



**PPE**  
PROGRAMA DE PROJETOS  
DE ESTRUTURAS

**Politécnica**  
UFRJ

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica**  
**Programa de Projeto de Estruturas**

Alexandre Esteves Gomes dos Santos

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO CONSTRUTIVO EM EDIFÍCIOS  
DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO**

Rio de Janeiro

2025

Alexandre Esteves Gomes dos Santos

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO CONSTRUTIVO EM EDIFÍCIOS DE  
MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientadores:

Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Rio de Janeiro

2025

Santos, Alexandre Esteves Gomes

Análise da influência do processo construtivo em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado / Alexandre Esteves Gomes dos Santos – 2025.

107.: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2025.

Orientadores: Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho e Sergio Hampshire de Carvalho Santos

1. Encurtamento dos pilares, 2. Modelos dos elementos finitos, 3. Processo de construção. I. Silva Filho, Júlio Jerônimo Holtz II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Análise da influência do processo construtivo em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO CONSTRUTIVO EM EDIFÍCIOS DE  
MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO

Alexandre Esteves Gomes dos Santos

Orientadores:

Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Dissertação de Mestrado apresentada Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

---

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho, D. Sc., UFRJ

---

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

---

Flávia Moll de Souza, D. Sc.

---

Eduardo Rizzatti, D. Sc.

Rio de Janeiro  
2025

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o princípio de todas as minhas escolhas e ações, por guiar meu caminho e me dar direção.

Expresso minha gratidão à minha amada família. Meu filho Francisco, com seu sorriso inocente e amoroso, é uma fonte constante de alegria em minha vida. Minha filha Maria, que apesar de tão pequena já gera tanta felicidade em minha vida. Minha esposa Ana Cristina, sua fé inabalável e companheirismo diário são pilares que sustentam nossa jornada juntos. Aos meus queridos pais, Luiz Alberto e Rosalia, agradeço o apoio contínuo, incentivo constante e pelas orações que me fortalecem.

Não posso deixar de agradecer ao meu irmão Guilherme, sua esposa Juliana e seus filhos, Bernardo e Alice, por compartilharem conosco momentos de pura alegria e carinho.

Um agradecimento especial aos professores Júlio Jerônimo Holtz e Sérgio Hampshire, cuja dedicação, paciência e disponibilidade têm sido uma bênção em minha trajetória.

Quero também expressar minha gratidão à empresa Contec Engenharia, por proporcionar o suporte necessário para que eu completasse esta etapa tão importante em minha jornada. E à empresa TQS Informática, meu reconhecimento pelo apoio na disponibilização do programa, fundamental para meu trabalho.

## RESUMO

Santos, Alexandre Esteves Gomes. **Análise da influência do processo construtivo em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado**. Rio de Janeiro. 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2025.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre modelos de elementos finitos desenvolvidos nos programas SAP2000 e ROBOT e um modelo computacional no programa TQS. No TQS, foram analisados o efeito incremental, que considera os encurtamentos dos pilares durante a fase construtiva, e o aumento de rigidez em pilares e vigas, representado pelos coeficientes MULAXI e MULETR, respectivamente. As análises foram realizadas em edifícios de mesma arquitetura, mas com diferentes alturas, representadas por 15 andares (simulando edifícios de menor porte) e 40 andares (representando edifícios altos). A metodologia incluiu a validação do efeito incremental por meio da comparação dos deslocamentos e esforços obtidos nos diferentes modelos computacionais, destacando a relevância de se considerar os efeitos progressivos durante a construção de edifícios altos. Os resultados demonstraram que os deslocamentos calculados pela análise incremental diferem significativamente daqueles obtidos em uma análise de passo único, na qual todas as cargas são consideradas atuantes apenas após a conclusão da estrutura. Além disso, as cargas nos apoios e os momentos fletores na estrutura também são alterados, reforçando a necessidade de se adotar a análise incremental para o dimensionamento estrutural. Conclui-se que é indispensável uma avaliação criteriosa na escolha do método de análise, considerando a importância de representar com precisão as condições reais da construção para obter resultados confiáveis. Este estudo reforça a relevância de abordagens que integrem a sequência construtiva, contribuindo para melhorar a segurança, eficiência e durabilidade dos projetos estruturais. Adicionalmente, o trabalho amplia a compreensão sobre os impactos dos coeficientes de aumento de rigidez nos resultados gerados pelo TQS.

Palavras-chave: modelos de elementos finitos; análise incremental; coeficientes MULAXI e MULETR; TQS; edifícios altos; sequência construtiva.

## **ABSTRACT**

Santos, Alexandre Esteves Gomes. **Analysis of the Influence of the Construction Process on Multi-Story Reinforced Concrete Buildings**. Rio de Janeiro. 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2025.

This study presents a comparative analysis between finite element models developed using the SAP2000 and ROBOT software and a computational model in the TQS software. In TQS, the incremental effect, which considers column shortening during the construction phase, and the increase in stiffness in columns and beams, represented by the MULAXI and MULETR coefficients, respectively, were analyzed. The analyses were conducted on buildings with the same architectural design but differing heights, represented by 15 stories (simulating smaller buildings) and 40 stories (representing tall buildings). The methodology included validating the incremental effect by comparing the displacements and forces obtained from different computational models, highlighting the importance of considering progressive effects during the construction of tall buildings. The results showed that the displacements calculated using the incremental analysis differ significantly from those obtained in a single-step analysis, where all loads are considered acting only after the structure is completed. Additionally, the support forces and moments in the structure are also affected, reinforcing the need to adopt incremental analysis for structural design. It is concluded that a careful evaluation is indispensable when choosing the analysis method, given the importance of accurately representing real construction conditions to achieve reliable results. This study underscores the relevance of approaches that incorporate the construction sequence, contributing to improved safety, efficiency, and durability in structural designs. Furthermore, the work expands the understanding of the impacts of stiffness increase coefficients on the results generated by TQS.

**Keywords:** finite element models; incremental analysis; MULAXI and MULETR coefficients; TQS; tall buildings; construction sequence

