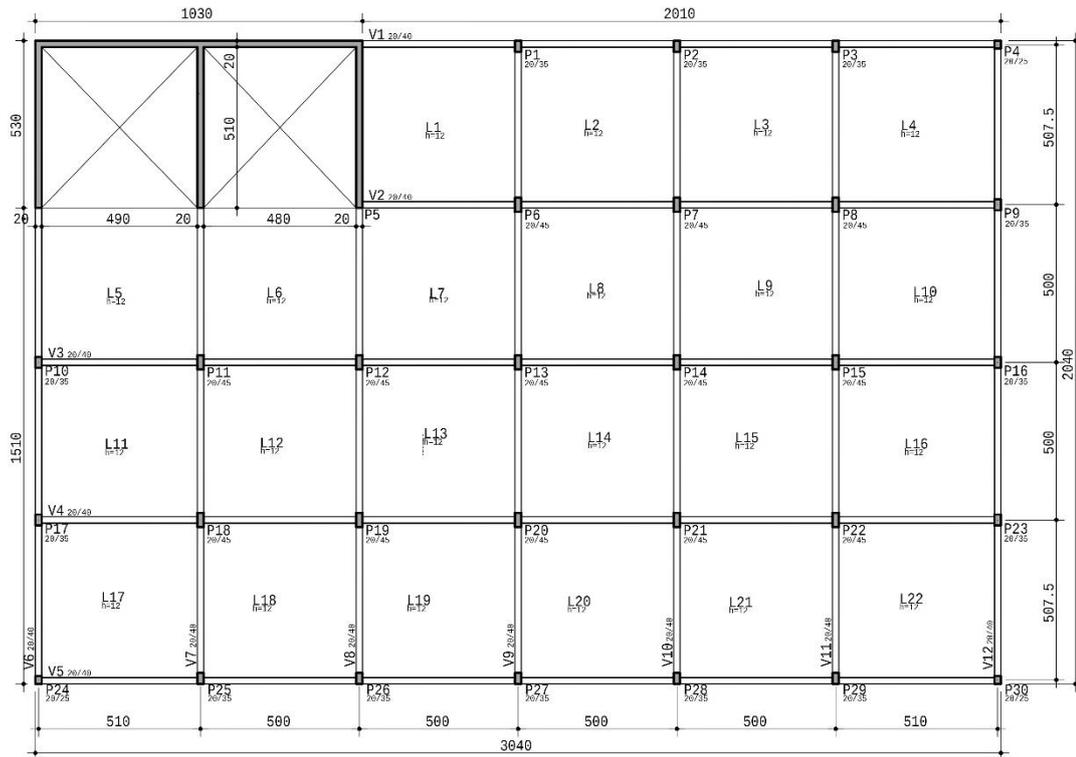


Fonte: Autor (2024).

### 3.1.3 Modelo 06

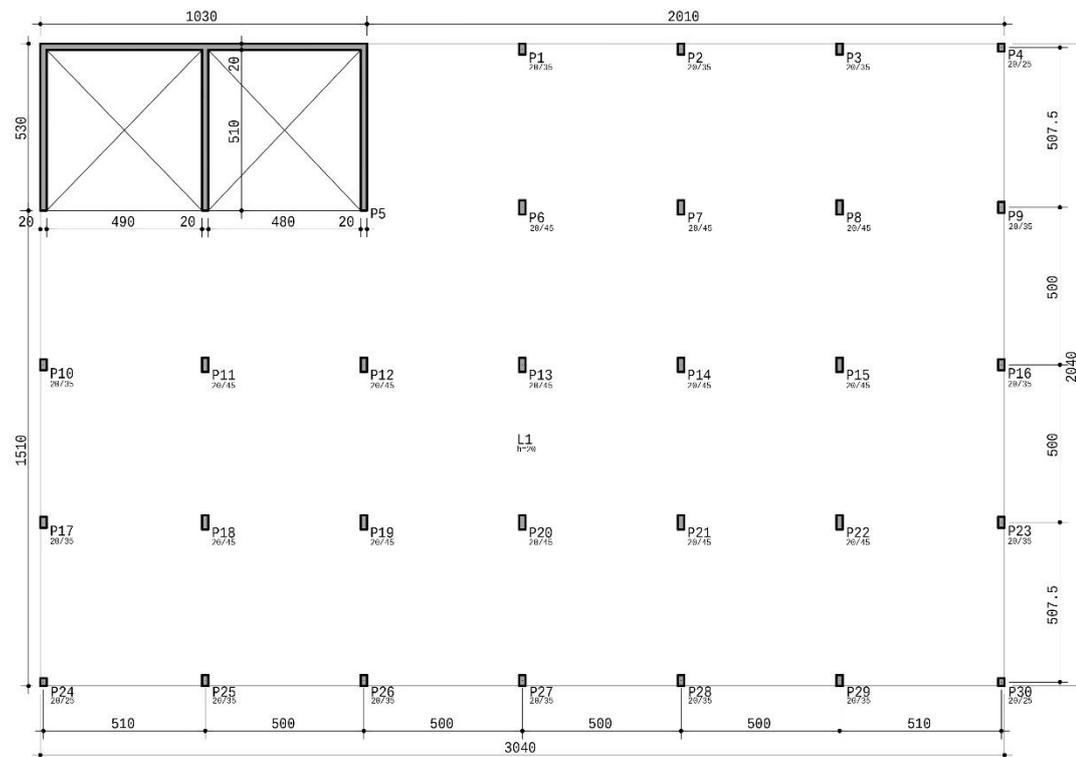
No modelo 06, o núcleo rígido também está posicionado na extremidade, mas desta vez rotacionado 90° em relação ao modelo 04, conforme mostram as plantas de formas da versão com vigas (Figura 12) e do modelo sem vigas (Figura 13). Para este modelo, aplicaram-se as cargas de 10kN nos pilares P1 e P30, utilizando-se os deslocamentos dos pilares P1 e P4 para o cálculo do CT.

Figura 12 - Planta de formas do modelo 06C



Fonte: Autor (2024).

