

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

GABRIEL HENRIQUE FERREIRA FRANCO

**FLEXIBILIZAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE VIGAS E PILARES-
PAREDES DE CONCRETO ARMADO – ANÁLISE
COMPARATIVA ENTRE O MODELO RETICULADO DO
TQS[©] E O MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
BIDIMENSIONAIS DO SAP2000[©]**

Belo Horizonte

2022

Gabriel Henrique Ferreira Franco

**FLEXIBILIZAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE VIGAS E PILARES-PAREDES DE
CONCRETO ARMADO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO
RETICULADO DO TQS[©] E O MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
BIDIMENSIONAIS DO SAP2000[©]**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Estruturas".

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **vinte e um** dias do mês de **dezembro de 2022**, às 13h, a estudante **Gabriel Henrique Ferreira Franco**, matrícula 2020674550, defendeu o Trabalho intitulado “**Flexibilização da Ligação entre Vigas e Pilares-Paredes de Concreto Armado – Análise Comparativa entre o Modelo Reticulado do TQS e o Modelo de Elementos Finitos Bidimensionais do SAP2000**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Orientador(a): Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Nota: 90 (noventa pontos)

Examinador(a): Prof. Samuel Silva Penna

Nota: 90 (noventa pontos)



Documento assinado eletronicamente por **Sebastião Salvador Real Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 30/01/2023, às 18:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Silva Penna, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2023, às 08:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2032864** e o código CRC **FD8A75AB**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Agradecimento

á Deus;

á Bedê Engenharia, principalmente ao nome de George Belloni Perez, pelo o suporte fornecido para o desenvolvimento deste trabalho;

ao professor Sebastião Salvador, pela confiança.

Resumo

Conhecer a ferramenta de trabalho é fundamental para uma boa realização de projetos estruturais do dia a dia. Existem inúmeros *softwares* disponíveis no mercado para o auxílio do engenheiro de estruturas. Este trabalho pretende validar os resultados obtidos da flexibilização das ligações entre pilares-paredes e vigas dos modelos reticulados do TQS[®], *software* largamente difundido nos escritórios de projetos estruturais, comparando-os com os resultados obtidos através do *software* SAP2000[®]. Para isto, foram modeladas diversas ligações viga-pilar nos dois *softwares* e os resultados comparados. Observou-se que os resultados obtidos a partir das configurações iniciais e recomendadas do TQS[®] atendem de forma satisfatória a situação típica de pilares-paredes retangulares, convergindo com valores apresentados dos modelos bidimensionais do SAP2000[®]. Em contrapartida, em pilares-paredes com seção poligonal, foram necessários ajustes das configurações do TQS[®], para que alcançássemos resultados convergentes com os modelos do SAP2000[®]. Constata-se que a utilização de *softwares* para projetos estruturais auxilia muito na produção de projetos no cotidiano, todavia, seu uso sem o conhecimento do seu funcionamento e a impossibilidade de ajustes dos seus critérios de cálculos, pode conduzir a modelos matemáticos com comportamento estrutural muito divergentes das estruturas reais.

Palavras-chave: Flexibilização das ligações pilares-paredes e viga; TQS[®]; SAP2000[®].

Abstract

O resumo juntamente com as palavras chave devem ser escritos em língua Knowing the work tool is fundamental for a good realization of day-to-day structural projects. There are numerous software available on the market to help the structural engineer. This work intends to validate the results obtained from the flexibilization of the connections between columns-walls and beams of the reticulated models of TQS[©], software widely used in structural design offices, comparing them with the results obtained through the SAP2000[©] software. For this, several beam-column connections were modeled in both software and the results compared. It was observed that the results obtained from the initial and recommended configurations of TQS[©] satisfactorily meet the typical situation of rectangular column-walls, converging with values presented from the two-dimensional models of SAP2000[©]. On the other hand, in walls-pillars with polygonal section, it was necessary to adjust the TQS[©] settings, so that we could reach convergent results with the SAP2000[©] models. It appears that the use of software for structural projects helps a lot in the production of projects in everyday life, however, its use without knowledge of its operation and the impossibility of adjusting its calculation criteria, can lead to mathematical models with very structural behavior. divergent from the real structures.

Keywords: Flexibilization of column-wall and beam connections; TQS[©]; SAP2000[©].

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Pilares e Pilares-Parede	11
3.2	Estabilidade Global da Edificação.....	12
3.3	Não Linearidade Física do Concreto	12
3.4	Modelos Matemáticos Estruturais	13
3.5	Modelos Reticulados e Bidimensionais.....	14
3.6	Método de Elementos Finitos	15
3.7	Modelo Reticulado de Pórtico Plano e Pórtico Espacial	17
3.8	FLEXIBILIZAÇÃO DO PÓRTICO ESPACIAL	20
3.8.1	Software TQS [©] - TQS Informática.....	20
3.8.2	Software Eberick [©] - AltoQI.....	21
4	MODELOS ANALISADOS	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MODELOS	28
5.1.1	Ajuste nos critérios de LEPMOL e REDMOL do TQS [©]	30
6	CONCLUSÕES	31
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil possui diversas áreas, e dentre essas, com grande notoriedade, destaca-se a engenharia de estruturas. É uma importante área, pois garante a segurança da edificação a ser realizada, além de viabilizar a execução e propiciar mais economia na construção.

Realizar um projeto estrutural é uma tarefa que exige muita atenção, paciência e experiência do profissional. Antigamente, esta última característica era ainda mais necessária, pois naquela época, as ferramentas hoje disponíveis não existiam, ou eram financeiramente inviáveis. Com isto, era comum que os engenheiros mais experientes participassem de forma mais presente na concepção estrutural do projeto, visto que seu conhecimento e experiência nesta etapa resultava em uma estrutura mais coerente, evitando futuros retrabalhos. Era primordial o conhecimento profundo de análise estrutural e ter uma excelente sensibilidade para a visualização do funcionamento das estruturas. Comparado aos dias atuais, era muito difícil a elaboração de diversos modelos estruturais no mesmo projeto, o que permitiria a escolha de um melhor sistema, pois gastava-se muito tempo.

Atualmente, foi observado uma constante evolução nas ferramentas empregadas para o desenvolvimento dos projetos estruturais. Os recursos computacionais disponíveis hoje são capazes de processar modelos estruturais em pouco tempo. A evolução dos *softwares*, permitiu a entrada e saída gráfica, facilitando e aprimorando a validação dos resultados de processamentos. Validações estruturais que demoravam dias para serem realizadas, podem ser feitas em horas, ou até em minutos, dependendo da estrutura. Hoje, vários modelos do mesmo projeto podem ser processados simultaneamente, auxiliando o profissional a optar pelo melhor resultado apresentado.

Além disto, o avanço tecnológico apresentado nos últimos anos viabilizou o uso de modelos estruturais (modelos numéricos) mais refinados. Segundo Kimura (2018), o modelo estrutural é a tentativa de simular uma estrutura real, a partir de um protótipo computacional. Ainda, conforme o autor, há inúmeros modelos matemáticos aplicados para a análise estrutural de

edifícios de concreto armado, com variação de abrangências e complexidades. Embora as simplificações dos métodos aproximados utilizados há muito tempo atendam muito bem a maioria das situações, os modelos mais refinados difundidos nos dias atuais proporcionam respostas mais próximas dos modelos reais. A palavra “próximas” é bem empregada aqui, porquanto, mesmo que alguns modelos sejam muito abrangentes e complexos, não irão reproduzir de forma exata o funcionamento de uma estrutura real.

Apesar de todos os benefícios desta evolução computacional, originou-se também pensamentos equivocados sobre o trabalho do projetista estrutural. Segundo Perez (1999), gerou-se a ideia que as ferramentas computacionais fazem todo o projeto estrutural de maneira instantânea, ou seja, a intervenção dos engenheiros de estruturas não seria mais necessária para os projetos. Este entendimento errôneo se apresentou principalmente entre as pessoas leigas, mas até mesmo entre os colegas de outras áreas da engenharia civil. Ele completa que, por isso, aumentou-se o número de pessoas que acreditam que a aquisição de um *software* para análise habilita qualquer engenheiro projetar. Entretanto, independente da qualidade do *software*, a concepção de um bom projeto estrutural está intimamente relacionada com a experiência do engenheiro. Um bom *software* não substitui um bom engenheiro, e muito menos proporciona visão estrutural, indispensável para concepção de um bom projeto. Este pensamento errado é facilmente refutado pelos que conhecem as escolhas que o engenheiro de estruturas percorre, desde a etapa inicial de concepção, quando se opta pelo que ele julga ser a melhor solução estrutural, passando pela fase de análise estrutural, na qual é escolhido modelo matemático para representar aquela estrutura, validando as respostas obtidas por este modelo, até chegar à fase de dimensionamento e detalhamento, quando os resultados obtidos são materializados nos desenhos para execução da obra. As decisões tomadas nestas fases extrapolam a capacidade dos *softwares*.