## SUMÁRIO

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                       | 1  |
| 1.1. Objetivo .....                                       | 4  |
| 1.2. Justificativa.....                                   | 4  |
| 1.3. Metodologia.....                                     | 5  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                            | 8  |
| 2.1. Fator de aumento da seção dos pilares (MULAXI) ..... | 19 |
| 2.2. Método dos elementos finitos.....                    | 23 |
| 2.3. Modelagem incremental .....                          | 26 |
| 2.4. Deslocamento com única e múltiplas etapas .....      | 30 |
| 3. ESTUDO DE CASOS .....                                  | 33 |
| 4. ANÁLISE DE RESULTADOS .....                            | 44 |
| 4.1. Análise de variação do MULETR e MULAXI .....         | 44 |
| 4.2. Comparação entre os modelos EDIF 15.....             | 65 |
| 4.3. Comparação entre os modelos EDIF 40.....             | 75 |
| 5. CONCLUSÕES .....                                       | 89 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                       | 91 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 – Diferença de encurtamento entre pilares exteriores e interiores (traduzido).<br>Fonte: FINTEL; GHOSH; IYENGAR. (1986)..... | 5  |
| Figura 1-2 – Fluxograma do trabalho. ....                                                                                               | 7  |
| Figura 2-1 – Aplicação padrão do MULAXI. Fonte: TQS.....                                                                                | 20 |
| Figura 2-2 – Viga de transição / tirantes. Fonte: TQS.....                                                                              | 21 |
| Figura 2-3 – Critérios para definição do aumento da seção dos pilares. Fonte: TQS adaptado.....                                         | 21 |
| Figura 2-4 – Diagramas de momentos fletores de pórtico sem e com o coeficiente MULAXI, respectivamente. Fonte: TQS informática.....     | 23 |
| Figura 2-5 – Graus de liberdade. Fonte: SAP2000 CSi Reference Manual .....                                                              | 24 |
| Figura 2-6 – Etapas no modelo convencional. Fonte: GORZA, 2000 .....                                                                    | 27 |
| Figura 2-7 – Etapas no modelo evolutivo. Fonte: GORZA, 2000.....                                                                        | 27 |
| Figura 2-8 – Viga sob efeito de deslocamento diferencial. Fonte: GORZA, 2000 .....                                                      | 28 |
| Figura 2-9 – Efeito incremental. Fonte: TQS informática .....                                                                           | 29 |
| Figura 2-10 – Análise passo único. Fonte: TQS.....                                                                                      | 31 |
| Figura 2-11 – Análise incremental. Fonte: Modificado de TQS .....                                                                       | 32 |
| Figura 3-1 – Fôrma do pavimento-tipo (medidas em cm). Fonte: Lima e Macedo (2014)<br>.....                                              | 35 |
| Figura 3-2 – Fluxograma Geral TQS. Fonte: TQS informática .....                                                                         | 37 |
| Figura 3-3 – Modelos a serem utilizados na análise. Fonte: TQS.....                                                                     | 38 |
| Figura 3-4 – Modelo IV. Fonte: TQS.....                                                                                                 | 39 |
| Figura 3-5 – Modelo VI. Fonte: TQS.....                                                                                                 | 40 |
| Figura 3-6 – Análise estrutural com efeito incremental. Fonte: TQS. ....                                                                | 41 |
| Figura 3-7 – Aplicação das etapas de carregamento. Fonte: TQS. ....                                                                     | 42 |
| Figura 3-8 – Curva de incremento do módulo de elasticidade. Fonte: TQS. ....                                                            | 43 |
| Figura 4-1 – Variação das reações nos apoios a partir de diversas configurações de rigidez.<br>.....                                    | 46 |
| Figura 4-2 – Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15. ....                                                           | 49 |
| Figura 4-3 – Variação do momento fletor em % da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.<br>.....                                              | 50 |
| Figura 4-4 – Momento fletor em kN.m, no meio do vão, da viga do EDIF 15. ....                                                           | 52 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-5 – Variação do momento fletor em %, no meio do vão, da viga V5 do EDIF 15.                            | 52 |
| Figura 4-6 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15.                                               | 54 |
| Figura 4-7 – Reações verticais nos apoios do EDIF 15.                                                           | 55 |
| Figura 4-8 – Variação das reações verticais nos apoios do EDIF 15.                                              | 56 |
| Figura 4-9 – Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.                                        | 58 |
| Figura 4-10 – Variação do momento fletor em % da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.                              | 58 |
| Figura 4-11 – Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.                                              | 60 |
| Figura 4-12 – Variação do Momento Fletor da viga V5 no meio do vão em relação com o TQS Incremental do EDIF 15. | 61 |
| Figura 4-13 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40.                                              | 63 |
| Figura 4-14 – Reações verticais nos apoios do EDIF 40.                                                          | 64 |
| Figura 4-15 – Variação das reações verticais nos apoios do EDIF 40.                                             | 64 |
| Figura 4-16 – Modelo 3D do EDIF15 fornecido pelo programa TQS.                                                  | 65 |
| Figura 4-17 – Diagrama de momento fletor da viga V5 em tf.m próximo ao P5 do EDIF 15.                           | 67 |
| Figura 4-18 – Momento Fletor da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.                                               | 68 |
| Figura 4-19 – Diagrama dos momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 15.                              | 70 |
| Figura 4-20 – Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 15.                                              | 71 |
| Figura 4-21 – Gráfico dos deslocamentos diferenciais em cm entre P2 e P5 do EDIF 15.                            | 72 |
| Figura 4-22 – Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 15.                                        | 73 |
| Figura 4-23 – Diagrama resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15.                                            | 74 |
| Figura 4-24 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15.                                                     | 75 |
| Figura 4-25 – Modelo 3D do EDIF40 fornecido pelo programa TQS.                                                  | 76 |
| Figura 4-26 – Momento fletor da viga em kN.m V5 próximo ao P5 do EDIF 40.                                       | 78 |
| Figura 4-27 – Diagrama do momento fletor em tf.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.                           | 79 |
| Figura 4-28 – Diagrama dos momentos fletores em tf.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.                       | 82 |
| Figura 4-29 – Momento fletor em kN.m da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.                                      | 83 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-30 – Gráfico dos deslocamentos diferenciais em cm entre P2 e P5 do EDIF 40.<br>..... | 85 |
| Figura 4-31 – Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 40. ....                 | 86 |
| Figura 4-32 – Gráfico da resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40.....                    | 87 |
| Figura 4-33 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40. ....                              | 88 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4-1 – Reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez (kN).....                                                       | 44 |
| Tabela 4-2 – Diferença das reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez em comparação com a análise incremental (kN)..... | 46 |
| Tabela 4-3 – Efeito MULAXI nos modelos comparados.....                                                                                               | 48 |
| Tabela 4-4 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15 (kN.m) .....                                                                      | 48 |
| Tabela 4-5 – Momentos fletores, no meio do vão, da viga V5 do EDIF 15 (kN.m) .....                                                                   | 51 |
| Tabela 4-6 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15 (mm).....                                                                           | 53 |
| Tabela 4-7 – Reações verticais nos apoios do EDIF 15 (kN).....                                                                                       | 54 |
| Tabela 4-8 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m) .....                                                                      | 56 |
| Tabela 4-9 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m) .....                                                                     | 59 |
| Tabela 4-10 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40 (mm).....                                                                          | 62 |
| Tabela 4-11 – Resultante nos apoios do EDIF 40 (kN).....                                                                                             | 63 |
| Tabela 4-12 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15 (kN.m) .....                                                                     | 66 |
| Tabela 4-13 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 15 (kN.m) .....                                                                    | 69 |
| Tabela 4-14 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15 (mm).....                                                                          | 71 |
| Tabela 4-15 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15 (kN) .....                                                                                | 73 |
| Tabela 4-16 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m) .....                                                                     | 77 |
| Tabela 4-17 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m) .....                                                                    | 80 |
| Tabela 4-18 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40 (mm).....                                                                          | 83 |
| Tabela 4-19 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40 (kN) .....                                                                                | 86 |

# 1. INTRODUÇÃO

---

No contexto do crescimento acelerado dos grandes centros urbanos, os edifícios de múltiplos andares têm se tornado uma das soluções mais viáveis para construções comerciais e residenciais, pois permitem otimizar a utilização dos terrenos disponíveis devido à verticalização promovida. Dessa forma, faz-se necessário o domínio dos materiais e da modelagem estrutural com a finalidade de elaborar estruturas mais econômicas e confiáveis.

Do ponto de vista estrutural, a classificação de um edifício como alto não pode ser feita apenas com base no número de pavimentos que ele possui. Não existe um conceito que relacione diretamente o porte de uma estrutura com a quantidade de andares ou suas proporções. Desse modo, um edifício é considerado alto quando, em razão de sua altura, as forças horizontais geradas pelo vento são relativamente importantes comparativamente com as gravitacionais e não podem ser desconsideradas na análise estrutural e, conseqüentemente, no projeto.

O cotidiano do engenheiro estrutural é preenchido por programas de cálculo, de elementos finitos ou de modelagem, tais como SAP2000, ROBOT, CYPECAD, TQS, entre outros. Por essa razão, torna-se imprescindível entender as propriedades dos elementos utilizados, além de dominar seus métodos de cálculo e as condições de contorno aplicáveis.

Adicionalmente, é fundamental considerar as normas e conhecer os critérios adotados por cada programa, bem como suas possíveis limitações, especialmente ao lidar com parâmetros elásticos não lineares e estruturas de múltiplos pavimentos.

A desconsideração da análise do processo construtivo da edificação pode comprometer a segurança de uma estrutura. Assim, para sua incorporação, os profissionais responsáveis pelo projeto normalmente empregam métodos integrados ao próprio programa computacional.

Nos processos de construção de estruturas, as cargas não são aplicadas de maneira instantânea, mas de forma gradual ao longo do tempo. Esse aspecto, muitas vezes negligenciado no projeto, pode dar origem a deformações acumulativas na estrutura,

influenciando diretamente na distribuição da solicitação. Esse fenômeno é conhecido como "efeito incremental".

Embora, nas análises estruturais convencionais, esse efeito seja frequentemente desconsiderado, tal abordagem é aceitável quando se trata de estruturas de menor porte. Em edifícios de grande altura ou com geometrias complexas, com distribuições irregulares de pilares, esse efeito pode desempenhar um papel imprescindível, visto que essa subarmação com o aumento da carga durante a vida útil pode gerar recalque diferencial, fissuras nas alvenarias entre outras manifestações patológicas.

Ademais, as análises simplificadas frequentemente adotam premissas que excluem fatores como não linearidade física e geométrica, além de não considerarem o comportamento temporal das deformações e do encurtamento do material. Essas simplificações, embora práticas, podem distorcer os resultados, especialmente quando o efeito incremental é substancial. Portanto, é fundamental considerar o efeito da sua variação ao longo do tempo, visando garantir análises estruturais precisas e confiáveis.

Na construção de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto, o uso de escoras e reescoras é essencial. Esse método, que alterna ciclos de dois pavimentos sustentados por escoras e um pavimento sustentado por reescoras, é utilizado devido à resistência limitada do concreto em seus estágios iniciais de cura.

O uso de escoras temporárias, conectadas às fôrmas, é indispensável nos primeiros dias após a concretagem, pois o concreto ainda não alcançou a resistência necessária para suportar as cargas aplicadas. À medida que a resistência do concreto aumenta, as escoras cedem lugar às reescoras. Essas últimas não estão associadas às fôrmas, permitindo que as cargas sejam gradualmente transferidas para a estrutura, conforme ocorre a troca entre os sistemas.

O processo é delineado em três etapas distintas. São elas: a retirada das reescoras do pavimento mais baixo, a remoção das escoras e fôrmas do mesmo pavimento e a implementação do sistema de escoras remanescentes no pavimento onde ocorreu a remoção das escoras e fôrmas e a instalação e concretagem do próximo nível.