Figura 13 - Planta de formas do modelo 06CL

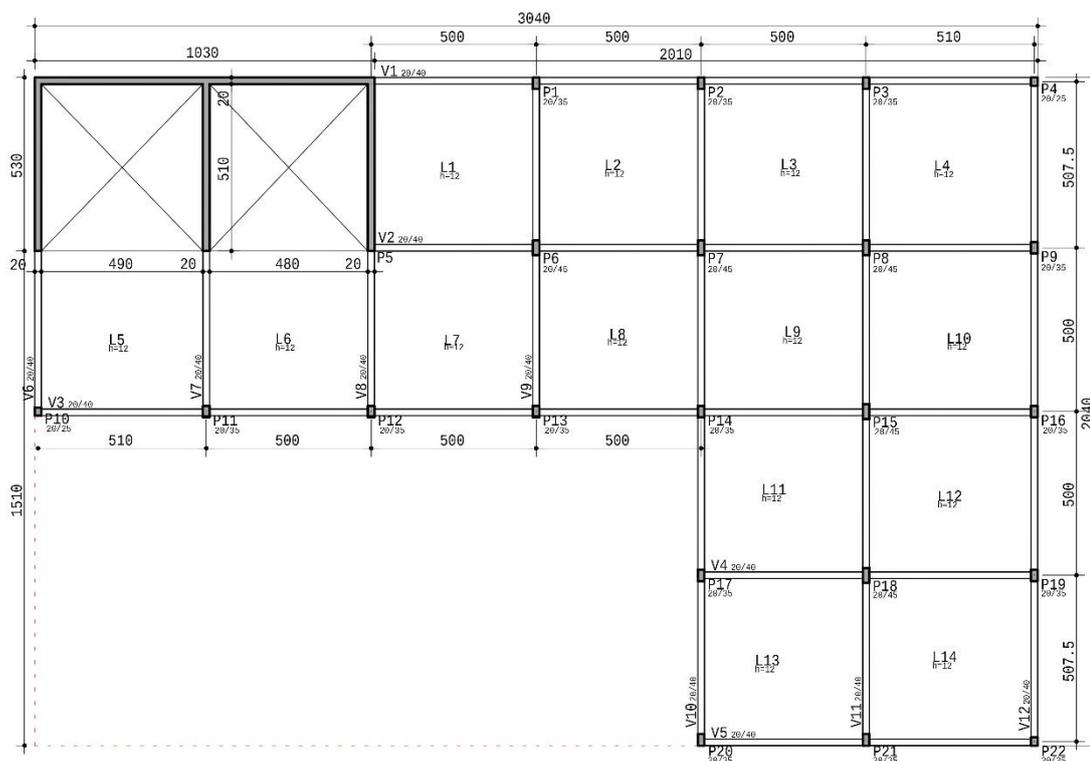


Fonte: Autor (2024).

### 3.1.4 Modelo 08C

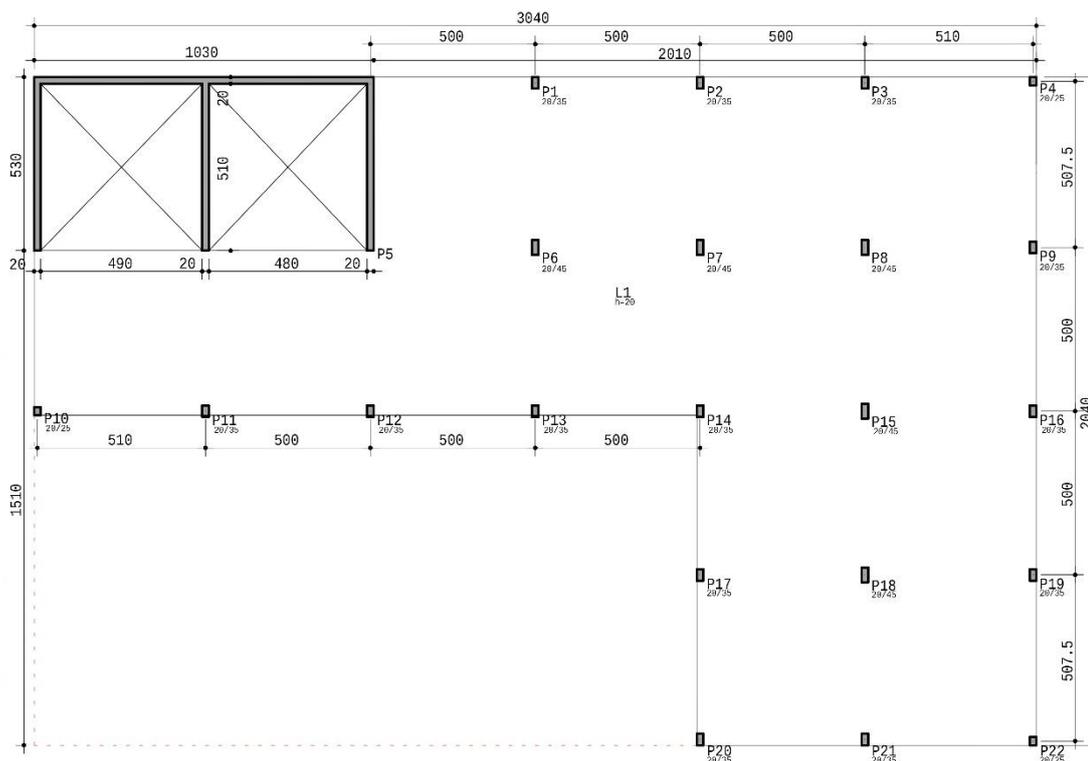
Para o modelo 08C, o núcleo rígido, o ponto de aplicação do binário de forças e a análise dos deslocamentos dos nós dos pilares para o cálculo do centro de torção foi feita de maneira análoga ao modelo 06. A diferença entre os edifícios está na geometria, já que o modelo 08 apresenta formato de L em sua planta, conforme é mostrado na Figura 14 e Figura 15, para os casos com e sem vigas, respectivamente. De acordo com Franco (2002), geometrias irregulares podem apresentar elevadas componentes de torção, com seus efeitos tornando-se importantes e/ou decisivos para a estabilidade da edificação.

Figura 14 - Planta de formas do modelo 08C



Fonte: Autor (2024).

Figura 15 - Planta de formas do modelo 08CL

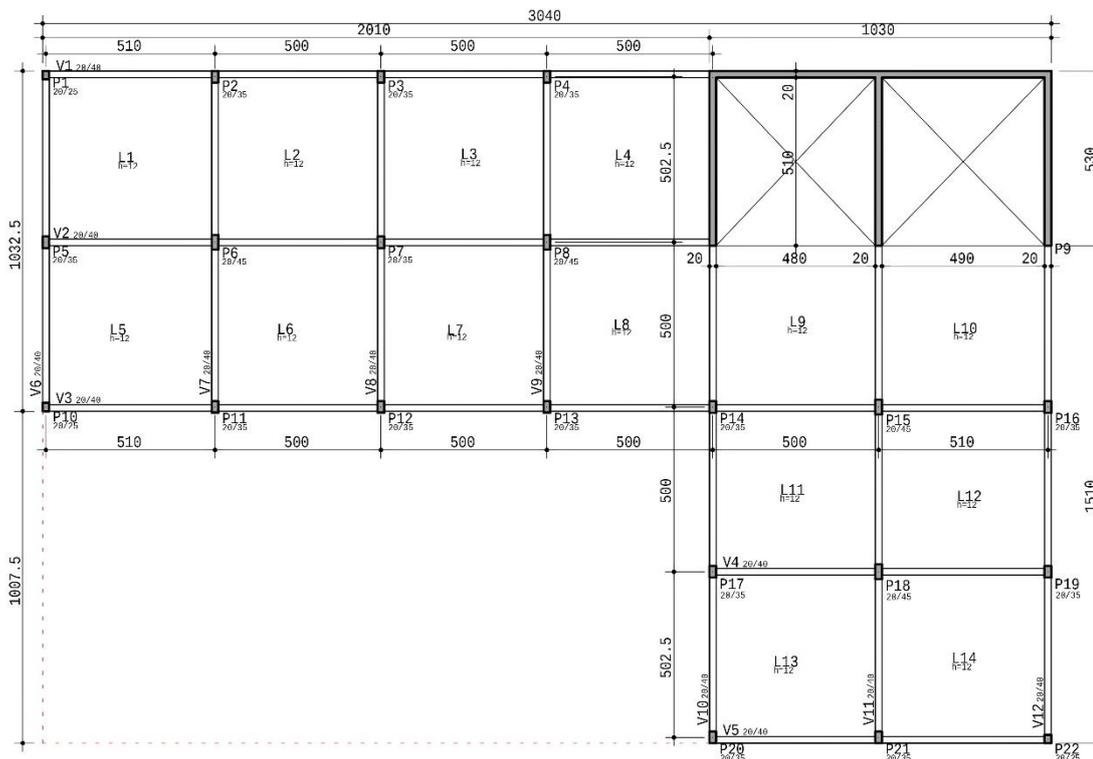


Fonte: Autor (2024).