Assim, além do conhecimento, bom senso e visão estrutural, que são essenciais para elaboração de bons projetos, o engenheiro de estruturas deve conhecer profundamente as ferramentas que o auxiliam. Entender as premissas, os critérios de análise estrutural e de cálculo de um *software* é primordial para a realização de um bom projeto. Quanto mais transparente for esta ferramenta, mais fácil se torna o entendimento e visualização do funcionamento estrutural. Além disto,

conhecer bem os métodos aproximados, mesmo que simplificados, ajudam a validar as resoluções produzidas por estas ferramentas computacionais.

Desta forma, este trabalho pretende validar os resultados obtidos da flexibilização das ligações entre pilares-paredes e vigas dos modelos reticulados do TQS[©], comparando-os com os resultados obtidos a partir do *software* SAP2000[©]. Para isto, foram modeladas diversas ligações viga-pilar nos dois *softwares* e os resultados comparados, considerando seis casos comuns de projetos, e verifica-se a convergência entre os resultados obtidos. Se necessário, propõe-se ajuste na configuração dos critérios do TQS[©] para que os resultados sejam considerados satisfatórios.

2 OBJETIVO

Compreender e analisar a metodologia de flexibilização das ligações entre vigas e pilares do *software* TQS[©], comparando-os com os resultados de modelos mais refinados obtidos a partir do *software* SAP2000[©].

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pilares e Pilares-Parede

Os pilares são os elementos estruturais responsáveis pela transferência de cargas das edificações para a fundação. Segundo Diniz, Lages e Barboza (2019), os pilares possuem dimensões transversais menores que a dimensão longitudinal. Contudo, pilares-paredes apresentam comportamento aproximado de elemento bidimensional, devido a sua geometria. De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2014), o pilar cuja a maior dimensão exceda em cinco vezes a menor dimensão da seção transversal deve ser tratado como pilar-parede, dispondo das prescrições do item 18.5 desta mesma norma. Segundo Pascual (1987), pilar-parede é um painel plano, sem rigidez transversal, deformável preponderantemente por momento fletor e com extrema rigidez à força cortante.

Os pilares-parede são utilizados usualmente para estruturar caixas dos elevadores e escadas de edifícios altos, possuindo assim seção aberta. Entretanto, este tipo de pilar pode também

apresentar seção fechada (ARAÚJO, 2014). Devido às ações dos ventos, estes elementos estruturais são os principais responsáveis pela rigidez horizontal da edificação, absorvendo grande parte destas ações e minimizando os deslocamentos horizontais.

3.2 Estabilidade Global da Edificação

Diniz, Lages e Barboza (2019) explicam que a associação entre pilares e vigas formando um pórtico, gera um dos principais mecanismos de enrijecimento da estrutura. A eficiência para combater a instabilidade da estrutura está relacionada à rigidez de cada um destes elementos isolados, mas também, à rigidez da ligação entre eles. Estas ligações podem ser do tipo rígida, semirrígida ou articulada. Kimura (2018) destaca que as ligações pilar-viga são importantes para os edifícios de concreto, pois é onde ocorrem as transferências de esforços de um elemento para o outro. Durante a fase de modelagem estrutural, estas regiões carecem de tratamento particular. Segundo Bertero e Popov (1977), efetivamente considerar estas ligações permanentemente rígidas são suposições, visto que carregamentos cíclicos proporcionam uma degradação gradual na ligação entre o concreto e a armadura, ocasionando o aparecimento de fissuras na viga e na ligação, quando as armaduras atingem valores elevados de escoamento. Estas fissuras promovem o surgimento de rotações entre a viga e o pilar, modificando o comportamento global da ligação.

3.3 Não Linearidade Física do Concreto

Outro fator importante para a análise estrutural de um edifício é a consideração do comportamento não linear do material concreto. Como já citado acima, a fissuração tem grande influência na rigidez nestes tipos de elementos. Segundo Stramandinoli (2007), mesmo que sujeitas à pequenas solicitações, as estruturas de concreto armado desenvolvem fissuras logo no primeiro instante de carregamento, diminuindo a sua rigidez. Kimura (2018) explica que isto se deve à baixa resistência do material à tração. Quando considerada corretamente, a não linearidade física no modelo matemático conduz a resultados mais realistas. Na análise da instabilidade e efeitos de segunda ordem, a norma ABNT NBR 6118 (2014), no item 15.3, prescreve o seguinte: “A não linearidade física, presente nas estruturas de concreto armado, deve ser obrigatoriamente considerada”. Todavia, segundo Kimura (2018), na maioria das vezes, as

formulações para a análise não linear são complexas. O autor clarifica que, uma outra maneira de levar em conta o comportamento não linear do concreto armado, de forma aproximada, é modificar diretamente o valor da rigidez dos elementos que compõe o modelo. A norma ABNT NBR 6118 (2014) elucida isto no item 15.7.3, onde, de forma aproximada, permite a alteração da rigidez dos elementos para a análise global do edifício. Abaixo, é apresentado as aproximações de norma.

Para as lajes:

$$(EI)_{\text{sec}} = 0,3 E_c I_c$$

Para as vigas:

$$(EI)_{\text{sec}} = 0,4 E_c I_c, \text{ para } AS' \neq AS \text{ e}$$

$$(EI)_{\text{sec}} = 0,5 E_c I_c, \text{ para } AS' = AS$$

Para os pilares:

$$(EI)_{\text{sec}} = 0,8 E_c I_c.$$

3.4 Modelos Matemáticos Estruturais

Ao estudar o comportamento de sistemas estruturais, são usados modelos físicos (geralmente em escala de laboratório) e/ou modelos matemáticos. Os avanços científicos e as comparações entre esses modelos levaram ao desenvolvimento significativo de modelos matemáticos que oferecem modelagens mais realistas e confiáveis de aplicações práticas de engenharia, que se apresentam mais econômicas do que os modelos físicos. A análise desses modelos matemáticos geralmente requer o uso de métodos numéricos, incluindo o método dos elementos finitos. Este método foi desenvolvido para a análise de meios contínuos e hoje permite a análise da maioria dos sistemas físicos relacionados à engenharia (SORIANO, 2003).

De acordo com o referido autor, meio contínuo estrutural, como outros sistemas físicos, geralmente são muito complexos para serem analisados de forma exata. Portanto, hipóteses

simplificadoras são adotadas para construir um modelo matemático aproximado do sistema físico original, representado por equações matemáticas.

Ainda de acordo com o autor, os modelos matemáticos estruturais são classificados de forma simplificada em relação à sua geometria, como mostrado na figura 1.

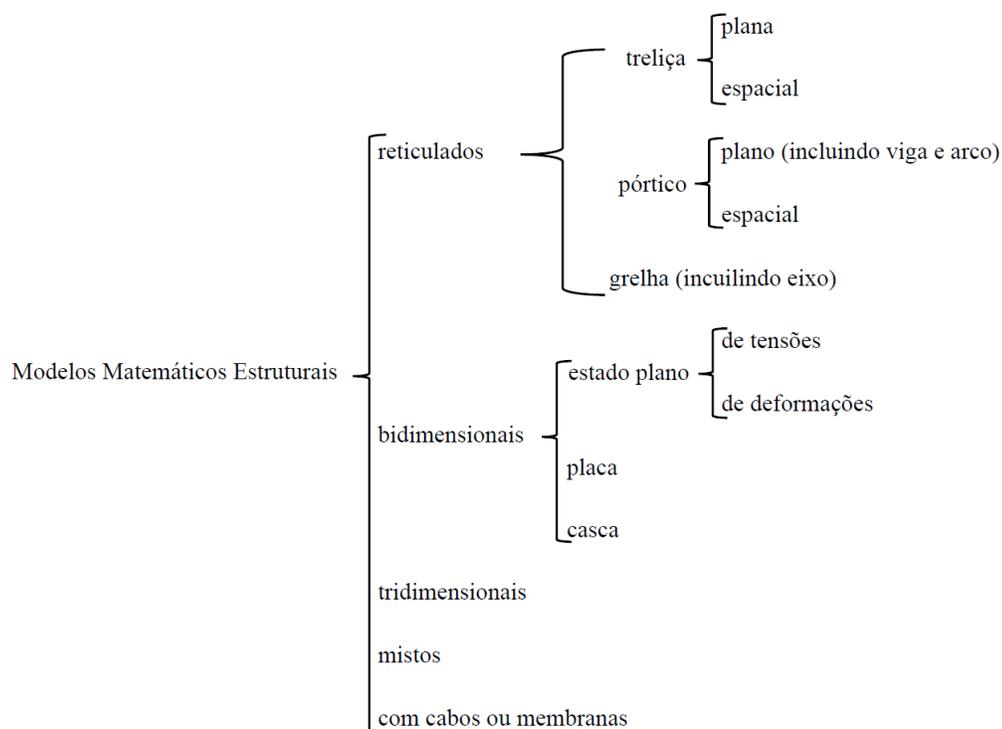


Figura 1 – Classificação dos modelos matemáticos quanto à geometria (adaptado de Soriano, 2003).