Esse método é de suma importância para garantir a estabilidade e a segurança progressiva da estrutura durante seu desenvolvimento. A transição das escoras para as

reescoras permite a adaptação da estrutura à evolução da resistência do concreto, assegurando a absorção gradual das cargas impostas ao edifício.

No Brasil, há regulamentações específicas para o uso de fôrmas e escoramentos em construções, especialmente a NBR 15696:2009 (Escoramento de estruturas de concreto – Desempenho e segurança nas operações de montagem e desmontagem) e a NBR 14931:2023 (Execução de estruturas de concreto – Procedimento). A primeira norma estabelece requisitos mínimos de segurança e desempenho para o escoramento de estruturas de concreto, com ênfase na segurança durante as fases de montagem e desmontagem, prevenindo falhas durante o uso. Já a segunda, fornece diretrizes gerais para a execução de estruturas de concreto, incluindo procedimentos de escoramento, além de práticas de segurança e especificações para o suporte adequado das cargas. No entanto, essas regulamentações não abrangem as deformações estruturais que podem ocorrer ao longo do processo de construção.

Uma das principais limitações nas análises de deformação é a omissão das etapas executivas do processo construtivo. Especificamente, durante a etapa em que os pavimentos estão associados ao sistema de escoramento, ocorrem deformações durante a concretagem. Estas últimas se propagam para os pavimentos abaixo destes, a eles conectados por meio dos escoramentos.

Os modelos usuais não levam em consideração essas deformações iniciais nos pavimentos, nem abordam o estado de fissuração das seções antes da retirada do escoramento. As deformações nos pontos de apoio também não são tratadas de maneira adequada nos modelos, podendo ser estas decorrentes do encurtamento dos pilares, das deformações nas vigas de transição ou das deformações nas fundações.

Em síntese, as projeções dos pavimentos são realizadas em um ambiente idealizado, onde se considera que a ação da gravidade, gerando o peso próprio, a sobrecarga de utilização e as demais cargas permanentes se manifestam apenas após a retirada dos escoramentos. Nesse contexto, supõe-se que as cargas gravitacionais não influenciam a estrutura durante as etapas de escoramento. Isso cria uma situação simplista em que a análise não reflete integralmente as condições reais de carregamento durante a construção.

### **1.1. Objetivo**

Esta dissertação tem como objetivo explorar e analisar a influência do processo construtivo no comportamento estrutural, considerando os efeitos do encurtamento dos pilares de concreto armado, utilizando a modelagem do programa TQS, especificamente em relação à consideração do encurtamento dos pilares durante a fase construtiva. Isso é feito por meio de uma comparação com os resultados obtidos das análises nos programas SAP2000 e ROBOT. Soma-se a isso, a busca pela validação do efeito incremental do TQS, examinando sua capacidade de capturar o comportamento incremental das estruturas durante a construção. A pesquisa também visa contribuir para uma compreensão mais precisa da modelagem estrutural do TQS e sua aplicabilidade no contexto de análises de encurtamento de pilares e efeitos incrementais.

### **1.2. Justificativa**

Apesar da rapidez na execução das análises de estruturas de concreto armado, observa-se que os programas comerciais, utilizados em projetos estruturais, apresentam limitações conforme o tipo de avaliação desejada, desconsiderando que os edifícios não são construídos de forma instantânea, mas sim, gradualmente. Logo, para uma análise mais assertiva de edifícios altos, é essencial considerar a construção progressiva e integrada da estrutura, sendo imprescindível a consideração do encurtamento dos pilares. Esta medida não é aplicada usualmente no cotidiano da construção civil aos edifícios de menor altura, visto que estes não apresentam variações significativas na análise dos resultados obtidos por métodos simplificados.

Uma alternativa é considerar, ainda que de forma aproximada, o aumento da rigidez dos pilares, que aplica um coeficiente multiplicador à área da seção transversal dos pilares. Entretanto, é crucial fazer previsões precisas dos deslocamentos diferenciais entre pilares em uma estrutura, especialmente ao se considerar o estado limite de serviço. Se houver uma previsão incorreta, a estrutura pode ser comprometida, causando fissuração, deflexão excessiva das lajes, vigas e outros elementos secundários, danos às fachadas, revestimentos, acabamentos, instalações mecânicas e hidráulicas, bem como alvenarias. Tais problemas podem ser atribuídos a recalques diferenciais elevados, como observado na Figura 1-1. Portanto, é fundamental prever esses deslocamentos com a devida atenção, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos na análise.

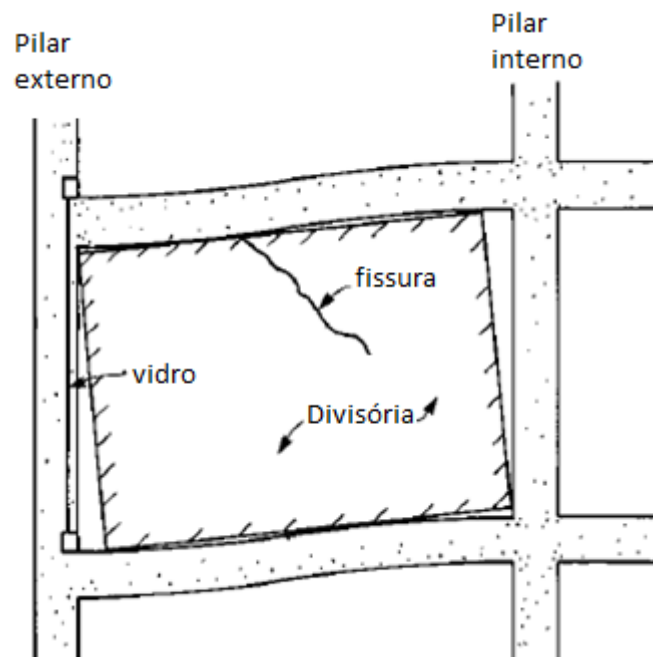


Figura 1-1 – Diferença de encurtamento entre pilares exteriores e interiores (traduzido).

Fonte: FINTEL; GHOSH; IYENGAR. (1986).

Destaca-se a importância de cada vez mais tornar as análises computacionais condizentes com a realidade das construções, com a finalidade de gerar modelos mais seguros e econômicos. Pretendendo melhorar o aumento de rigidez dos pilares, este trabalho almeja analisar as fases construtivas dos programas SAP2000 e ROBOT, comparando seus resultados com os do TQS.

### 1.3. Metodologia

São examinadas duas edificações de alturas distintas, buscando estabelecer comparações entre o modelo de passo único e o efeito incremental empregado pelo programa TQS. Para isso, são comparados os resultados obtidos com as respostas dos programas ROBOT e SAP2000.

Com o propósito de validar os resultados obtidos pelos programas, foi conduzida uma análise utilizando a mesma configuração arquitetônica adotada no trabalho de Lima e Macedo (2014). Essa análise abrange uma edificação de 15 pavimentos (EDIF15) e outra de 40 pavimentos (EDIF40).

O fluxograma na Figura 1-2 apresenta as etapas principais e subsequentes envolvidas na análise comparativa de modelos estruturais para edifícios de diferentes

alturas, iniciando-se pela pesquisa bibliográfica, que proporciona uma base teórica sólida para o estudo. Em seguida, procede-se à escolha dos edifícios, selecionando-se duas estruturas de referência: um edifício de 15 pavimentos e outro de 40 pavimentos, aplicando a mesma arquitetura para análise. Essa seleção possibilita avaliar como o processo construtivo afeta o comportamento de estruturas com alturas distintas.

Após a escolha do edifício, define-se o método de modelagem a ser empregado nos programas de análise estrutural. Na geração dos edifícios, são desenvolvidos modelos para ambas as alturas, considerando diferentes abordagens em cada programa. No TQS, aplicam-se duas metodologias: a de incorporação do efeito incremental e a de passo único (padrão). No MEF (ROBOT e SAP2000), são desenvolvidos três tipos de modelos: o clássico, o evolutivo e o EVOL+R, que inclui os efeitos de escoramento e reescoramento. Essas variações metodológicas permitem avaliar como cada sistema de análise responde à inclusão das cargas incrementais e à sequência construtiva.

Concluída a modelagem, realiza-se a comparação dos resultados para cada altura de edifício, iniciando-se com os modelos de 15 pavimentos e, em seguida, com os de 40 pavimentos. Essa análise comparativa permite observar as variações nos deslocamentos e esforços obtidos em cada programa e método de análise, evidenciando as diferenças de comportamento estrutural entre os modelos incremental e convencional. Em seguida, procede-se à comparação entre os resultados dos edifícios de 15 e 40 pavimentos para avaliar o impacto do processo construtivo em estruturas de diferentes alturas.

Por fim, todos os resultados são sintetizados na etapa de conclusão, na qual são sugeridas recomendações sobre o uso de análises incrementais e o impacto do processo construtivo nos deslocamentos e esforços de estruturas altas.