### 3.1.5 Modelo 08CI

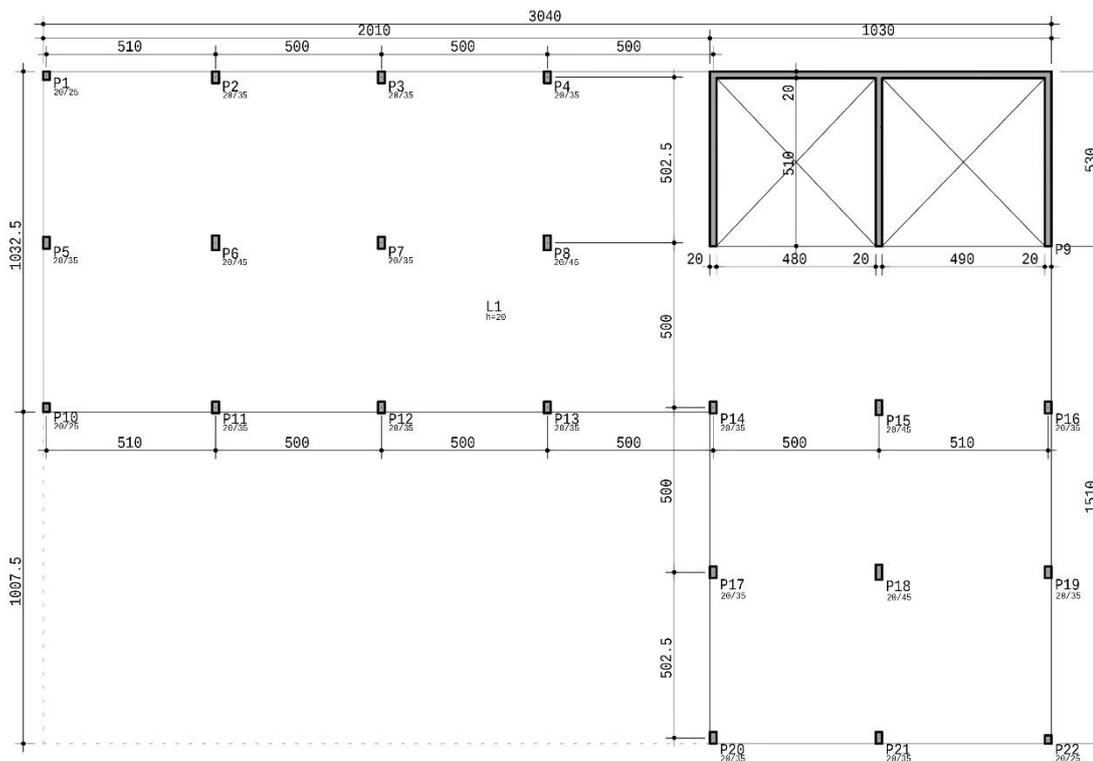
O último modelo analisado também apresenta geometria em L, tal qual o edifício anteriormente citado. Porém, nesta versão, mudou-se a posição do núcleo rígido para a extremidade superior direita do pavimento, conforme pode ser visualizado na Figura 16 e Figura 17, para os casos com e sem vigas, respectivamente. Aplicou-se um binário de forças nos pilares P1 e P22, e avaliou-se o deslocamento dos pilares P1 e P4 a fim de encontrar a posição do centro de torção da edificação.

Figura 16 - Planta de formas do modelo 08CI



Fonte: Autor (2024).

Figura 17 - Planta de formas do modelo 08CIL

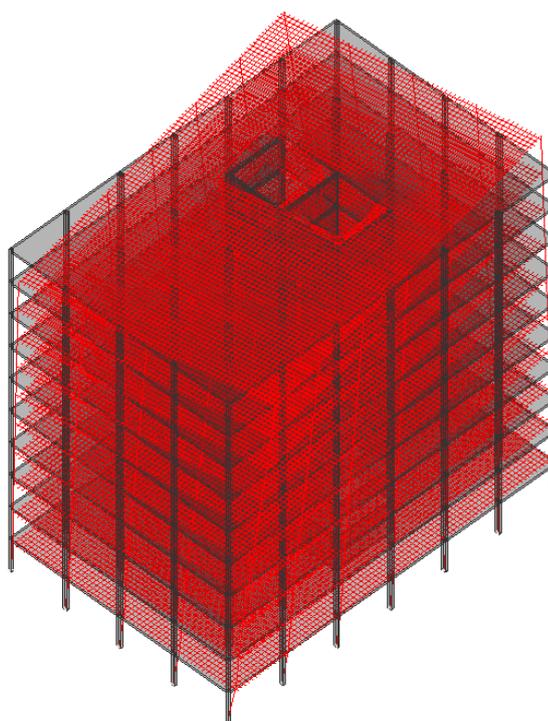


Fonte: Autor (2024).

### 3.2 Procedimento de cálculo

Exemplifica-se aqui o cálculo do parâmetro  $\gamma_\theta$  a partir do software TQS, para o edifício 02CL. O procedimento é similar para o restante dos modelos analisados. Deve-se calcular o centro de torção do edifício por meio do método gráfico proposto por Franco (2003), criando para tal um caso adicional de carregamentos no programa, para permitir a aplicação de um binário que gere deslocamentos de torção pura no edifício. A configuração deformada deste carregamento especial é mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Edifício 02CL submetido a carregamento que gera torção



Fonte: Autor (2024).

Para a obtenção da posição do centro de torção (CT), deve-se traçar uma linha que represente a trajetória de um nó da estrutura. Para tanto, deve-se acessar o relatório gerado de esforços e deslocamentos gerado pelo software TQS, através do caminho *Sistemas > Pórtico-TQS > Relatórios > Processamento de Esforços* e então selecionar o arquivo chamado "FOR0001SE.POR". Ressalta-se que este relatório é gerado apenas ao habilitar as quatro opções disponíveis ao acessar o caminho: *Edifício > Editar > Critérios > Pórtico espacial > Listagem*.

Obtidos os deslocamentos dos nós correspondentes ao topo dos pilares P1 e P7, decompostos em suas parcelas X e Y no relatório supracitado, com auxílio do CAD-TQS, desenha-se estas componentes e conseqüentemente a trajetória percorrida pelo pilar, ao realizar a união entre as parcelas do vetor.

Feito isso, deve-se traçar uma linha perpendicular ao deslocamento do nó, e a intersecção obtida entre as retas perpendiculares aos nós analisados é a coordenada de rotação nula, ou seja, o centro de torção. O CT do modelo 02CL é mostrado na Figura 19.