3.5 Modelos Reticulados e Bidimensionais

Segundo Soriano (2003), os modelos reticulados são formados pela junção de elementos de barra ou componentes estruturais em que a dimensão do eixo longitudinal de cada elemento é bem maior que as dimensões da seção transversal. Estes elementos que compõem o modelo reticulado utilizam segmentos de reta para representar as barras, fazendo com que a associação deles possua um número finito de incógnitas. Mais além, o comportamento de cada barra é gerido por uma equação diferencial ordinária, o que permite que o comportamento estático do conjunto de elementos seja expresso através de um sistema de equações algébricas.

O autor ainda explica que, em modelos bidimensionais ou de superfície, existem duas direções principais, cada uma com a correspondente variável coordenada independente. Nos modelos de estado plano de tensões, placas e cascas, a terceira dimensão é chamada de espessura. No caso de estado plano de deformação, o comportamento elástico é constante na direção da terceira dimensão, e torna-se, segundo ela, um comprimento unitário para efeito de análise. Neste modelo, o comportamento é descrito por equações em derivadas parciais nessas coordenadas. É frequentemente chamado de modelo contínuo, pois possui um número infinito de pontos para a determinação das incógnitas e suas equações diferenciais possuem conhecidas soluções analíticas apenas para condições simples de contorno e carregamento. A figura 2 apresenta um exemplo de discretização bidimensional de um consolo curto.

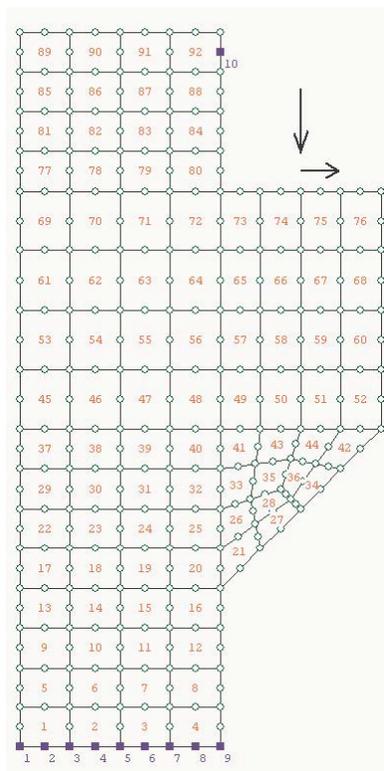


Figura 2 – Discretização do modelo bidimensional de um consolo curto (AZEVEDO, 2003).

3.6 Método de Elementos Finitos

Métodos discretos, numéricos ou aproximados foram desenvolvidos para substituir a resolução analítica das equações diferenciais dos modelos matemáticos, pela resolução de sistemas de equações algébricas. Esses métodos trazem aproximações adicionais aos modelos matemáticos

para formar os modelos discretos, procurando determinar as incógnitas em um número finito de pontos. Entre estes métodos e em ordem cronológica, citam-se os métodos de diferenças finitas, os de elementos finitos e os de elementos de contorno. No entanto, pode-se dizer que o método de elementos finitos é o que se aplica de forma mais simples, ampla e eficiente em análise estrutural (SORIANO, 2003).

Soriano (2003) explica que no método de elementos finitos, há uma divisão no domínio de definição do modelo matemático, obtendo um número discreto de subdomínios ou elementos de dimensões finitas nomeados como elementos finitos, que são conectados através de um número reduzido de pontos chamados nós. Ou seja, nesse procedimento, os infinitos pontos do domínio do modelo matemático com incógnitas a determinar são discretizados em um conjunto finito de pontos nodais da malha de elementos com número discreto de incógnitas. Contudo que o campo de deslocamentos de cada elemento seja definido de forma coerente, o desempenho do modelo discreto se aproxima proporcionalmente ao do modelo matemático à medida que se refina a malha. Isto significa que, a solução aproximada do modelo discreto se aproxima da solução do modelo matemático, na medida em que se aumenta o número de elementos da malha, ou seja, à medida em que se utilizam elementos menores e/ou se utilizam elementos melhores, isso é, que utilizam campos de deslocamentos mais refinados. A figura 3 apresenta um exemplo de discretização de uma laje.

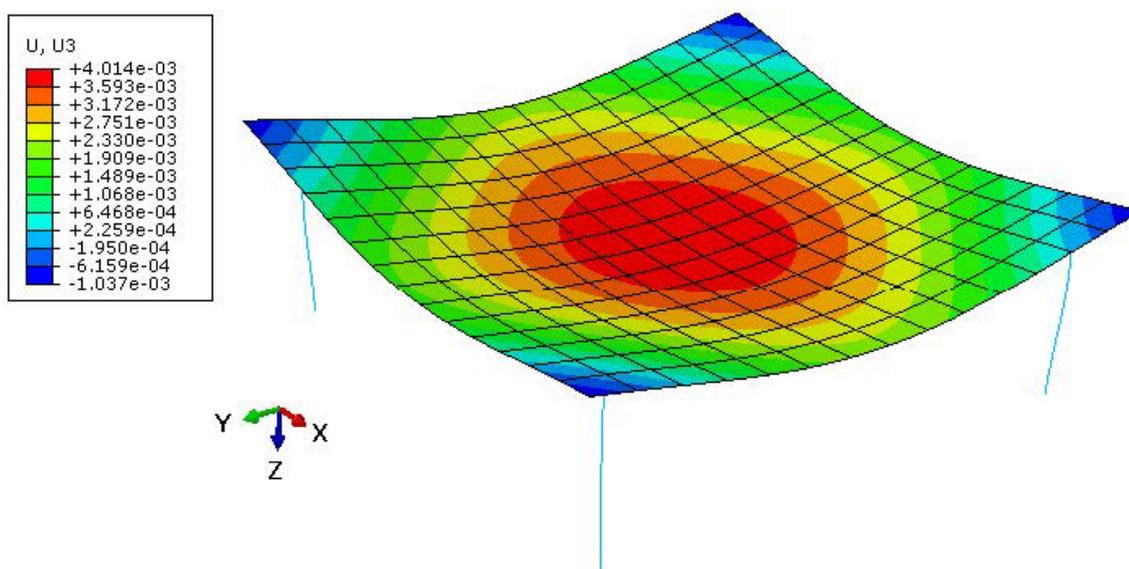


Figura 3 – Deslocamentos de uma laje usando método de elementos finitos (ARAÚJO e ARAÚJO, 2013).

3.7 Modelo Reticulado de Pórtico Plano e Pórtico Espacial

De acordo com Perez (1999), para carregamentos verticais, os modelos matemáticos usais de escritórios de projeto consideram as lajes funcionando isoladamente, transferindo as cargas verticais para as vigas e pilares. Em contrapartida, as vigas e pilares compõem uma estrutura reticulada (barras), que resistirá a todas as cargas solicitantes, inclusive as ações horizontais. Existem vários modelos de barras que podem ser utilizados para análise, todavia, neste trabalho, destaca-se dois modelos importantes para as ligações entre vigas e pilares: O modelo de pórtico plano e o modelo de pórtico espacial.

Perez (1999) esclarece que nos modelos de pórticos planos, as lajes apoiam sobre as vigas, que são consideradas indeformáveis. Há situações nas quais a viga não poderá ser integrada a este modelo, adotando-se para elas um outro modelo, como por exemplo o modelo de vigas contínuas. A figura 4 apresenta um modelo esquemático de pórtico plano de uma edificação de multipavimentos.

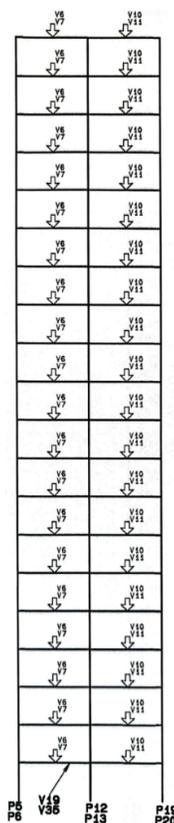


Figura 4 – Esquema de pórtico plano (Perez, 1999).