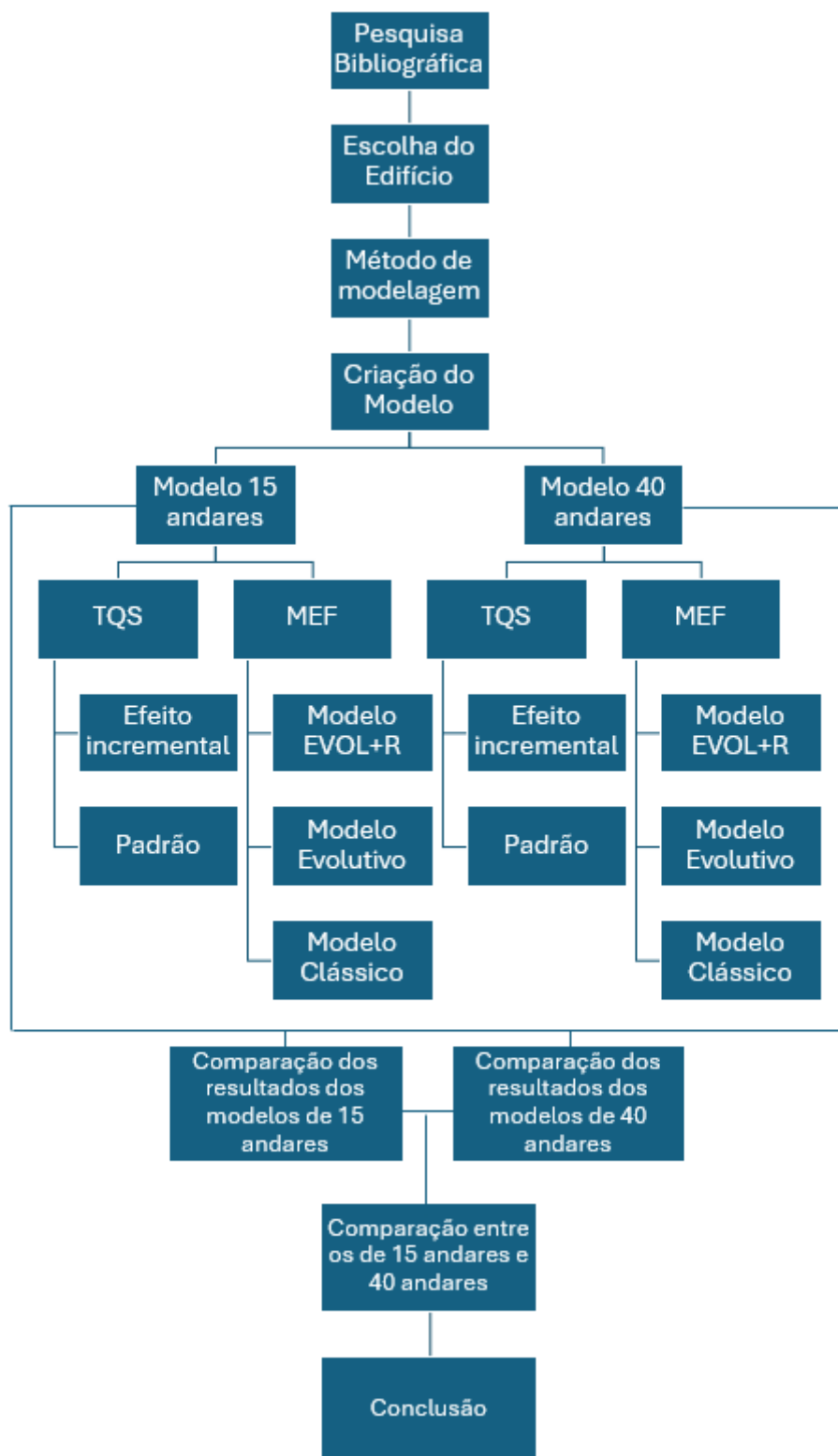


Figura 1-2 – Fluxograma do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O avanço da engenharia estrutural ao longo do tempo foi significativo, contando com a contribuição de grandes pesquisadores que exploraram os efeitos das etapas construtivas nas análises de estruturas. Grundy e Kabaila (1963) foram pioneiros ao propor uma metodologia inovadora para a análise de cargas durante a construção de edifícios altos, abordando aspectos que se tornaram essenciais para a segurança e precisão na engenharia estrutural. Eles introduziram o conceito de carregamento incremental, propondo que cargas permanentes - como o peso próprio das estruturas e revestimentos - fossem aplicadas progressivamente em cada pavimento, conforme o avanço da obra. Ao considerar essa abordagem, o estudo de Grundy e Kabaila diferiu das práticas tradicionais, que se caracterizam por aplicar toda a carga ao término da construção, o que resulta em modelagens menos precisas dos esforços e deslocamentos que ocorrem ao longo do processo. A aplicação gradual das cargas possibilitou uma previsão mais realista dos efeitos sobre os elementos estruturais, destacando a importância do controle de cada fase para evitar sobrecargas acumulativas que poderiam comprometer a estabilidade da estrutura.

Um dos aspectos centrais do trabalho de Grundy e Kabaila foi a avaliação do escoramento temporário em lajes e pavimentos. Eles observaram que o uso adequado de escoras e reescoras - escoramentos remanescentes - redistribui as cargas de forma mais eficaz ao longo da estrutura, garantindo, que os pavimentos inferiores não suportem toda a carga acumulada. Essa redistribuição progressiva de cargas contribui para a redução de deformações diferenciais e para a proteção da integridade estrutural da edificação. Ao evitar recalques excessivos e consequentes tensões adicionais, essa prática reduz o risco de fissuras e outros danos que poderiam ocorrer se os pavimentos superiores fossem apoiados sem esse controle gradual.

Outro ponto significativo do artigo de Grundy e Kabaila foi a introdução do coeficiente "K", que permitiu quantificar a carga que cada pavimento suporta proporcionalmente às cargas totais acumuladas ao longo da construção. Esse coeficiente permite que engenheiros ajustem os cálculos de esforços de acordo com o nível e a localização de suporte temporário de cada pavimento, proporcionando um dimensionamento preciso e racional do escoramento. Com o uso de valores apropriados de K para cada pavimento, é possível evitar o subescoramento, que leva a deformações

indesejadas, assim como o escoramento excessivo, que acarreta custos desnecessários sem ganhos adicionais.

Na sequência dos avanços trazidos por Grundy e Kabaila, a pesquisa de Choi e Kim (1985) expandiu esses conceitos ao introduzir um resultado específico para estruturas com múltiplos pavimentos sujeitos à aplicação sequencial de cargas gravitacionais. Eles enfatizaram a importância de um modelo de construção que acompanhasse o progresso da obra etapa a etapa, mostrando como as deformações diferenciais e o encurtamento axial são diretamente afetados pela progressão de cargas ao longo do tempo.

Choi e Kim observaram que, em edifícios altos, a fluência do concreto - que é a deformação contínua sob uma carga constante ao longo do tempo - aumenta significativamente as deformações nos pilares. Além disso, a retração do concreto, que resulta em uma redução volumétrica ao longo do tempo, contribui para a alteração do alinhamento e a redução da estabilidade estrutural.

Eles demonstraram que análises convencionais, que ignoram os fenômenos de fluência e retração, podem subestimar as tensões e deslocamentos diferenciais entre pilares centrais e periféricos, o que aumenta o risco de deformações excessivas e desalinhamentos. Propuseram, assim, a implementação de práticas como ajustes nos níveis de piso durante a construção, utilizando técnicas de contraflechas e ajustes estruturais nos pavimentos inferiores para alinhar adequadamente os pavimentos superiores.

Essa abordagem visa reduzir os efeitos cumulativos causados pelo encurtamento diferencial de pilares e melhorar o nivelamento dos pavimentos conforme o edifício se desenvolve verticalmente. A metodologia de Choi e Kim estabeleceu bases importantes para o desenvolvimento de técnicas computacionais mais avançadas, as quais hoje integram o comportamento incremental das cargas em modelos tridimensionais de análise estrutural.

No contexto brasileiro, o trabalho de Kripka (1990) abordou a análise incremental construtiva de edificações, enfatizando a importância de se considerar a sequência de construção e carregamento para garantir maior precisão nos esforços e deslocamentos estruturais. Utilizando um programa de computador baseado no método dos deslocamentos, a pesquisa comparou os métodos de análise incremental e convencional,

destacando como o modelo incremental permite calcular não apenas os esforços finais, mas também aqueles desenvolvidos em etapas específicas da construção, incluindo efeitos de escoramento e construção de alvenarias.

Evidenciou-se que o procedimento convencional frequentemente leva a resultados imprecisos ao não contabilizar as cargas aplicadas durante a construção. Com o procedimento incremental, foi possível obter uma representação mais próxima das condições reais da estrutura, capturando os esforços máximos e mínimos de maneira mais realista. Assim, a análise incremental, para o autor, tornou-se indispensável nas construções, especialmente naquelas de maior complexidade, uma vez que minimiza o risco de subdimensionamentos e contribui para a segurança da edificação.