Com a posição do centro de torção definida, pode-se calcular o raio de giração das massas do pavimento, em outras palavras, o somatório do produto da reação vertical de cada pilar pela distância do baricentro dos pilares até o centro de torção, dado pela equação:

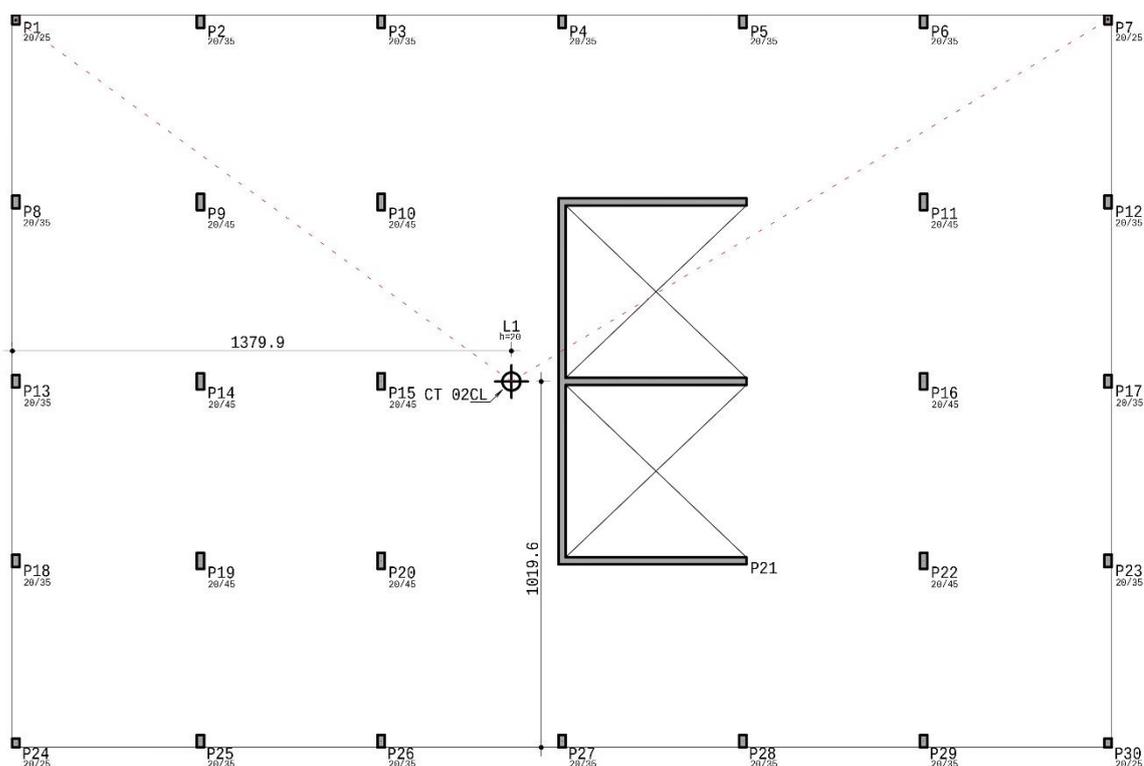
$$r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r P_j \cdot R_j^2}{\sum_{j=1}^r P_j}} \quad (9)$$

Sendo:

$P_j$  reação vertical no pilar analisado

$R_j$  distância do baricentro do pilar analisado até o centro de torção

Figura 19 - Centro de torção do modelo 02CL



Fonte: Autor (2024).

Para obter-se as reações verticais nos apoios, ou seja, as cargas na base dos pilares, chamadas de  $P_j$ , consulta-se o relatório de esforços gerado pelo software citado anteriormente, procurando pelas forças  $F_z$ , como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Reações verticais nos apoios do edifício

-----REAÇÕES DOS APOIOS (Tf m) NC. 1 Todas permanentes e acidentais dos pavim---						
no	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	0.19	-0.08	39.76	0.10	0.18	0.00
2	-0.09	-0.93	107.82	0.96	-0.10	0.00
3	0.02	-0.83	97.19	0.84	0.01	0.00
4	-0.08	-0.65	92.23	0.64	-0.09	0.00
5	-0.01	-0.60	84.75	0.59	-0.02	0.00
6	0.11	-0.83	105.02	0.80	0.10	0.00
7	-0.21	-0.13	41.79	0.11	-0.22	0.00
8	0.32	0.15	94.17	-0.10	0.32	0.00
9	-0.17	0.06	229.48	0.02	-0.17	0.00
10	-0.06	0.12	199.87	-0.07	-0.06	0.00
11	0.07	0.02	235.68	-0.08	0.07	0.00
12	-0.32	0.05	90.39	-0.10	-0.32	0.00
13	0.30	0.30	87.16	-0.25	0.30	0.00
14	-0.16	-0.02	218.56	0.09	-0.16	0.00
15	-0.11	0.01	181.42	0.03	-0.11	0.00
16	-0.37	0.02	260.96	-0.08	-0.37	0.00
17	-0.26	0.20	78.88	-0.24	-0.26	0.00
18	0.34	-0.13	97.34	0.18	0.35	0.00
19	-0.17	-0.22	231.95	0.30	-0.16	0.00
20	-0.06	-0.23	201.38	0.26	-0.05	0.00
21	0.96	0.22	1167.25	2.49	-407.77	0.42

PROJETO :	1	MODELO 01	ARQUIVO PROJ:
ESTRUTURA:	2	Projeto 2	ARQUIVO ESTR:
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA			PORTICO ESPACIAL

-----REAÇÕES DOS APOIOS (Tf m) NC. 1 Todas permanentes e acidentais dos pavim---						
no	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
22	0.09	-0.01	236.55	-0.05	0.10	0.00
23	-0.32	-0.23	93.90	0.18	-0.31	0.00
24	0.21	0.10	40.79	-0.08	0.22	0.00
25	-0.09	0.81	107.03	-0.77	-0.08	0.00
26	0.01	0.75	97.40	-0.73	0.03	0.00
27	-0.05	0.59	92.16	-0.58	-0.04	0.00
28	-0.01	0.59	84.78	-0.60	0.01	0.00
29	0.11	0.84	105.30	-0.86	0.12	0.00
30	-0.19	0.05	39.33	-0.07	-0.18	0.00

Fonte: Autor (2024).

Obtidas as ações verticais atuantes no modelo, deve-se encontrar a distância  $R_j$  para cada pilar da edificação, medida do centro geométrico de cada elemento até o centro de torção calculado. Pode-se então calcular o raio de giração  $R$ . Para o modelo 02CL, tem-se a Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades geométricas do modelo 02CL

(continua)

Pilar	Centro Geométrico		$P_j$ (kN)	$R_j$ (m)	$P_j R^2$ (kN.m <sup>2</sup> )
	X (m)	Y (m)			
P1	0,100	20,275	399,4	17,01	115535,26
P2	5,200	20,225	1043,3	13,21	182087,69
P3	10,200	20,225	948,2	10,66	107668,43
P4	15,200	20,225	923,5	10,13	94710,59

Tabela 1 - Propriedades geométricas do modelo 02CL

(conclusão)

Pilar	Centro Geométrico		Pj (kN)	Rj (m)	PjR <sup>2</sup> (kN.m <sup>2</sup> )
	X (m)	Y (m)			
P5	20,200	20,225	850,9	11,90	120455,45
P6	25,200	20,225	1022,7	15,18	235787,43
P7	30,300	20,275	418,1	19,34	156319,60
P8	0,100	15,200	919,1	14,59	195513,00
P9	5,200	15,200	2378,4	9,95	235420,22
P10	10,200	15,200	2045,7	6,16	77726,16
P11	25,200	15,200	2460,5	12,45	381444,92
P12	30,300	15,200	882,1	17,24	262266,90
P13	0,100	10,200	853,2	13,70	160113,73
P14	5,200	10,200	2202,7	8,60	162873,81
P15	10,200	10,200	1816,3	3,60	23526,17
P16	25,200	10,200	2665,0	11,40	346404,16
P17	30,300	10,200	770,3	16,50	209739,60
P18	0,100	5,200	954,0	14,58	202853,53
P19	5,200	5,200	2376,1	9,95	235003,48
P20	10,200	5,200	2035,9	6,16	77178,22
P21	16,748	10,200	11512,0	2,95	100047,38
P22	25,200	5,200	2452,2	12,45	379913,97
P23	30,300	5,200	917,1	17,24	272578,26
P24	0,100	0,125	409,0	17,00	118228,81
P25	0,100	0,175	1035,3	13,20	180500,02
P26	5,200	0,175	949,3	10,65	107611,33
P27	10,200	0,175	921,9	10,12	94378,52
P28	15,200	0,175	851,0	11,89	120307,66
P29	25,200	0,175	1023,0	15,18	235701,29
P30	30,300	0,125	393,2	19,33	146933,95
			48429,40		5338829,53

Fonte: Autor (2024).