O autor complementa que nos modelos de pórticos espaciais, as lajes são tratadas como diafragma rígido no seu plano. Elas também se apoiam nas vigas, supostamente indeformáveis, assim como no pórtico plano. Os pilares e as vigas são analisados como parte de um pórtico espacial. Uma hipótese comumente utilizada nos escritórios de projetos estruturais é considerar os valores de recalques diferenciais dos pilares em um mesmo pavimento como nulo. Segundo o autor, este pensamento é bastante coerente quando as tensões normais médias nos pilares estudados não apresentam expressivas diferenças. A figura 5 apresenta um modelo esquemático de pórtico espacial de uma edificação de multipavimentos.

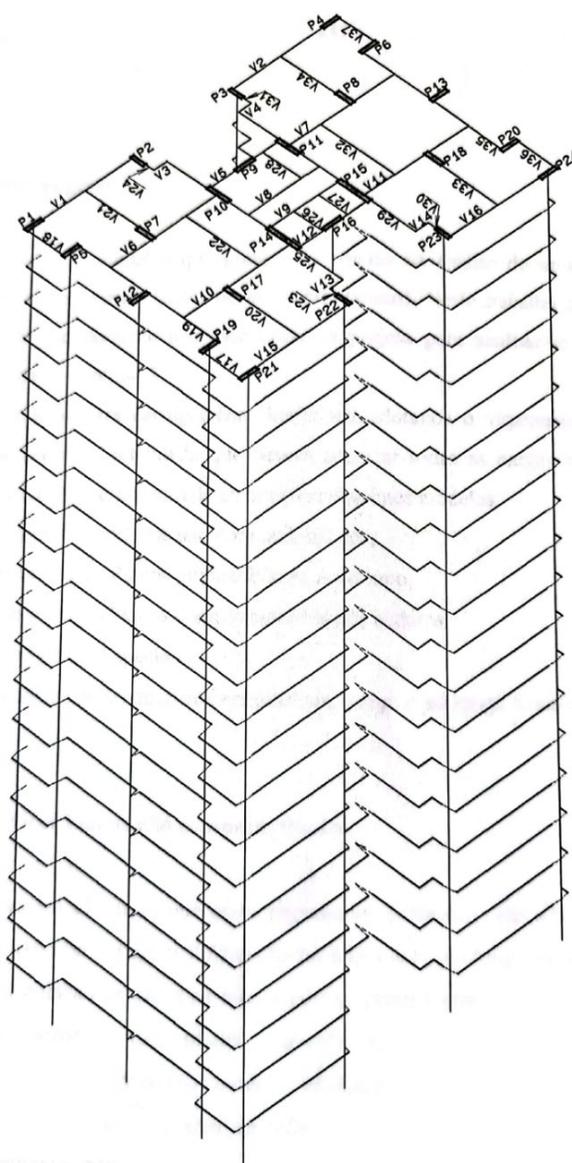


Figura 5 – Esquema de modelo de pórtico espacial (Perez,1999).

É comum o uso destes modelos reticulados supracitados, porém os pilares alongados, ou seja, pilares que não são classificados como pilar-parede, mas ainda possuem uma das dimensões da seção transversal significativamente maior que a outra, podem fazer parte do sistema de contraventamento da edificação. Dado que são elementos bidimensionais de chapa, o uso de uma única barra para representá-los pode não ser apropriado. Em diversas situações, esta ligação entre pilares e viga é estabelecida de maneira excêntrica, devido à necessidade de atender o projeto arquitetônico, e nos casos de pilares-paredes, esta excentricidade é acentuada. Então, para transferir os esforços das barras das vigas até as barras dos pilares, cujos eixos não se interceptam, utiliza-se elementos rígidos.

Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014), no item 14.6.2.1, as regiões comuns entre pilares e vigas de uma estrutura de concreto, podem ser modeladas como sendo altamente rígidas (nós de dimensões finitas), assim chamados de trechos rígidos. A figura 6 elucida o uso de trechos rígidos na ligação entre viga e pilar.

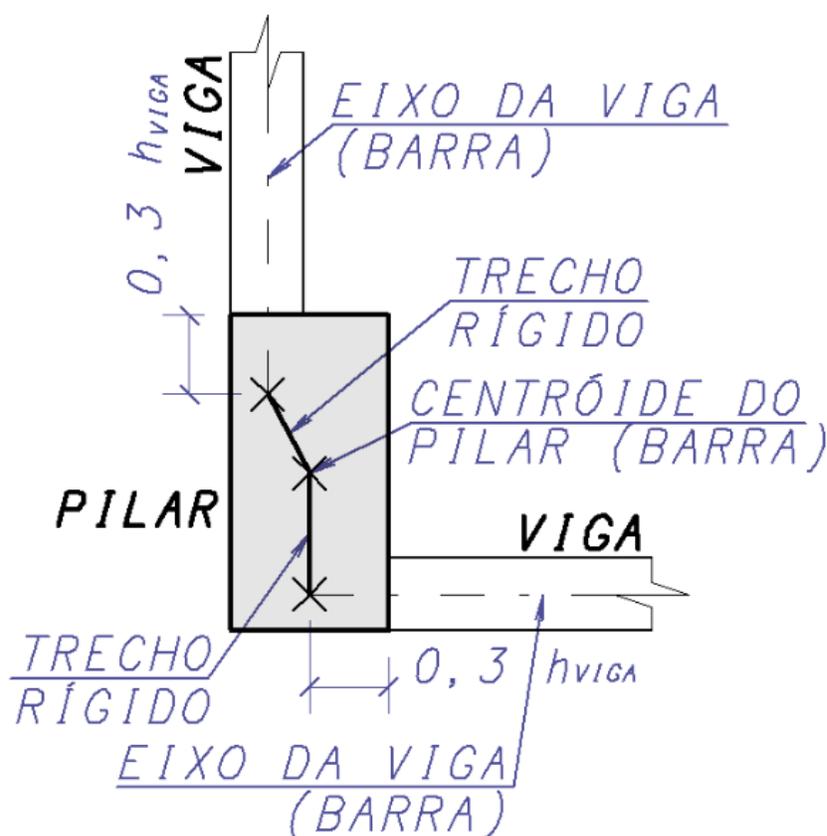


Figura 6 – Trechos rígidos da ligação excêntrica entre pilar e viga (adaptado de Perez, 1999).

De acordo com Kimura (2018), na utilização do modelo de pórtico espacial, onde a representação dos pilares e vigas são por barras, os trechos rígidos são inseridos no modelo através de barras adicionais com alta rigidez (barra rígida), ou através de alteração das rigidezes dos elementos pertencentes às ligações (offset rígidos). Estes dois métodos (barra rígida e offset rígido) são eficientes e semelhantes, todavia o uso de offset rígido dispensa o acréscimo de nós no modelo matemático, otimizando o tempo de processamento da estrutura. Considerar os trechos rígidos para a análise da estrutura tem grande relevância, pois impacta notoriamente no comportamento global da edificação.

Contudo, ao assumir estes trechos rígidos em modelos reticulados, pode-se cometer um equívoco relevante nos casos de pilares alongados. Após o carregamento destes tipos de elementos, somente uma faixa destes pilares será mobilizada quando a viga ligada a ele for solicitada, o que não é adequadamente considerado quando apenas um elemento é usado na discretização, conseqüentemente adotando uma rigidez errada para a ligação. É essencial que a rigidez efetiva desta ligação seja adequadamente considerada, para o efeito da análise estrutural. Assim, é comum que os *softwares* comerciais flexibilizem estas ligações através de elementos de molas, inseridas entre elementos dos pilares e das vigas, para obterem respostas mais próximas à realidade estrutural.

3.8 FLEXIBILIZAÇÃO DO PÓRTICO ESPACIAL

3.8.1 Software TQS[®] - TQS Informática

De acordo com Diniz, Lages e Barboza (2019), o TQS[®] gera um pórtico espacial, modelo reticulado, constituído por barras de pilares e vigas, com a possibilidade de flexibilizar ou não as ligações entre estas vigas e pilares. A flexibilização destas ligações é atribuída pela inserção de elementos de molas entre as barras dos pilares e vigas. Segundo o TQS Docs, a rigidez k das molas é dada pela expressão:

$$k = \frac{4EI/L}{REDMOL}$$

definido pelo pilar junto às barras das vigas, onde E é o módulo de elasticidade longitudinal do pilar, L é o pé-direito do pilar e I é o momento de inércia calculado a partir de uma seção equivalente do pilar que efetivamente será considerada na rigidez da ligação, dado por:

$$I_y = \frac{(LEPMOL \times b)b^3}{12}$$

onde b é a largura da viga que encontra com o pilar. REDMOL e LEPMOL são critérios do *software*, onde permite que o operador pondere no cálculo da rigidez dessas molas. Como configuração inicial do *software*, os valores de LEPMOL e REDMOL são 3 e 1, respectivamente. Com esta configuração, o programa considera uma faixa de contribuição efetiva do pilar igual a três vezes a largura da viga que o intercepta. A figura 7 clarifica a metodologia que o *software* TQS[®] utiliza para a inserção de molas no modelo.