Para alcançar esses objetivos, Kripka desenvolveu o programa ACON, que realiza a análise de pórticos de edifícios por meio de sequências de carregamento progressivo. Esse programa, escrito em FORTRAN, incorpora técnicas que permitem reduzir o volume de dados necessários para modelar estruturas de múltiplos andares e assim facilitar a simulação de edifícios altos. Com o uso de subestruturas e a simulação de apoios elásticos, o ACON possibilita que a análise incremental seja realizada com maior eficiência e precisão.

Concluiu-se que a análise incremental construtiva é essencial para aproximar as condições de cálculo das condições reais a que as estruturas estão submetidas. Além disso, Kripka propõe sugestões para futuras implementações computacionais que poderiam aprimorar ainda mais a eficácia e aplicabilidade dessa metodologia em projetos de engenharia civil, consolidando o uso de modelos incrementais como prática recomendada na análise de estruturas.

O projeto de Prado (1999) trouxe contribuições significativas para a compreensão dos efeitos das etapas construtivas em estruturas de concreto armado, abordando as cargas incrementais e a análise tridimensional das estruturas submetidas a essas ações. Prado implementou uma abordagem tridimensional usando o método dos elementos finitos, que permite considerar não apenas a sobreposição gradual de pavimentos, mas também as variações nas propriedades do concreto ao longo do tempo, como fluência e retração. Ele desenvolveu um método aproximado para determinar as ações que ocorrem durante a construção, introduzindo uma nova metodologia para a verificação dos estados limites.

Essa metodologia considera que a construção de edifícios de múltiplos pavimentos exige uma abordagem incremental devido às mudanças nas propriedades estruturais durante o processo de cura e endurecimento do concreto. Prado argumentou que as análises convencionais, que pressupõem a aplicação das cargas como se fossem instantâneas, frequentemente subestimam os esforços e deslocamentos que ocorrem ao longo da construção. Sua pesquisa destacou a importância de incluir essas cargas incrementais para que as estruturas possam suportar, com segurança, o peso acumulado à medida que cada pavimento é construído, o que eleva a precisão do projeto estrutural e reduz o risco de falhas.

Além disso, o trabalho de Prado ressaltou que o método incremental é fundamental para uma representação realista das condições estruturais, proporcionando uma análise mais detalhada das tensões e deformações que surgem em cada fase. Sua abordagem avançada serviu como base para o desenvolvimento de modelos computacionais mais precisos e influenciou normas técnicas para edificações de grande porte, estabelecendo práticas de projeto que são hoje indispensáveis para a segurança e durabilidade das estruturas.

Gorza (2000), em sua pesquisa, aborda uma análise incremental construtiva de edifícios metálicos de múltiplos andares utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). O autor investiga como a rigidez transversal à flexão das lajes e a consideração das fases de construção influenciam nos esforços e deslocamentos das estruturas de edifícios altos. O modelo proposto permite a interação tridimensional entre vigas, pilares e lajes, considerando trechos rígidos e excentricidades, com um enfoque na análise incremental, onde os carregamentos são aplicados conforme a construção avança.

Para esse estudo, as vigas e pilares foram representados por elementos de barra, enquanto as lajes foram modeladas por elementos de placa triangular (DKT), que formam uma representação quadrangular dos pavimentos. Técnicas de subestruturação em paralelo e em série foram empregadas para reduzir a quantidade de dados processados pelo MEF, possibilitando a simulação precisa de cada etapa construtiva. Um programa computacional foi desenvolvido para realizar tanto análises convencionais quanto incrementais, oferecendo resultados de deslocamentos e esforços para cada fase da construção.

Os resultados numéricos dos exemplos de aplicação indicaram que o modelo proposto proporciona maior precisão na distribuição de esforços ao longo das etapas de construção, em comparação aos modelos que ignoram esses incrementos. Os dados obtidos sugerem que a consideração das fases de construção evita subdimensionamentos, oferecendo uma solução mais segura para a modelagem estrutural de edifícios altos metálicos.

Em síntese, o estudo reforça a importância do cálculo incremental construtivo para projetos de engenharia, enfatizando a necessidade de programas que contemplem o comportamento real da estrutura ao longo de sua construção.

As diferenças entre o cálculo evolutivo e o cálculo clássico na análise de edifícios altos foram exploradas por Coelho (2003), focando na influência das etapas de construção e de carregamento nos esforços estruturais e deslocamentos. O autor destaca que métodos simplificados podem resultar em modelos estruturais inadequados, ao não considerar carregamentos adicionais ocorridos durante a construção. Para isso, o trabalho compara três pórticos planos – um de 16 andares e dois de 26 andares – por meio de modelos com e sem deformação axial (SDA e CDA) e um modelo evolutivo (EVOL), cada um com diferentes parâmetros estruturais, como a rigidez das vigas e a altura dos pórticos.

A dissertação aponta que o uso de cálculos evolutivos, que consideram a sequência de construção e os efeitos progressivos de carregamento, proporciona resultados mais precisos. Defende que, ao longo das etapas de construção, surgem carregamentos temporários que influenciam diretamente os esforços estruturais e deslocamentos nodais. O programa PORTEVOL, desenvolvido especificamente para esse fim, utiliza o método dos deslocamentos para realizar análises evolutivas, facilitando a avaliação detalhada dos efeitos estruturais a cada nova fase de construção.

Os resultados mostraram que a variação de parâmetros, como a rigidez axial dos pilares e a flexibilidade das vigas, impacta significativamente nos deslocamentos e esforços obtidos. Concluiu-se que o aumento da rigidez axial do pilar central contribui para a convergência dos resultados dos modelos SDA, CDA e EVOL, particularmente em edifícios mais altos, onde discrepâncias entre os modelos tornam-se mais evidentes. Assim, a uniformização das tensões médias nos pilares de cada andar se apresenta como um procedimento eficaz para a obtenção de resultados mais apropriados.

Por fim, a dissertação defende que o modelo evolutivo deve ser considerado um paradigma na análise de pórticos de edifícios altos. A maior precisão do cálculo evolutivo advém da consideração de todas as etapas de construção e carregamento, reduzindo as incertezas associadas ao cálculo clássico e tornando-o mais apropriado para projetos complexos.

Uma análise estrutural de edifícios altos em concreto armado, com foco na precisão dos modelos aplicados ao longo da construção, foi proposta por Silva (2006). Utilizando o método dos elementos finitos, a pesquisa compara quatro modelos estruturais tridimensionais: dois convencionais, que aplicam todas as cargas ao final da construção (com e sem deformação axial), e dois evolutivos, onde o carregamento é aplicado gradativamente à medida que a estrutura é construída. Esse último grupo de modelos busca representar de maneira mais realista as condições de construção e os efeitos progressivos das cargas.

Nos modelos convencionais, as cargas são aplicadas como se toda a estrutura já estivesse concluída, o que leva a simplificações que podem distanciar a análise do comportamento real do edifício. A metodologia evolutiva, por outro lado, considera o efeito acumulativo dos carregamentos, permitindo que cada componente estrutural suporte o peso de acordo com sua fase de construção. Essa abordagem evita suposições irreais, como o impacto do peso de andares superiores em partes da estrutura ainda não construídas.

O projeto revelou diferenças significativas nos resultados entre os modelos convencionais e os evolutivos, especialmente em relação aos momentos fletores, esforços nos pilares e recalques diferenciais. O modelo evolutivo mais detalhado, o EVOL+R, demonstrou maior precisão ao captar as variações de esforços ao longo das etapas de construção, fornecendo uma análise mais próxima do comportamento real da estrutura. Dessa forma, observou-se que modelos evolutivos são mais adequados para o cálculo estrutural de edifícios altos, uma vez que conseguem representar de forma mais fidedigna as forças atuantes durante o processo construtivo.

Em vista dos resultados obtidos, ressaltou-se a importância de se desenvolver e aplicar ferramentas computacionais que possibilitem o uso prático de modelos evolutivos em ambientes profissionais de engenharia. Embora exijam maior trabalho e processamento, os modelos evolutivos oferecem uma análise mais fiel e podem contribuir

para aumentar a segurança e eficácia do projeto estrutural de edifícios altos, tornando-se uma recomendação valiosa para a prática de cálculos em engenharia de estruturas.

Lima e Macedo (2014) estudaram os efeitos das etapas construtivas na análise estrutural de edifícios em concreto armado, com ênfase no impacto do efeito incremental. O estudo comparou três modelos de cálculo: o clássico, que considera todas as cargas atuando após a conclusão da estrutura, e dois modelos evolutivos, que incorporam o carregamento progressivo e o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo. Utilizando o programa SAP2000 e o método dos elementos finitos, foram avaliadas as diferenças entre os modelos em termos de solicitações, deslocamentos e redistribuição de esforços, aplicando-os a estruturas bidimensionais e tridimensionais.