Portanto obtém-se, da Equação (9):

$$R = \sqrt{\frac{5338829,53}{48429,40}} = 10,499 \text{ m}$$

Para calcular o momento adicional de torção, dado pela Equação (10), além do raio de giração das massas, necessita-se da altura  $H$  do prédio, sendo esta facilmente obtida. Também se faz necessário o valor da rotação  $\theta_{I,n}$  causada pela torção de primeira ordem. Este valor pode ser encontrado, assim como as cargas verticais, no relatório de esforços do modelo. Basta procurar pelo valor de *rot Z*, em um dos nós relativos a um pilar do último pavimento.

Para o modelo 02CL,  $\theta_{I,n} = 0,0014 \text{ rad}$ . Assim tem-se:

$$\Delta M_t = \frac{P_j R^2 \theta_{I,n}}{H} \quad (10)$$

$$\Delta M_t = \frac{48429,40 \times 10,499^2 \times 0,0014}{30} = 249,15 \text{ kN.m}$$

Por fim, resta calcular o momento de primeira ordem  $M_{t,I}$  que causa a rotação da edificação, ou seja, o binário de forças  $P$  que foi aplicado a fim de causar torção pura em seus pavimentos. Para este estudo, foram adicionadas em todos os modelos, forças de 10kN para gerar este efeito. Como todos os edifícios estudados têm 10 pavimentos, a variação da força gerada pelo binário se dá pelo braço de alavanca resultante, dependendo da posição em que se localizavam as cargas pontuais.

Para o modelo 02CL, tem-se:

$$M_{t,I} = 10 \times 10 \times 30,2 = 3020 \text{ kN.m}$$

Com todos estes parâmetros calculados, pode-se então obter o coeficiente de instabilidade à torção  $\gamma_\theta$  do modelo.

$$\gamma_\theta = \frac{1}{1 - \frac{249,15}{3020}} = 1,090$$



diferença entre as posições dos centros de torção entre dois modelos estudados, mostrando que a rigidez dos pórticos formados pelas vigas tem influência na posição do ponto de rotação nula.

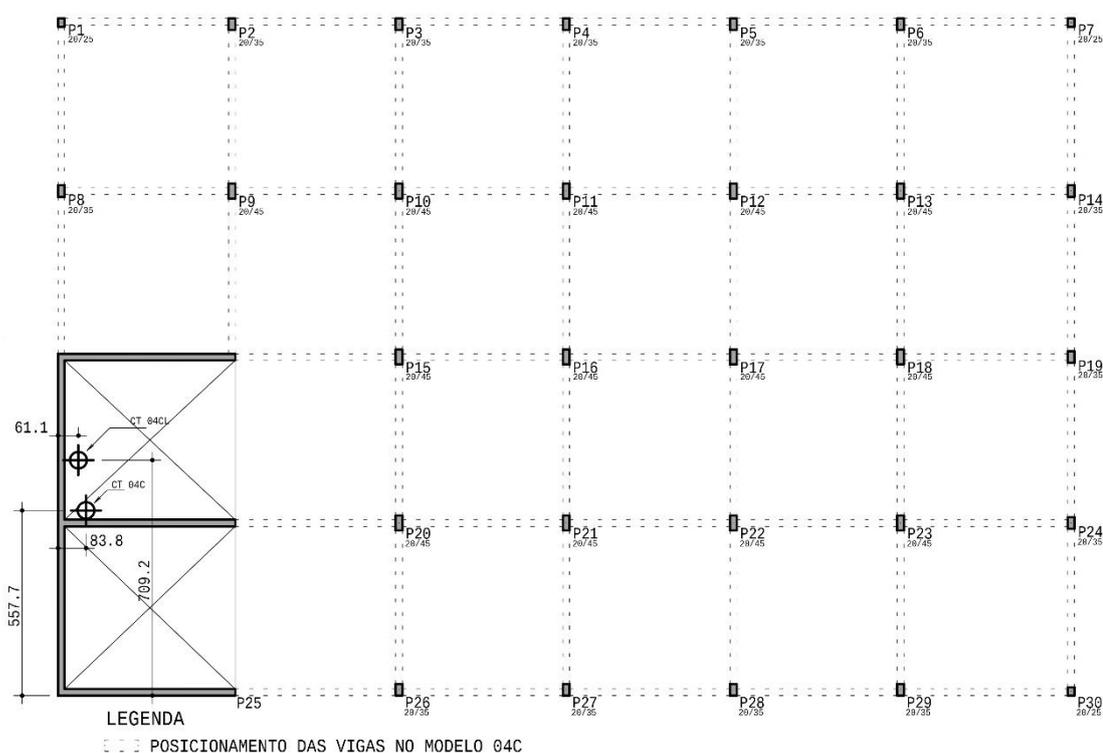
#### 4.1 Comparação entre os modelos analisados

##### 4.1.1 Modelo 04

Para o modelo 04C, modelo de estrutura de tipologia tradicional, obteve-se um valor de  $\gamma_\theta$  de 1,062. Já para o modelo 04CL, de lajes lisas, calculou-se um  $\gamma_\theta$  de 1,166. Isso representa um acréscimo de 9,79% nos efeitos de segunda ordem relacionados à torção, mostrando que o edifício com pórticos atuando para realizar o contraventamento é menos deslocável.

Novamente, a elevada rigidez do núcleo rígido foi determinante para as posições do centro de torção, com suas coordenadas mostradas na Figura 22. Porém, percebe-se uma diferença entre os dois modelos, devido à diferença de rigidez ocasionada pela presença ou não, de vigas.