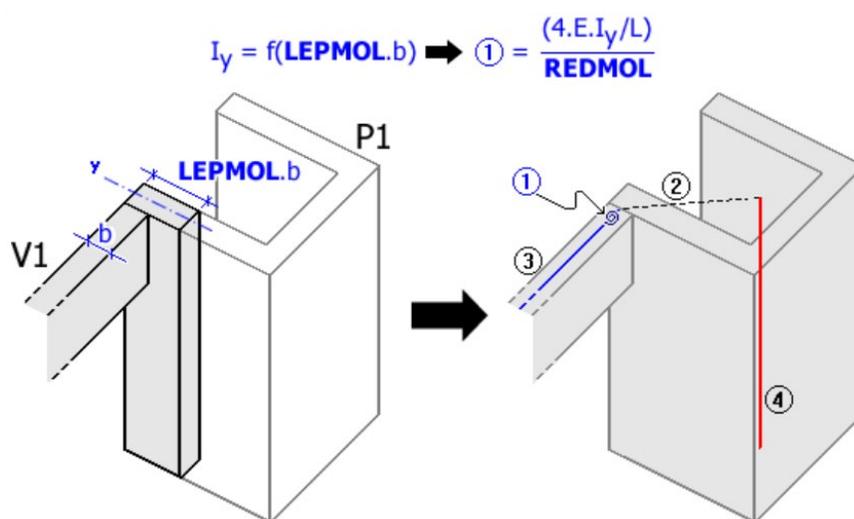


Figura 7 – Considerações dos critérios de REDMOL e LEPMOL do TQS[®] (TQS Informática).

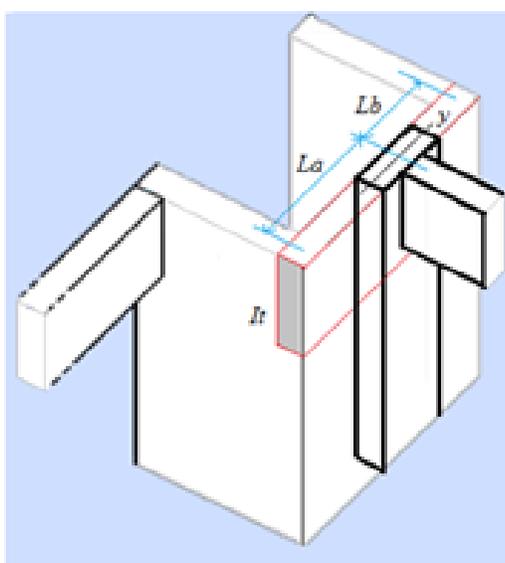
3.8.2 Software Eberick[®] - AltoQI

O Eberick[®] também utiliza o modelo espacial para cálculo, constituídos de vigas e pilares e, assim como o TQS[®], simula molas para flexibilizar as ligações entre vigas e pilares. Segundo o manual digital do Eberick[®] disponibilizado pela AltoQi, para o cálculo desta mola nestas ligações, o programa utiliza o conceito de viga e pilar equivalentes. O valor da mola é obtido através da seguinte expressão:

$$k_{mola} = \frac{4EI/L}{H} C + \frac{GI_t}{L_a} + \frac{GI_t}{L_b}$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal, G é o módulo de elasticidade transversal, I_y equivale ao momento de inércia do pilar equivalente, I_t é o momento de inércia à torção da viga equivalente, L_a é a distância entre a extremidade da lâmina do pilar à esquerda da viga até o eixo da viga, L_b é a distância entre a extremidade da lâmina do pilar à direita da viga até o eixo da viga e C é um coeficiente que permite ponderar as condições de ligações nos extremos do pilar, tanto no lance inferior, quanto no lance superior, como também o ângulo formado entre os elementos na ligação.

Observa-se que o Eberick[©] considera mais fatores geométricos e de materiais para a flexibilização quando comparado ao TQS[©]. Além do coeficiente C, o Eberick[©] admite o módulo de elasticidade transversal, momento de inércia à torção da viga equivalente e as distâncias das extremidades da viga equivalente com o eixo da viga da ligação. Portanto, ao diminuir os valores de L_a e L_b, maior será a rigidez da ligação, pois isto posicionaria a viga mais próximo do centroide do pilar. A figura 8 clarifica a metodologia que o *software* Eberick[©] utiliza para a inserção de molas no modelo.



$$K_{mola} = \frac{4EI_y C}{H} + \frac{GI_t}{L_a} + \frac{GI_t}{L_b}$$

Figura 8 – Cálculo da rigidez da mola para flexibilização entre pilar e viga do Eberick[©] (AltoQi).

4 MODELOS ANALISADOS

A seguir, serão apresentados seis casos, cada um modelado de três maneiras distintas, resultando em 18 modelos de pórticos. Para isto foram utilizados dois *softwares*, o SAP2000[®] e o TQS[®]. Cada caso possuirá um modelo reticulado (barras) sem flexibilização das ligações, ou seja, os pilares-paredes e vigas serão vinculados a partir de offsets rígidos, modelados no SAP2000[®], um modelo reticulado com flexibilização das ligações entre o pilar-parede e a viga, modelados no TQS[®] e um modelo misto, onde os pilares-parede apresentam em modelo bidimensional (cascas), discretizados em barras espaçadas a cada 0,10 m, e as vigas dispõem em modelo reticulado, modelados no SAP2000[®]. Em cada modelo, trata-se de dois pilares-paredes ligados entre si por uma única viga, diferenciando entre eles, a posição da viga em relação ao centro de gravidade do pilar-parede. Em três destes casos, os pilares-paredes possuem seção transversal retangular de 2,00 m x 0,20 m, ilustrados nas figuras 9 a 11, e nos outros três casos, os pilares terão seção transversal em “u”, com dimensões apresentadas nas figuras 12 a 14, ambos usualmente utilizados em caixas de elevadores para estabilização lateral de edifícios. Em todos os modelos, os pilares possuem pé-direito de 3,00 m e as vigas possuem seção transversal 0,20 m x 0,50 m e 5,00 m de comprimento (eixo a eixo de pilar). Concomitante ao peso próprio da viga, será considerada uma carga distribuída de 25,0 kN/m, totalizando uma carga distribuída nas vigas de 27,5 kN/m. Para o concreto armado, foi adotado peso específico de 25,0 kN/m³, resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}) de 30 MPa, módulo de elasticidade inicial (E_{sc}) igual a 26.400 MPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,20.

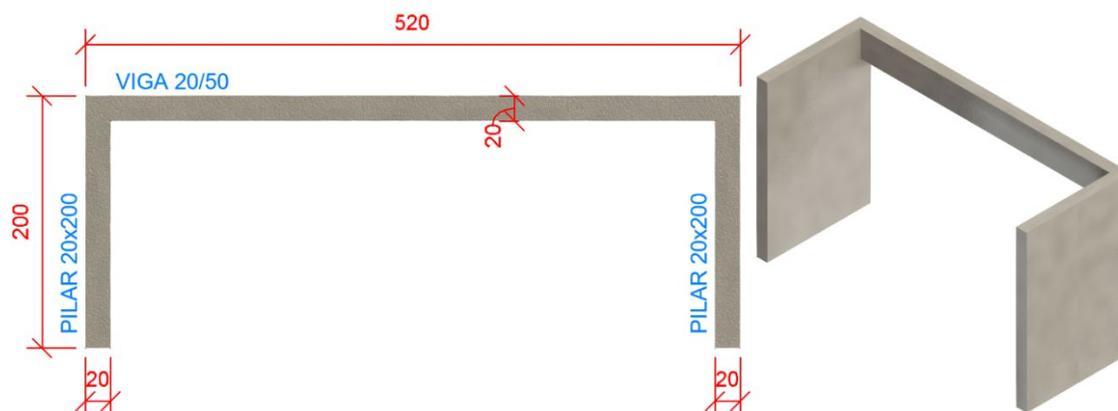


Figura 9 – Caso 1: Viga na extremidade dos pilares retangulares.