Os resultados apontaram que o modelo clássico, embora comum, apresenta limitações significativas ao desconsiderar fatores importantes, como escoramento, reescoramento e deformações progressivas do concreto. Os modelos evolutivos demonstraram maior precisão, ao contemplar parâmetros como fluência e retração, além de refletirem melhor o comportamento incremental das cargas durante o processo construtivo. Ademais, as respostas computacionais indicaram que deslocamentos diferenciais entre pilares podem gerar esforços adicionais em vigas e lajes, comprometendo a integridade estrutural e o desempenho em estados limites de serviço.

Os autores concluíram que o uso de modelos mais realistas é essencial para a segurança e a eficiência em projetos de estruturas. A análise incremental, que simula as condições reais de construção, mostrou-se mais confiável do que o modelo clássico. Além disso, evidenciou-se que, em certos casos, modelos bidimensionais podem ser utilizados de forma eficiente, reduzindo o tempo de processamento sem comprometer a qualidade dos resultados. Este trabalho reafirma a importância de considerar as particularidades do processo construtivo no cálculo estrutural.

Mais recentemente, Dinar *et al.* (2014) analisaram o efeito incremental de construção em edifícios altos de concreto armado e aço, comparando a análise linear estática com a análise sequencial. Utilizando modelos de elementos finitos com o programa ETABS, a pesquisa demonstra que a análise sequencial, que considera efeitos não lineares como o P-Delta, fluência e retração dos materiais, fornece resultados mais coerentes sobre os deslocamentos, cargas axiais e momentos fletores. Esse método contrasta com a análise linear estática, que considera a aplicação das cargas apenas na

estrutura completa, levando a subestimações em edifícios altos, onde os efeitos dos carregamento incremental e das deformações ao longo do tempo são significativos.

Os resultados indicaram que a análise sequencial gerou maiores deslocamentos e esforços em comparação à análise estática, evidenciando o impacto cumulativo dos carregamentos aplicados andar por andar. O modelo sequencial permitiu observar variações importantes no comportamento estrutural, especialmente em edifícios altos, nos quais a sequência de construção aumenta os momentos fletores e os esforços constantes nos elementos de suporte, como vigas e colunas próximas a pontos críticos. Essa diferença foi observada com mais clareza nos elementos de aço, que mostram menor deslocamento quando comparados aos de concreto armado, sendo uma alternativa mais eficaz para edificações de longo prazo sujeitas a efeitos incrementais.

Também se destacou que, embora a carga axial nas colunas possa ser menor na análise sequencial devido à redistribuição dos esforços, os momentos fletores nas vigas aumentam significativamente, o que demanda atenção durante o dimensionamento para evitar falhas. Quer seja nas estruturas de aço ou concreto, os momentos fletores e deslocamentos apresentam tendência de redução com o aumento da altura da edificação, sendo o aço mais resistente a deformações em longo prazo.

Dessa forma, inferiu-se que a análise sequencial é essencial para a segurança e precisão no projeto de estruturas altas, especialmente devido aos efeitos de fluência, retração e outras não linearidades que se acumulam ao longo da construção. Reforçou-se a necessidade de considerar a análise sequencial em projetos de arranha-céus para uma modelagem mais realista das condições de construção, recomendando o uso de aço em construções sujeitas a longos períodos de carregamento e incrementos de carga.

Subsequentemente, Menon e Nogueira (2015) executaram a análise incremental em pórticos de edifícios altos de concreto armado, destacando a importância de considerar a sequência de construção e os efeitos dos carregamento ao longo do processo. Compararam duas metodologias principais: o cálculo incremental, que aplica cargas conforme a estrutura é erguida, e o cálculo convencional, que considera o carregamento total após a conclusão da construção. A análise incremental permite uma modelagem mais precisa das condições reais, sendo especialmente relevante para edifícios altos, onde os efeitos da deformação ao longo do tempo, como retração e fluência, impactam a segurança e a estabilidade estrutural.

Os autores utilizaram o programa SAP2000 para modelar um edifício de 13 pavimentos, aplicando cargas incrementais em pórticos espaciais para simular as condições reais de construção. O estudo abrange cargas devidas ao peso próprio, fôrmas, escoramentos e a ação do vento, em cada etapa de carregamento. Os resultados destacam que o cálculo incremental gerou maiores momentos fletores e esforços cortantes nas vigas e pilares quando comparados aos do modelo convencional, especialmente nos andares superiores, onde as diferenças entre os dois métodos se acentuam, chegando a variações de até 48% em alguns casos.

Em termos de cargas axiais nos pilares, o estudo mostrou que, enquanto os pilares externos apresentaram forças axiais maiores no modelo incremental, os pilares internos tiveram valores menores quando comparados aos do modelo convencional. Essa variação reflete a redistribuição de esforços durante o processo de construção, que pode não ser capturada adequadamente em uma análise convencional. A consideração das etapas de construção, incluindo o escoramento e retirada de cargas temporárias, revelou-se crucial para uma análise mais realista, reduzindo as margens de erro.

O artigo concluiu que o uso do cálculo incremental é essencial para garantir a precisão e a segurança dos projetos de edifícios altos. Os resultados reforçaram a necessidade de incluir metodologias incrementais no processo de dimensionamento de estruturas de concreto armado, uma vez que esses modelos se aproximam mais da realidade.

Esses estudos coletivos oferecem uma base sólida para compreender a análise incremental construtiva em edificações, abordando aspectos teóricos, práticos e metodológicos. Ao revisar essas obras, é possível obter percepções valiosas para aprimorar as práticas de análise estrutural em projetos de construção.

Fortes (2019), em sua Dissertação de Mestrado, aprofunda um tema central na engenharia de estruturas: as deformações verticais que ocorrem em pilares de concreto armado durante a fase de construção de edificações. Essas variações de comprimento, causadas pela progressão das cargas, fluência, retração e recalques das fundações, impactam diretamente no comportamento estrutural global, podendo gerar deslocamentos que afetam a segurança, a funcionalidade e a estética das edificações. Além disso, essas deformações, quando não controladas, causam danos a elementos não estruturais, como alvenarias e revestimentos, reforçando a importância de se estudar e mitigar esses efeitos.

O autor explicita que, na prática da engenharia, os modelos computacionais tradicionalmente utilizados, conhecidos como modelos de passo único, apresentam limitações significativas. Eles não consideram os ajustes realizados durante a execução da obra, aplicando todas as cargas na estrutura como se esta estivesse completamente finalizada. Embora prática, essa simplificação pode resultar em superestimativas de deslocamentos e esforços solicitantes. Para contornar tais limitações e proporcionar análises mais precisas, a dissertação propôs e valida novas estratégias que integram os ajustes de forma prática e eficiente.

O trabalho de Fortes parte de uma análise teórica detalhada dos principais fatores que promovem os encurtamentos dos pilares. A deformação elástica ocorre imediatamente após a aplicação de cargas, sendo proporcional à rigidez axial dos pilares e à intensidade do carregamento. Já o efeito da fluência resulta de deformações dependentes do tempo, associadas à manutenção prolongada das cargas, e é influenciado por fatores como composição do concreto, idade dos materiais e condições ambientais. A retração, por sua vez, é causada pela perda de umidade no concreto ao longo do tempo, provocando contração volumétrica. Esta pode variar significativamente entre regiões, quer seja por umidade, ambiental ou por tipo de concreto empregado. Além disso, o recalque diferencial das fundações contribui para deslocamentos não uniformes nos pilares, impactando o comportamento estrutural da edificação como um todo.

Um aspecto fundamental, discutido na pesquisa, é a variabilidade desses encurtamentos entre os diferentes pilares de uma edificação. Pilares com maiores tensões axiais sofrem deformações axiais mais pronunciadas, o que pode gerar deslocamentos diferenciais significativos. Estes últimos podem se acumular ao longo do tempo, causando distorções em elementos estruturais, como vigas, e em não estruturais, como alvenarias.

Conforme o autor, no contexto da construção civil brasileira, destacam-se dois métodos principais de correção de desnivelamento de pisos: a concretagem em nível absoluto e a concretagem com piso-a-piso fixo. Na primeira, os deslocamentos acumulados até a execução do novo pavimento são corrigidos integralmente, garantindo que o nível de projeto seja respeitado. Já na concretagem com piso-a-piso fixo, apenas os deslocamentos diferenciais entre os pilares são corrigidos, o que resulta em deslocamentos acumulativos à medida que a construção avança. Essas diferenças

metodológicas têm implicações importantes nos deslocamentos finais dos pilares e nos esforços solicitantes que atuam nos elementos estruturais conectados, como vigas e lajes.

Além disso, o trabalho do autor discute práticas específicas relacionadas à execução de fôrmas e nivelamento, identificando erros comuns que podem exacerbar os problemas de deslocamentos, como o desalinhamento de fôrmas ou medições imprecisas. A precisão no nivelamento e na fixação das fôrmas é fundamental para minimizar os efeitos adversos dos encurtamentos durante a construção.