Figura 22 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 04C e 04CL

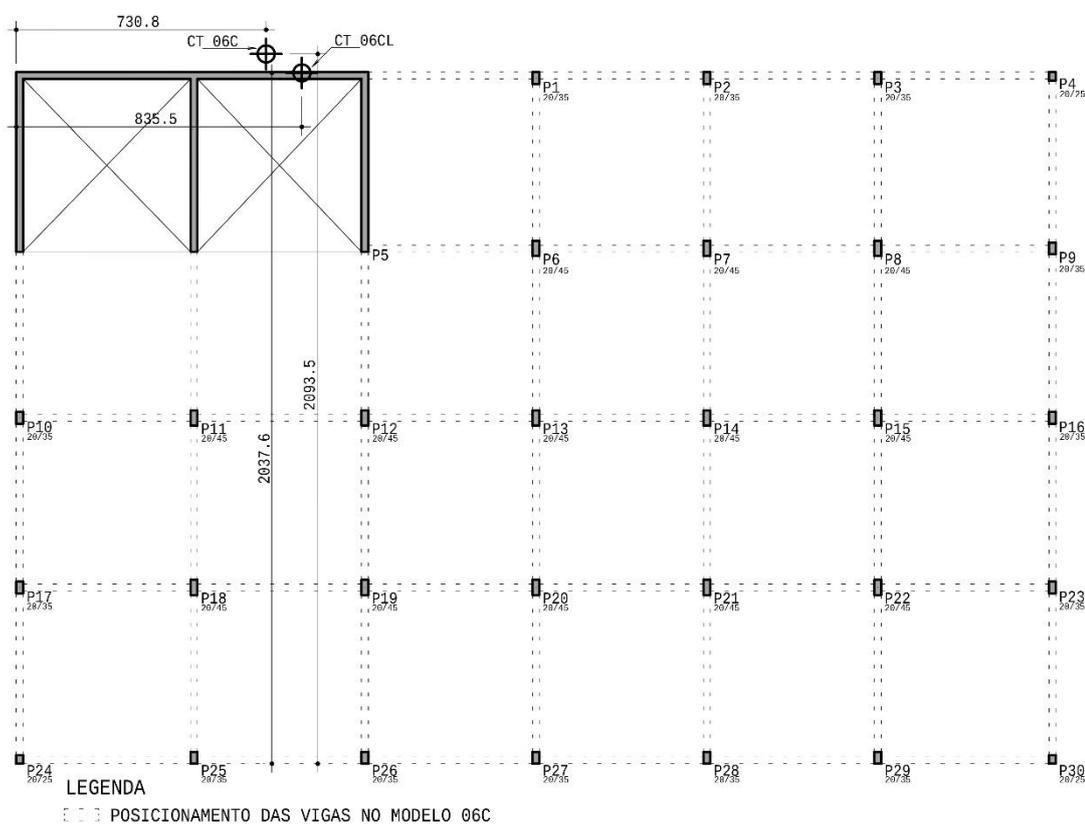


Fonte: Autor (2024).

#### 4.1.2 Modelo 06

No modelo 06, que também apresenta uma planta de geometria regular, calculou-se um  $\gamma_\theta$  de 1,053 para o modelo com lajes, vigas e pilares (06C). Quando se analisou o edifício sem vigas para realizar o contraventamento (06CL), obteve-se um  $\gamma_\theta$  de 1,162. Isto representa um acréscimo de 10,35% na torção de segunda ordem no edifício de lajes lisas, quando comparado com o modelo 06C.

Figura 23 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 06C e 06CL



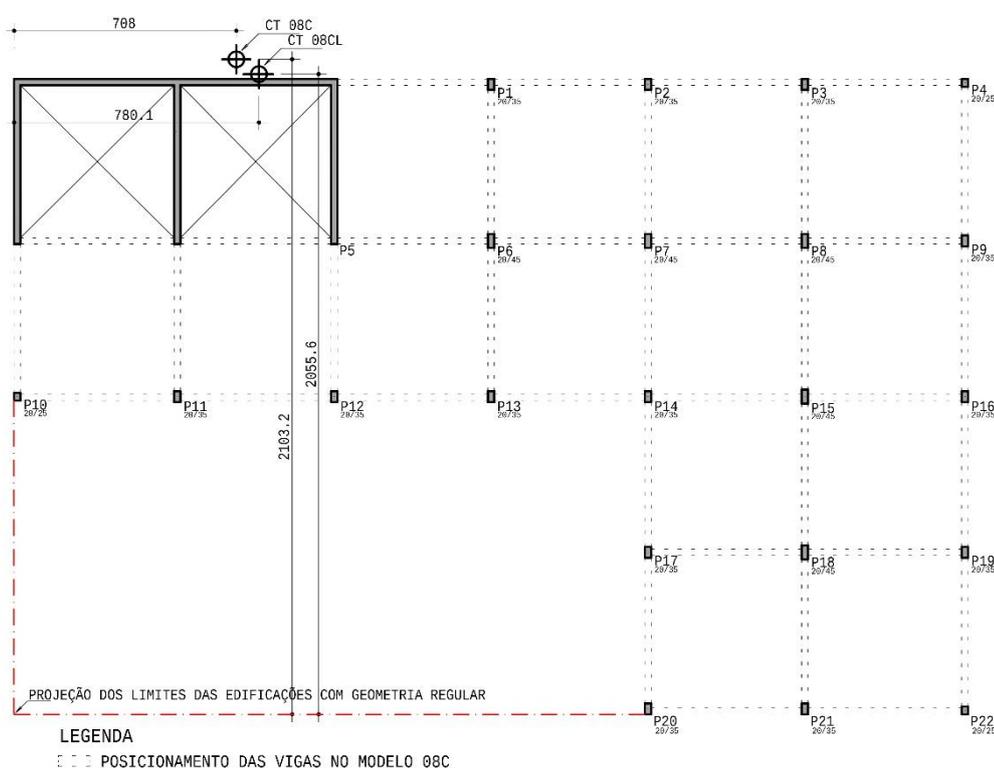
Fonte: Autor (2024).

Analisando-se os centros de torção dos dois modelos da geometria 06 (Figura 23), novamente, devido à grande rigidez do núcleo rígido, os pontos de rotação nula se localizam próximos ao elemento especial de contraventamento supracitado, existindo uma variação entre a posição do CT no modelo 06C e 06CL, com e sem vigas, respectivamente.

### 4.1.3 Modelo 08C

O modelo 08 apresenta uma geometria irregular, sendo sua planta em formato de L. Para o modelo de tipologia estrutural convencional (08C), calculou-se um valor de  $\gamma_\theta$  de 1,053. Quando analisado, o modelo 08CL, de ligação direta entre lajes e pilares, apresentou um coeficiente  $\gamma_\theta$  de 1,176, um aumento de 11,68% na suscetibilidade à torção do modelo de lajes lisas, em relação ao edifício com vigas.

Figura 24 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 08C e 08CL



Fonte: Autor (2024).

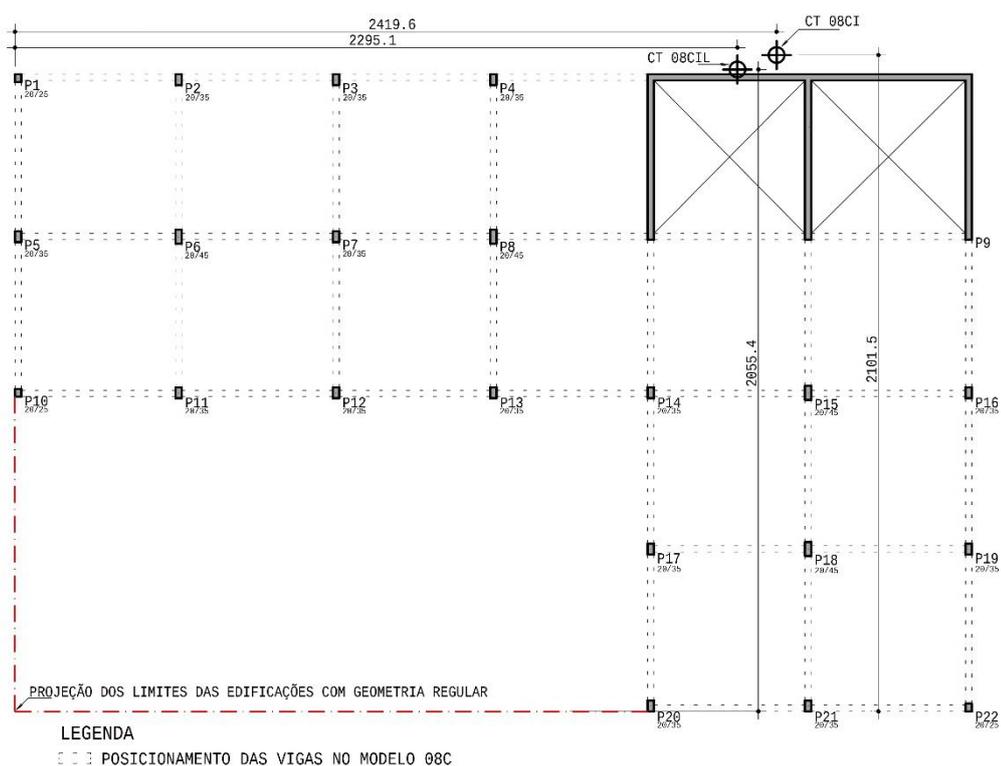
Assim como nas outras geometrias, a presença de um núcleo rígido, fez com que os centros de torção se localizassem próximos a este elemento especial de contraventamento. Do mesmo modo, houve diferença na posição do CT do modelo sem vigas (08CL) em relação ao modelo com vigas (08C), conforme evidencia-se na Figura 24.