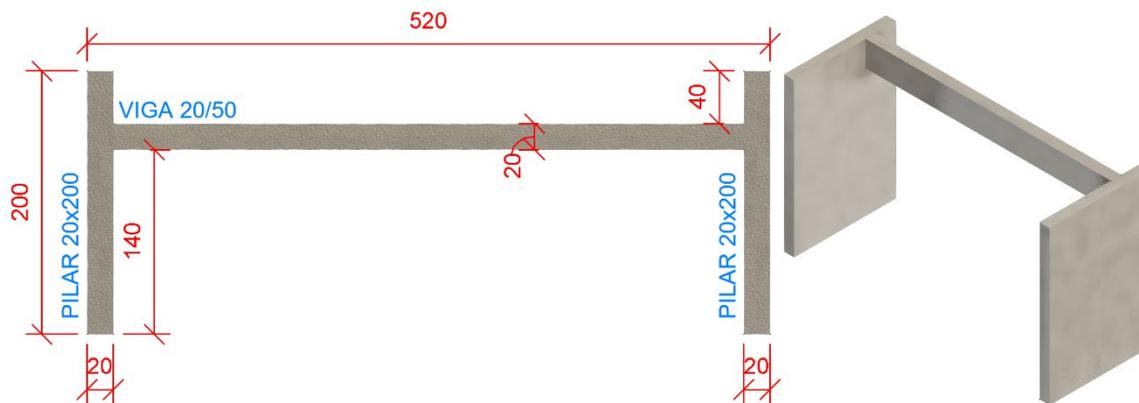


Figura 10 – Caso 2: Viga entre o centro e a extremidade dos pilares retangulares.

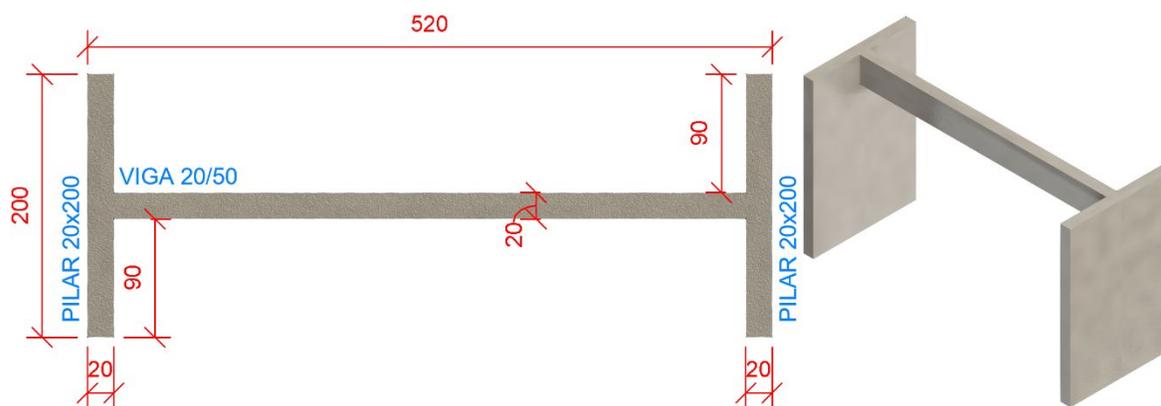


Figura 11 – Caso 3: Viga no centro dos pilares retangulares.

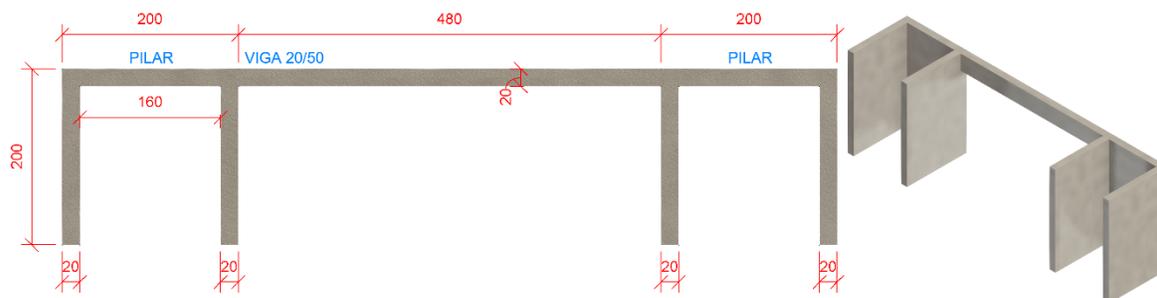


Figura 12 – Caso 4: Viga na extremidade fechada dos pilares em “u”.

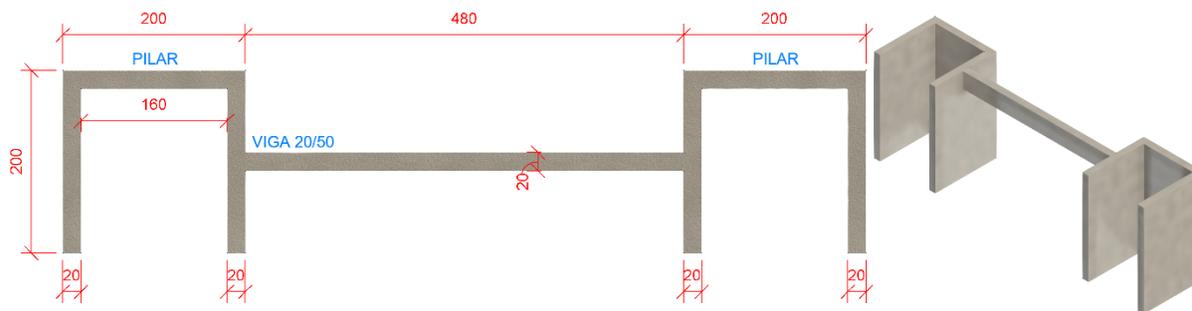


Figura 13 – Caso 5: Viga entre a extremidade fechada e aberta dos pilares em “u”.

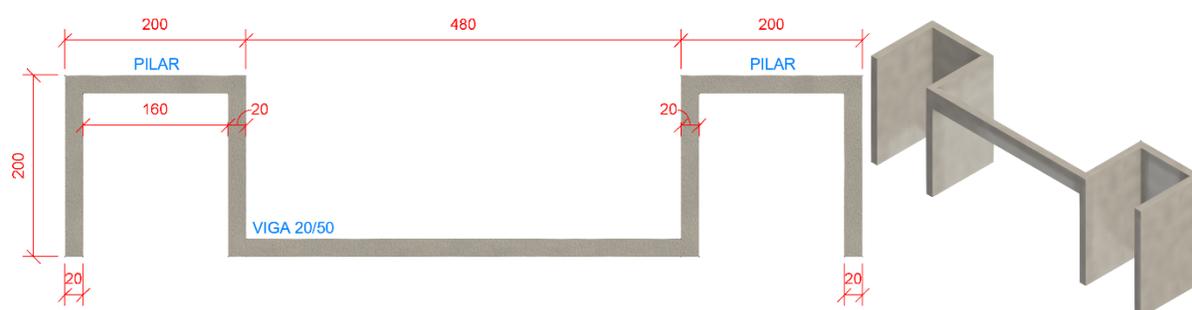


Figura 14 – Caso 6: Viga na extremidade aberta dos pilares em “u”.

Além disto, para o desenvolvimento dos resultados, foi considerado de forma aproximada a não linearidade física do concreto, seguindo as prescrições do item 15.7.3 da ABNT 6118 (2014). Também, para o efeito da flexibilização das ligações entre pilares-paredes e vigas, foi utilizado os valores da configuração inicial do TQS[®], adotando o LEPMOL igual a 3 e REDMOL igual a 1.

Para melhor entendimento dos modelos, será empregada uma identificação para cada um deles. A identificação inicia com o prefixo “C”, seguido do número do respectivo caso, variando a posição das vigas em relação ao pilar, consoante as figuras 9 a 14. Logo após, é informado a letra “M”, sucedido pelo numeral correspondente ao modelo. M1 são os modelos reticulados sem flexibilização obtidos através do *software* SAP2000[®], M2 são os modelos reticulados obtidos a partir do *software* TQS[®] com flexibilização e M3 são os modelos mistos, bidimensionais para os pilares e reticulados para as vigas, obtidos através do *software* SAP2000[®]. Na tabela 1 são apresentadas o esquema de identificações dos modelos.