No campo da modelagem computacional, são propostos, por Fortes, avanços significativos para abordar as limitações dos modelos tradicionais. Os modelos de passo único, que aplicam todas as cargas de uma vez na estrutura já finalizada, não refletem as revisões dos níveis realizadas ao longo da construção, resultando em superestimativas dos deslocamentos e esforços.

Para equilibrar precisão e praticidade, o autor propõe duas soluções alternativas: o uso de um multiplicador axial de rigidez e a aplicação de carregamentos fictícios de temperatura. Ele ajusta a rigidez axial dos pilares, com o intuito de simular as reparações realizadas em campo, de forma simplificada. Essa técnica, inovadora no contexto das análises estruturais, em comparação com o método do passo único, mostrou-se eficaz e prática para integrar os efeitos do processo construtivo nos modelos computacionais.

A eficácia dessas propostas foi validada por meio de exemplos numéricos e comparações com resultados obtidos de programas amplamente utilizados, como o TQS e o ETABS. Os resultados demonstraram que tanto o uso do multiplicador axial quanto os carregamentos fictícios de temperatura proporcionam estimativas mais realistas dos deslocamentos e esforços em relação aos modelos tradicionais de passo único. Embora os modelos de múltiplos passos continuem sendo a referência, em termos de precisão, a técnica desenvolvida oferece uma alternativa eficiente para análises de projetos de edificações de múltiplos pavimentos.

Outro aspecto destacado na dissertação é o impacto dos deslocamentos diferenciais em elementos não estruturais, como alvenarias e revestimentos. Fissuras em paredes e descolamento de revestimentos são problemas comuns que comprometem a estética, a funcionalidade e a durabilidade das edificações. O autor analisa casos específicos de danos em edificações brasileiras e propõe estratégias para mitigação, como o uso de

materiais mais flexíveis, técnicas de isolamento entre elementos estruturais e não estruturais e ajustes nos processos construtivos para reduzir deslocamentos diferenciais.

A pesquisa conclui que a integração das correções construtivas nos modelos computacionais é essencial para garantir a segurança das estruturas, especialmente em edificações de grande altura. As abordagens propostas, particularmente o uso de carregamentos fictícios de temperatura, oferecem soluções práticas e inovadoras para problemas comuns na análise estrutural, equilibrando precisão e viabilidade de aplicação.

Entre as recomendações apresentadas, Fortes destaca a necessidade de normas técnicas específicas para orientar a consideração do processo construtivo na modelagem estrutural, bem como a realização de estudos experimentais para validar as metodologias propostas em condições reais. Além disso, o trabalho aponta para a importância de investigações futuras sobre o impacto dos deslocamentos diferenciais em elementos não estruturais e o desenvolvimento de técnicas avançadas de mitigação.

### **2.1. Fator de aumento da seção dos pilares (MULAXI)**

A busca pela otimização da segurança e economia no dimensionamento estrutural tem sido objeto de estudo ao longo de muitos anos. Segundo Fortes (2019), no início dos anos 2000, o engenheiro Nelson Covas introduziu o conceito de coeficiente multiplicador da área da seção transversal de pilares, conhecido como MULAXI, por meio da plataforma TQS Informática Ltda.

Conforme Fortes (2019), o valor de 3,0 atribuído ao coeficiente MULAXI foi estabelecido a partir de análises conduzidas por Nelson Covas em 1990, utilizando o programa SAP2000. Esse valor resultou de uma calibragem realizada com um conjunto limitado de edificações. Nesse estudo, a variação da área axial dos pilares foi investigada para alcançar deslocamentos similares entre os pilares, resultando em momentos fletores mais realistas (valores negativos nos apoios centrais das vigas.).

Ainda segundo Fortes (2019), no início dos anos 2000, o engenheiro Mário Franco contribuiu com uma análise adicional para um projeto envolvendo múltiplos pavimentos, obtendo um resultado próximo ao valor de 3,0 ao simular o processo construtivo.

De acordo com o TQS Informática, o MULAXI, indicado na Figura 2-1, influencia somente o processamento de cargas verticais e não é considerado, por exemplo, em análises de ação do vento.

A imagem mostra a interface de configuração do TQS para a rigidez axial de pilares. O título da aba é "Rigidez axial de pilares". Há duas opções de configuração: "Majora rigidez axial" (com ícone de chave) e "Fator de aumento da rigidez axial dos pilares [MULAXI]" (com ícone de chave). À direita, há duas opções de seleção: "Não, área real das barras" (com botão de rádio desativado) e "Sim, área multiplicada por MULAXI" (com botão de rádio ativado). Abaixo, há um campo de entrada numérica para o fator de aumento da rigidez axial dos pilares [MULAXI], com o valor "3" digitado.

Figura 2-1 – Aplicação padrão do MULAXI. Fonte: TQS

Além do MULAXI, o TQS também aumenta a rigidez das vigas de transição, utilizando o parâmetro MULETR (ver Figura 2-2) que é um recurso que permite considerar modelos distintos para as vigas de transição e para as vigas que suportam tirantes, gerando uma envoltória dos resultados. Ele simula dois cenários: um com as vigas de transição enrijecidas e outro com a inércia real das vigas, proporcionando uma análise mais correta dos deslocamentos e esforços. Essa abordagem é importante porque garante uma avaliação abrangente do comportamento estrutural, especialmente em situações em que as vigas de transição desempenham um papel crítico na redistribuição de cargas e na estabilidade global da estrutura. Ao duplicar os carregamentos verticais e calcular a envoltória de esforços, o MULETR permite identificar cenários mais desfavoráveis. Importante destacar a nota exibida na janela “modelo das vigas de transição / tirantes”, que sugere manter a utilização deste parâmetro para aumentar a rigidez dos pilares mesmo na ausência deste elemento estrutural.

Modelo das vigas de transição / tirantes

Controle do modelo

Considerar 2 modelos diferentes para vigas de transição e vigas que suportam tirantes; gerar envoltória do resultado. No primeiro modelo as vigas de transição são enrijecidas, e no segundo sua inércia é real. ☐

Multiplicador da inércia à flexão

Divisor da inércia à torção

Vigas de transição terão tratamento especial quando esta opção estiver marcada, no pórtico com cargas horizontais e verticais. Todos os carregamentos verticais serão duplicados, uma vez com as vigas enrijecidas por um fator, e outra com inércia normal, com a envoltória de esforços calculada no final. O multiplicador de inércia das vigas de transição é definido aqui.

NOTA: Mesmo que não haja transições no seu projeto, use este modelo para obter uma envoltória com os pilares enrijecidos axialmente.

OK Cancelar

Figura 2-2 – Viga de transição / tirantes. Fonte: TQS

Ao adotar esse aumento de rigidez conforme o padrão do programa, a rigidez dos pilares deixa de ser determinada apenas pelo MULAXI, passando a considerar o maior valor entre MULAXI e MULETR, conforme a rotina apresentada na Figura 2-3. Assim, caso o MULETR seja superior ao MULAXI, o aumento de rigidez do pilar será ajustado.

| Modelos de pórtico espacial gerados automaticamente | Fator de aumento da seção dos pilares: MULAXI            |                   |                                                          |                                 |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|
|                                                     | NÃO                                                      |                   | SIM                                                      |                                 |
|                                                     | Multiplicador da inércia das vigas de transição (MULETR) |                   | Multiplicador da inércia das vigas de transição (MULETR) |                                 |
|                                                     | NÃO                                                      | SIM               | NÃO                                                      | SIM                             |
| 1º Pórtico: Cargas verticais                        | APi = AR                                                 | APi = AR          | APi = AR × MULAXI                                        | APi = AR × Max (MULAXI, MULETR) |
|                                                     | IVT = IR                                                 | IVT = IR × MULETR | IVT = IR                                                 | IVT = IR × MULETR               |
| 2º Pórtico: Cargas verticais (VTN)                  | Não Necessário                                           | APi = AR          | Não Necessário                                           | APi = AR × MULAXI               |
|                                                     |                                                          | IVT = IR          |                                                          | IVT = IR                        |
| 3º Pórtico: Cargas de Vento                         | APi = Área Real                                          |                   |                                                          |                                 |
|                                                     | IVT = Inércia Real                                       |                   |                                                          |                                 |

Figura 2-3 – Critérios para definição do aumento da seção dos pilares. Fonte: TQS adaptado.

onde:

$A_{Pi}$  é a área da seção transversal do pilar considerada no pórtico

$I_{VT}$  é o momento de inércia da viga de transição considerado no pórtico

$V_{TN}$  é a viga de transição com inércia normal (não majorado)

$I_R$  é a inércia real

$A_R$  é a área real

Quando há o aumento da rigidez dos pilares, as rotações nas extremidades das vigas são restringidas, resultando em maiores momentos fletores negativos nos apoios. Por se tratar da mesma estrutura e dos mesmos carregamentos aplicados, ao se observar o aumento do momento fletor negativo nos apoios, o momento fletor positivo tende a diminuir na região central dos vãos devido à redistribuição dos esforços.