#### 4.1.4 Modelo 08CI

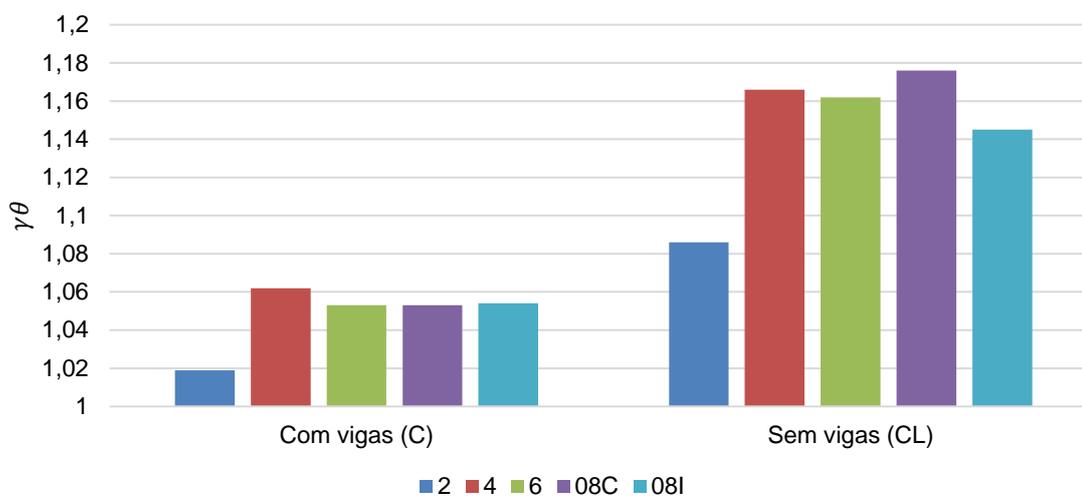
O modelo 08CI, que também apresenta uma geometria irregular, em formato de L, tem seu núcleo rígido posicionado na extremidade oposta em relação ao modelo 08C. Quando se analisou o modelo com lajes, vigas e pilares (08CI), obteve-se um coeficiente  $\gamma_\theta$  de 1,054. Já no modelo de lajes lisas (08CIL), o coeficiente de sensibilidade à torção encontrado foi de 1,145, representando um acréscimo de 8,63% nos efeitos de segunda ordem relacionados à torção na versão sem vigas do modelo.

Quanto ao posicionamento do centro de torção das edificações, novamente, devido à elevada rigidez do elemento especial de contraventamento, a coordenada de rotação nula obtida foi próxima a este elemento, conforme pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 - Comparação entre os centros de torção dos modelos 08CI e 08CIL



Um resumo dos resultados obtidos para a sensibilidade à torção dos modelos analisados pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Resumo de Resultados para  $\gamma_\theta$ 

Fonte: Autor (2024).

Como pode-se perceber, os coeficientes  $\gamma_\theta$  calculados têm uma certa constância em seus valores, mantendo um patamar próximo de 1,06 para os edifícios com vigas e sofrendo um aumento para cerca de 1,16 no caso da ausência de vigas. Isto ocorre nos modelos em que o núcleo rígido, que em todos os casos foi modelado com dimensões similares, foi posicionado em diferentes locais nas extremidades do edifício. A elevada rigidez destes elementos acaba sendo preponderante para combater as rotações de torção, independentemente de sua posição na periferia da edificação.

A exceção está no caso do modelo 02, que tem o elemento de contraventamento supracitado posicionado próximo ao centro geométrico do pavimento. Tanto na versão com vigas quanto no modelo sem vigas, os valores calculados para  $\gamma_\theta$  foram menores em relação aos edifícios 04, 06 e 08. Como exposto anteriormente, edificações que contam com seu elemento rígido de contraventamento localizado próximo ao centro de massas tendem a apresentar rotações menores.

Apesar de não ser o escopo principal deste trabalho, analisou-se também a suscetibilidade aos efeitos de segunda ordem causados pela translação dos edifícios, por meio do coeficiente  $\gamma_z$ , devido a seu uso já ser consolidado como método de avaliação de estabilidade global e também pela facilidade de cálculo, uma vez que o software TQS já conta com o mesmo em sua rotina de análise.

Como pode-se perceber na Figura 27 e na Figura 28, os resultados para o coeficiente de sensibilidade à translação  $\gamma_z$  não seguem um padrão como o observado

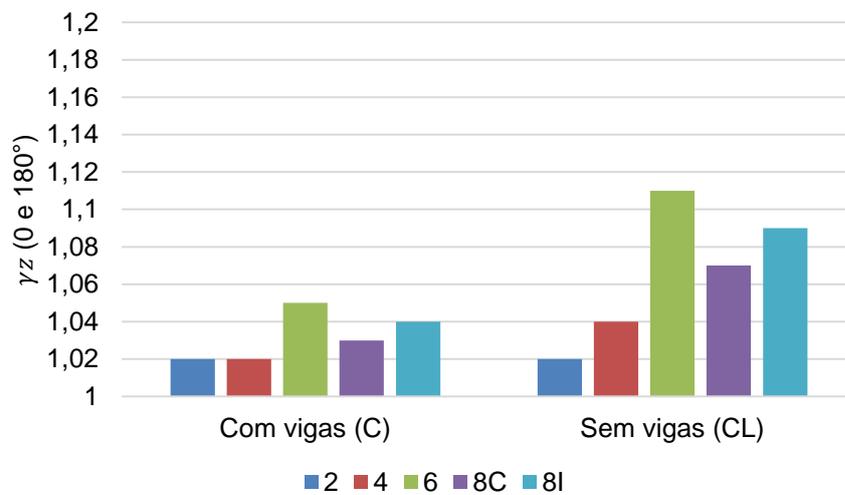
para os efeitos de segunda ordem à rotação, indicando que o posicionamento e orientação do núcleo rígido é um fator preponderante para a estabilidade da edificação frente aos deslocamentos translacionais. Ainda assim, observou-se um aumento geral nos valores encontrados para  $\gamma_z$  em todos os modelos estudados.

Os resultados obtidos para os coeficientes  $\gamma_\theta$  e  $\gamma_z$  dos modelos estudados são apresentados na Tabela 2.