Tabela 1 – Identificação dos modelos

Identificação do Modelo	Descrição
C1M1	Caso 1 - Modelo reticulado sem flexibilização
C1M2	Caso 1 - Modelo reticulado com flexibilização
C1M3	Caso 1 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)
C2M1	Caso 2 - Modelo reticulado sem flexibilização
C2M2	Caso 2 - Modelo reticulado com flexibilização
C2M3	Caso 2 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)
C3M1	Caso 3 - Modelo reticulado sem flexibilização
C3M2	Caso 3 - Modelo reticulado com flexibilização
C3M3	Caso 3 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)
C4M1	Caso 4 - Modelo reticulado sem flexibilização
C4M2	Caso 4 - Modelo reticulado com flexibilização
C4M3	Caso 4 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)
C5M1	Caso 5 - Modelo reticulado sem flexibilização
C5M2	Caso 5 - Modelo reticulado com flexibilização
C5M3	Caso 5 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)
C6M1	Caso 6 - Modelo reticulado sem flexibilização
C6M2	Caso 6 - Modelo reticulado com flexibilização
C6M3	Caso 6 - Modelo misto (bidimensional para os pilares e reticulado para as vigas)

Após processados os modelos, foi anotado os valores de momentos positivos e negativos das vigas de cada situação. Estes momentos servem como indicativos das rigidezes encontradas nas ligações entre vigas e pilares. As figuras 15, 16 e 17 ilustram os diagramas de momentos fletores do caso C6, alterando entre os modelos M1, M2 e M3 respectivamente. Na tabela 2 são apresentados os valores dos momentos obtidos dos *softwares*.

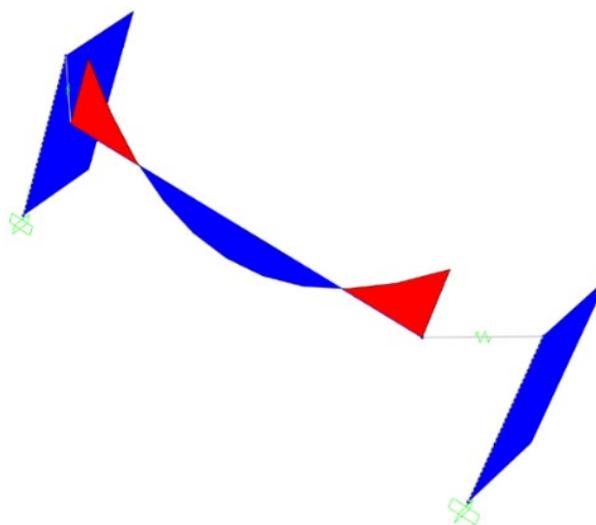


Figura 15 – Representação dos Momentos fletores da viga no C6M1 no SAP2000®.

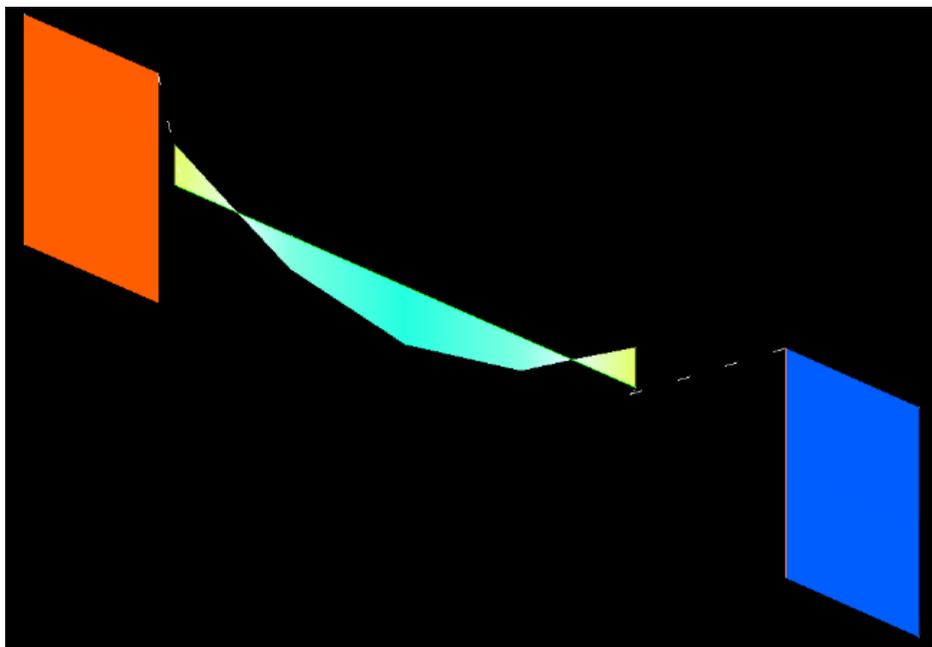


Figura 16 – Representação dos Momentos fletores da viga no C6M2 no TQS[©].

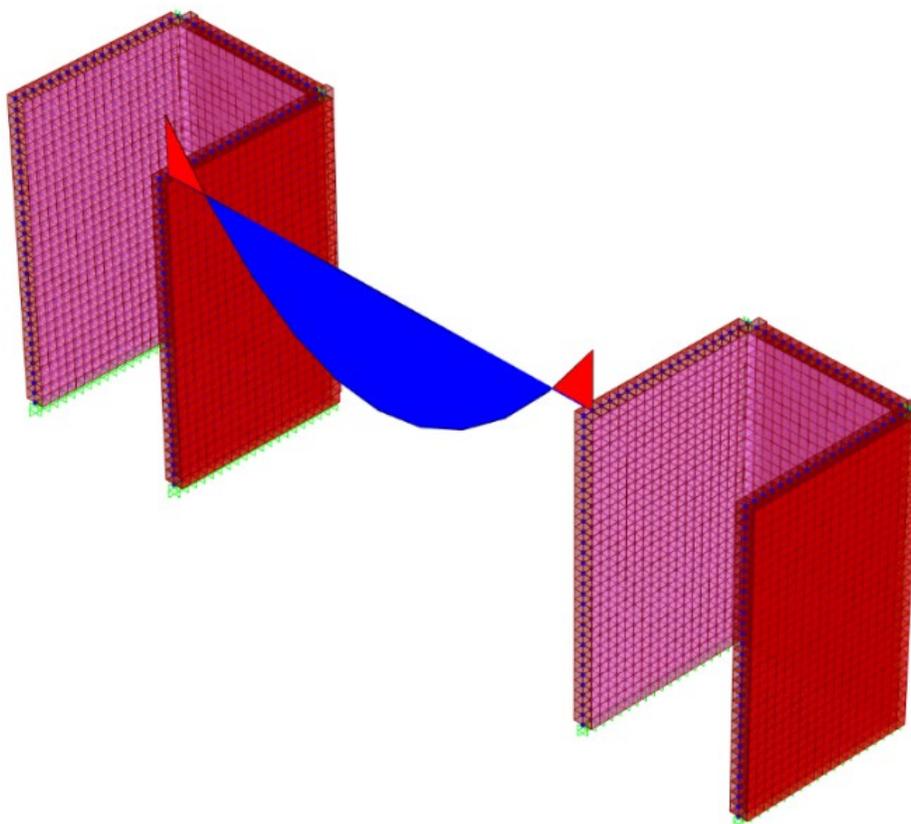


Figura 17 – Representação dos Momentos fletores da viga no C6M3 no SAP2000[©].

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MODELOS

Tabela 2 – Momentos das vigas nos modelos e a diferença entre eles.

Modelo	Momento Máximo Negativo (kN.m)	Momento Máximo Positivo (kN.m)	Comparação entre M2 e M1		Comparação entre M2 e M3	
			Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo
C1M1	-43,11	42,38	38,07%	39,69%	4,23%	2,23%
C1M2	-26,70	59,20				
C1M3	-27,88	57,91				
C2M1	-45,22	40,57	36,09%	40,74%	7,34%	4,60%
C2M2	-28,90	57,10				
C2M3	-31,19	54,59				
C3M1	-46,19	39,60	33,32%	39,39%	3,45%	2,45%
C3M2	-30,80	55,20				
C3M3	-31,90	53,88				
C4M1	-57,03	28,79	3,98%	4,55%	53,75%	36,26%
C4M2	-59,30	30,10				
C4M3	-38,57	47,22				
C5M1	-57,01	28,78	38,43%	76,51%	5,03%	3,00%
C5M2	-35,10	50,80				
C5M3	-33,42	52,37				
C6M1	-56,99	28,80	38,41%	73,89%	24,03%	12,89%
C6M2	-35,10	50,08				
C6M3	-28,30	57,49				

A tabela 2 apresenta os valores dos momentos máximos das vigas (tanto positivo, quanto negativo) de cada modelo, em kN.m. Mais além, são apresentadas as diferenças entre os modelos reticulados, com e sem flexibilização, e entre os modelos bidimensionais (casca) e o modelo reticulado com flexibilização.