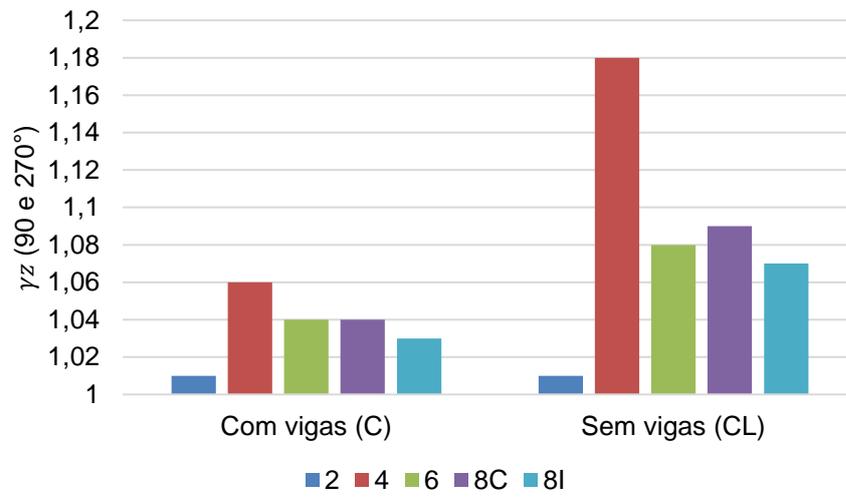
Tabela 2 - Resumo de Resultados

Modelo	$\gamma_\theta$	$\gamma_z$ (0 e 180°)	$\gamma_z$ (90 e 270°)
02C (Sonda)	1,019	1,02	1,01
02CL	1,086	1,02	1,01
04C	1,062	1,02	1,06
04CL	1,166	1,04	1,18
06C	1,053	1,05	1,04
06CL	1,162	1,11	1,08
08C	1,058	1,03	1,04
08CL	1,176	1,07	1,09
08CI	1,053	1,04	1,03
08CIL	1,145	1,09	1,07

Fonte: Autor (2024).

Figura 27 -  $\gamma_z$  para vento 0° e 180°

Fonte: Autor (2024).

Figura 28 -  $\gamma_z$  para vento 90° e 270°

Fonte: Autor (2024).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos após a análise computacional dos dez modelos analisados, sendo cinco deles com a tipologia construtiva tradicional, com lajes, vigas e pilares, e os outros cinco contando com ligação direta entre lajes e pilares, pode-se concluir que, como esperado, a ausência de vigas formando pórticos reais para realizar o contraventamento da estrutura torna a mesma mais suscetível às rotações causadas pela torção dos pavimentos. Observou-se um aumento médio de 9,3% no coeficiente  $\gamma_\theta$  proposto por Franco (2003) nos edifícios de lajes lisas, em relação àqueles que contam com vigas.

Outro resultado esperado e que foi observado neste trabalho diz respeito ao posicionamento das estruturas de contraventamento e sua influência no coeficiente de instabilidade à torção. Pode-se perceber, devido à elevada rigidez dos núcleos rígidos, uma certa regularidade nos valores do coeficiente  $\gamma_\theta$  naqueles modelos em que tal elemento especial de contraventamento foi posicionado na periferia das edificações (apresentando um certo patamar para aqueles prédios que contam com vigas para realizar o contraventamento e observando-se uma elevação naqueles modelos de lajes lisas, conforme supracitado).

A exceção a este padrão de constância foi observada no modelo 02, com seu núcleo rígido posicionado próximo do centro da edificação, próximo ao centro geométrico. Os resultados para o coeficiente  $\gamma_\theta$  foram menores em relação ao restante dos edifícios (que contavam com o elemento especial de contraventamento nas extremidades) tanto para a versão com vigas, quanto para a modelagem sem vigas.

Tal fato corrobora o que postulam Crisafulli *et al.* (2004), que afirmam que estruturas torcionalmente restringidas são aquelas com menores excentricidades entre o centro de massas dos pavimentos e o centro de rigidez, ou seja, elementos de alta rigidez localizados no centro das edificações.

Por fim, outro aspecto observado e que não havia sido previsto está relacionado à posição relativa entre os centros de torção de uma mesma geometria. Nos modelos sem vigas, com uma tendência maior ao giro devido à ausência de pórticos reais para contraventar a estrutura, espera-se que o CT esteja localizado mais distante do centro geométrico do pavimento, em relação ao ponto que apresenta rotação nula no modelo com vigas.

No geral, tal premissa acabou não se confirmando neste trabalho, já que nos modelos 04, 06 e 08 os centros de torção das versões sem vigas estão localizados levemente mais próximos aos centros geométricos da edificação, quando comparados com as versões com vigas. Novamente, a exceção está no modelo 02, em que o centro de torção da versão com tipologia estrutural convencional se localiza mais próximo ao centro geométrico da edificação, em relação à versão de lajes lisas.

A respeito do cálculo dos efeitos de segunda ordem de translação,  $\gamma_z$ , a ausência de pórticos nas estruturas de lajes lisas contribuiu para o aumento na magnitude destes efeitos, porém, não se observou um padrão de regularidade de valores como no coeficiente  $\gamma_\theta$ .

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Após o processo de pesquisa, desenvolvimento de modelos e análise de resultados, pode-se perceber que o comportamento das edificações em relação aos efeitos de segunda ordem de torção ainda não é devidamente esclarecido na comunidade técnica, carecendo de maiores estudos envolvendo o assunto. Portanto, sugerem-se alguns temas a fim de aprofundar os conhecimentos acerca da estabilidade global à torção das edificações:

- Avaliar o coeficiente  $\gamma_\theta$  em edificações de diferentes alturas, variando o número de pavimentos.
- Avaliar de forma mais aprofundada a posição dos centros de torção em edifícios com e sem vigas.
- Avaliar os efeitos de torção em edificações reais.
- Estudar o coeficiente  $\gamma_\theta$  em edificações com núcleos rígidos com menores inércias.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. B. **Análise global de edifícios de concreto: Efeitos de segunda ordem devidos à torção e efeitos de desaprumo.** 2018. 119 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.

ANDRADE, R. B.; NÓBREGA, P. G. B.; NÓBREGA, S. H. S. Metodologia para o cálculo de um coeficiente de avaliação dos efeitos de segunda ordem globais de torção. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.** 61., 2019, Fortaleza. **Anais [...].** São Paulo: IBRACON, 2019.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado.** 4 ed. vol. 4. Rio Grande: Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

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

CARVALHO, R. C. PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** 1 ed. vol 2. São Paulo: Pini, 2009.

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

FEITOSA, L. A. **Estudo da estabilidade global de edifícios de múltiplos andares com lajes lisas.** 2016. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

FRANCO, M. A torção nos edifícios altos. In: **Simpósio EPUSP Sobre Estruturas De Concreto.** 5., 2003, São Paulo. **Anais [...].** São Paulo: EPUSP, 2003.

GOULART, M. S. S. **Contribuição da rigidez à flexão das lajes para a estabilidade global de edifícios**. 2008. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GUTIERRE, S. M. **Estudo sobre a contribuição das lajes na estabilidade global de edifícios**. 2016. 236 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2016.

KIMURA, A. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2 ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

ÖZMEN, G. GIRGIN, K. DURGUN, Y. Torsional irregularity in multi-story structures. In: **International Journal of Advanced Structural Engineering**. Springer, 2014.

SONDA, E. L. **Análise dos efeitos de segunda ordem globais de torção em edifícios altos em concreto armado**. 2023. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

WEIDE, H. **Análise da influência de vigas de transição sobre os efeitos de segunda ordem globais de torção em edifícios esbeltos de concreto armado**. 2023. 66 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.