A primeira diferença citada indica o impacto da flexibilização no modelo reticulado, ilustrando, como já citado, o problema na adoção de trechos rígidos. Já a segunda diferença, indica se os parâmetros usados pelo o TQS[©] produzem ou não, resultados próximos a aqueles obtidos através

de um modelo mais refinado que, neste trabalho, seriam os modelos de cascas modelados utilizando-se o SAP2000[©].

Observa-se pelos os valores da tabela 2 que, conforme esperado, quanto maior a excentricidade da viga em relação ao pilar, menor será a rigidez da ligação dos elementos, logo, menores serão os momentos negativos. Isso é justificável, pois somente uma região do pilar contribui efetivamente para a rigidez da ligação entre pilares-paredes e vigas.

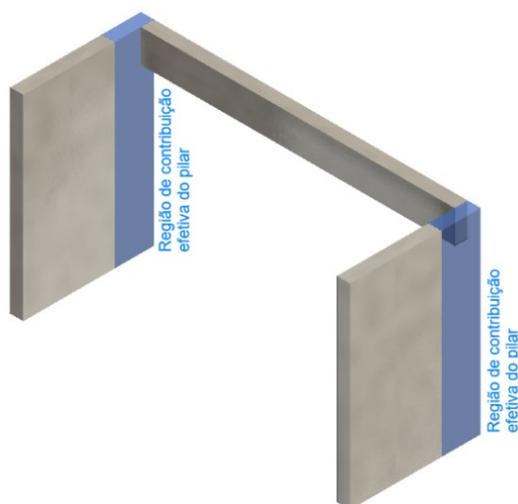


Figura 18 – Região de contribuição efetiva do pilar.

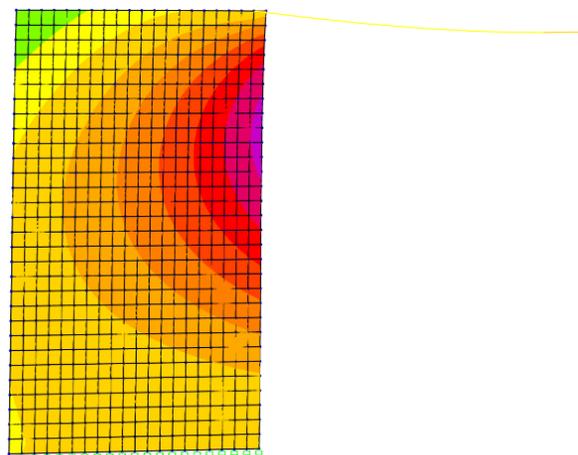


Figura 19 – Deformações horizontais ao longo do pilar-parede.

Também é possível observar que a flexibilização das ligações através das configurações iniciais do TQS[®] se mostrou consistente para os pilares retangulares, apresentando valor médio de aproximadamente 38% de flexibilização. As diferenças entre os resultados dos modelos reticulados flexibilizados do TQS[®] e os modelos bidimensionais do SAP2000[®], para os pilares retangulares, são aceitáveis, encontrando-se diferença máxima de 7%.

Para os pilares em “u” (casos 4 a 6), encontrou-se valores dispersos. Somente o caso 5 demonstrou uma convergência nos valores dos momentos obtidos através do modelo reticulado flexibilizado do TQS[®] (C5M2) e do modelo bidimensional do SAP2000[®] (C5M3). Já para os casos 4 e 6, encontrou-se grande divergência entre os valores obtidos pelos modelos, indicando a necessidade de melhor calibração dos critérios do TQS[®].

5.1.1 Ajuste nos critérios de LEPMOL e REDMOL do TQS[®]

Na tabela 2 são apresentadas as divergências dos valores de momentos obtidos através dos modelos reticulados do TQS[®] e dos modelos mistos do SAP2000[®] para os casos 4 e 6. Pode-se observar que o modelo do TQS[®] apresenta maior valor de momento negativo, o que indica uma maior rigidez na ligação viga e pilar-parede. A partir disto, será processado novamente os modelos do TQS[®], entretanto será configurado o LEPMOL igual a 2, ou seja, considerando uma faixa de contribuição efetiva do pilar igual a duas vezes a largura da viga que o intercepta, com o intuito de diminuir a rigidez da ligação. O parâmetro REDMOL será tomado com fixo.

Flexibiliza ligações viga-pilar 🔑	Não <input type="checkbox"/> Sim
Divisor do coeficiente de mola [REDMOL] 🔑	1
Multiplicador da largura da viga [LEPMOL] 🔑	2

Figura 20 – Ajuste nos critérios gerais de pórtico do TQS[®].

Na tabela 3 são apresentados os valores dos momentos obtidos nos modelos C4M2, C4M3, C6M2 e C6M3, com o ajuste dos critérios do TQS[®], e também apresenta as diferenças obtidas entre eles.

Tabela 3 – Momentos das vigas nos modelos dos casos 4 e 6 e a diferença entre eles.

Modelo	Momento Máximo Negativo (kNm)	Momento Máximo Positivo (kNm)	Comparação entre M2 e M3	
			Momento Negativo	Momento Positivo
C4M2	-39,14	49,97	1,48%	5,82%
C4M3	-38,57	47,22		
C6M2	-29,50	56,40	4,24%	1,90%
C6M3	-28,30	57,49		

Com o valor LEPMOL calibrado para 2, as diferenças entre os resultados apresentaram-se satisfatórias, com valor máximo de 5,82%.

6 CONCLUSÕES

As configurações iniciais do TQS©, usando LEPMOL e REDMOL igual a 3 e 1, respectivamente, atendeu muito bem os casos de pilares-paredes retangulares, apontando uma pequena diferença. Ao aplicá-los para os pilares-paredes em “u”, foi necessário ajuste nos critérios para se obter convergência nos resultados. Isto é um ponto de atenção para a realização dos projetos, visto que este tipo de pilar é comumente utilizado para estabilização lateral dos edifícios em caixas de elevadores. Conforme afirmado, apesar de um bom software auxiliar na produção de projetos no cotidiano, este por si só não garante um bom projeto estrutural. Há outros fatores que influenciam na excelência de projeto, e a maioria deles depende de quem opera a ferramenta, ou seja, o engenheiro. É deste que será exigido toda experiência e conhecimento para a validação de resultados dos softwares. Estes, não passam de “calculadoras” que automatizam cálculos para o usuário. Dessa maneira, se os critérios e premissas de projetos estiverem inadequados, os resultados obtidos serão equivocados.

Outro ponto é a transparência da ferramenta utilizada. Neste trabalho, por uso rotineiro do autor, foi estudado o software TQS©. Este permite que o usuário o configure, desde os critérios mais simples até os mais complexos. Isto ajuda entender os resultados que o software fornece. Há no mercado vários outros softwares que são considerados “caixas-pretas”, pois impossibilitam ajustar seus critérios. Isto dificulta a realização adequada do projeto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, F. C. O. ARAÚJO, T. D. **Uso de método de equivalência de inércia na análise dinâmica de laje nervurada pelo método dos elementos finitos**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: UFC, 2013.

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. Volume 3. Rio Grande: Editora Dunas, 2014.

ARAÚJO, T. J. **Estudo da ligação viga-pilar em sistema estrutural de concreto considerando a variação da semi-rigidez por meio de parâmetro geométrico da ligação**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió: UFAL, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: FEUP, 2003.

BERTERO, V. V. POPOV, E. P. **Seismic behavior of ductile moment-resisting reinforced concrete frames**. ACI Special Publication, 1977.

DINIZ, C. W. S; LAGES, E. N; BARBOZA, A. S. R. **Estabilidade global de sistemas estruturais de edifícios considerando a ligação viga-pilar parede**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, volume 12, nº 4. São Paulo: 2019.

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

Mais Engenharia: Pontos de atenção na modelação e cálculo de pilares paredes. AltoQI. Santa Catarina. Disponível em: <<https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/pontos-de-atencao-calculo-de-pilares-parede>>. Acesso em 04 de jul. de 2022.

PASCUAL, C. A. Q. **Parâmetros característicos para a definição de um modelo estático: “ pilar de pórticos” ou pilar-parede”**. Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 1987.

PEREZ, G. **Análise comparativa de modelos do sistema estrutural de um edifício de andares múltiplos em concreto armado**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 1999.

SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

STRAMANDINOLI, R. S. B. **Modelo de elementos finitos para análise não linear física e geométrica de vigas e pórticos planos de concreto armado**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2007.

TQS Docs: Pórtico espacial. TQS Informática. São Paulo. Disponível em: <<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3150&language=pt-BR>>. Acesso em: 04 de jul. de 2022.