A redistribuição de momentos fletores é uma técnica utilizada no dimensionamento de estruturas hiperestáticas, permitindo que parte do momento negativo nos apoios seja transferida ao longo do vão da viga. Essa técnica aproveita o comportamento plástico do concreto armado, permitindo uma maior eficiência no uso dos materiais e reduzindo as exigências de reforço em regiões específicas.

Na Figura 2-4 está ilustrada a diferença entre a utilização do MULAXI ao dimensionar a estrutura de múltiplos pavimentos e considerando sua inércia real.

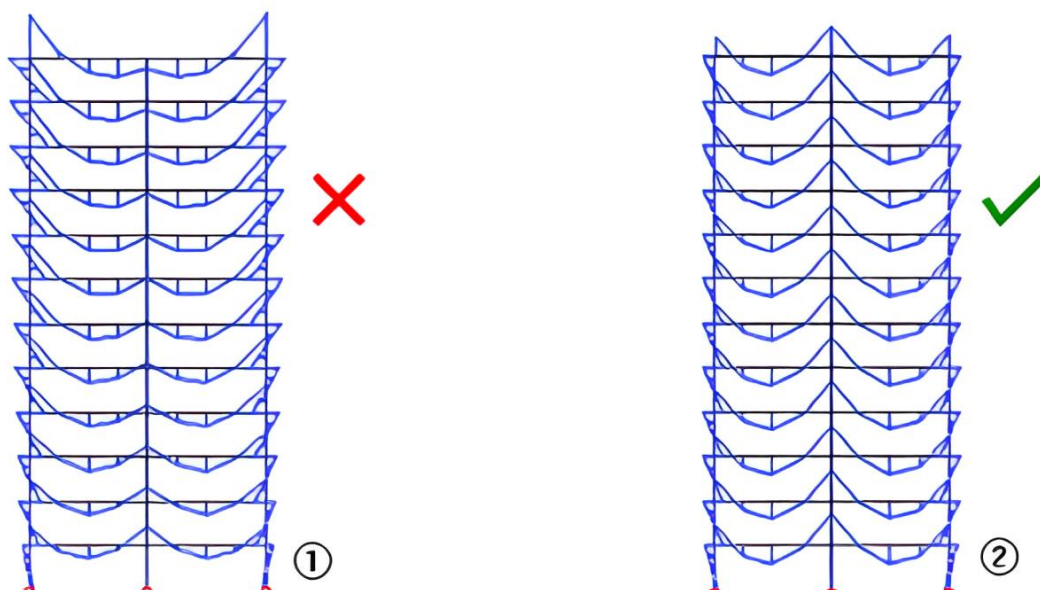


Figura 2-4 – Diagramas de momentos fletores de pórtico sem e com o coeficiente MULAXI, respectivamente. Fonte: TQS informática

## 2.2. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem numérica utilizada para analisar problemas complexos de engenharia e física. Ele divide uma estrutura ou domínio contínuo em um número finito de elementos menores, nos quais as equações diferenciais que descrevem o comportamento da estrutura são aproximadas. Esses elementos são interconectados em pontos chamados nós.

O processo começa com a discretização do domínio em elementos, geralmente de formas simples, como triângulos ou quadrados em 2D e tetraedros ou hexaedros em 3D. Cada elemento possui propriedades materiais e geométricas, como coeficientes de elasticidade, densidade e geometria específica. A partir dessas informações, equações de campo, como as equações de equilíbrio e comportamento constitutivo, são aplicadas localmente em cada elemento.

O próximo passo envolve a montagem das equações locais dos elementos em um sistema global de equações, que é então resolvido para determinar os deslocamentos, tensões, deformações e outras quantidades de interesse em todos os pontos nodais da estrutura. Essa solução é obtida por meio de técnicas matriciais, como o método de Gauss-Seidel ou a eliminação de Gauss.

O MEF permite analisar sistemas complexos e não-lineares, como estruturas sujeitas a cargas variáveis ou materiais com comportamento não-linear. Ele é amplamente utilizado em engenharia civil, mecânica, aeroespacial e outras disciplinas para simulações de tensões, deformações, transferência de calor, fluidos e muitos outros fenômenos físicos.

Apesar de ser uma abordagem poderosa, o MEF tem limitações e requer considerações cuidadosas na escolha do tipo de elemento, tamanho da malha, condições de contorno e outras variáveis para obter resultados precisos e confiáveis.

Os graus de liberdade e a análise em concreto armado estão intrinsecamente ligados no contexto do MEF. Neste, os graus de liberdade representam as variáveis desconhecidas em cada nó de uma estrutura discretizada, sendo estas geralmente os deslocamentos e as rotações. Esses graus de liberdade são utilizados para formar o sistema de equações globais que descrevem o comportamento da estrutura como um todo, como exemplificado na Figura 2-5.

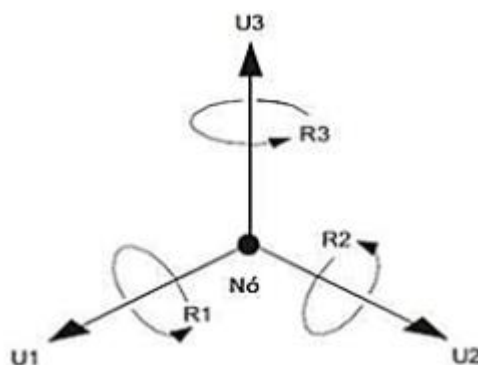


Figura 2-5 – Graus de liberdade. Fonte: SAP2000 CSi Reference Manual

No caso específico da análise em concreto armado, o MEF é uma ferramenta valiosa para simular o comportamento complexo desse material. O concreto armado é uma combinação de concreto simples e barras de aço, o que resulta em um comportamento mecânico não-linear e heterogêneo.

Ao se aplicar o MEF em estruturas de concreto armado, os elementos finitos são configurados para representar ambos os materiais. As propriedades tais como a elasticidade do concreto e do aço, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a resistência à tração, são incorporadas nos elementos para refletir adequadamente o comportamento real do material.

Além disso, o MEF permite considerar os aspectos estruturais específicos do concreto armado, como a interação entre o concreto e o aço, a fissuração do concreto devido à deformação e as não-linearidades decorrentes do comportamento do aço quando ele atinge seu limite de escoamento e plasticidade.

A análise em concreto armado usando o MEF possibilita prever com maior precisão as distribuições de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas complexas. Isso é particularmente útil para otimizar o dimensionamento de elementos estruturais, garantindo que a estrutura seja capaz de suportar as cargas aplicadas com segurança e eficiência. No entanto, é importante ressaltar que a correta aferição dos parâmetros dos materiais, geometria da estrutura e condições de contorno é fundamental para se obter resultados confiáveis.

O programa de análise estrutural, SAP2000, conhecido no meio técnico pela aplicação do método dos elementos finitos, é amplamente empregado na engenharia civil. Ele permite simular a evolução de uma estrutura durante a fase construtiva, considerando os diferentes estágios e carregamentos progressivos que ocorrem durante esse processo. Geralmente é aplicado para obras como edifícios e pontes em concreto armado, nas quais a construção se desenrola em múltiplas etapas.

Com essa ferramenta, é possível modelar cada etapa da construção. Isso inclui a introdução de carregamentos temporários, como a aplicação gradual de cargas de concreto fresco, cargas de escoramento e outros tipos de forças transitórias que emergem durante a construção. Tais carregamentos são aplicados de forma sequencial, de acordo com a ordem da construção, permitindo uma análise mais precisa do comportamento da estrutura em diferentes fases.

Soma-se a isso, a possibilidade da modelagem da montagem e desmontagem de escoramentos, formas de concreto e sistemas de apoio temporários, entre outros elementos associados ao processo construtivo. Isso capacita os engenheiros a avaliar como a estrutura responde a mudanças nos carregamentos e suportes ao longo do tempo.

Ao aplicar essa abordagem, os engenheiros podem identificar potenciais problemas, como deformações excessivas, tensões críticas e instabilidades que podem ocorrer durante a construção. Dessa forma, podem ser tomadas medidas preventivas e otimizar o

processo construtivo para assegurar a segurança e eficiência da estrutura em desenvolvimento.

### **2.3. Modelagem incremental**

Ao longo do tempo, a busca por métodos que tornem o dimensionamento estrutural de edifícios mais econômico e seguro tem sido uma preocupação constante. Nesse contexto, uma abordagem inovadora ganhou destaque: o modelo de cálculo incremental.

Muitos dos programas de cálculo atualmente em uso presumem que as estruturas são submetidas a cargas apenas após sua conclusão, negligenciando a realidade de que as cargas são gradualmente introduzidas durante a construção. Em contrapartida, o método incremental se propõe a simular, de maneira aproximada, o comportamento real da estrutura durante sua construção e carregamento.

Grundy e Kabaila (1963) deram início ao estudo sobre os efeitos da consideração das etapas construtivas e do escoramento no cálculo de estruturas. Eles examinaram a evolução das ações nas lajes dos pavimentos e no escoramento correspondentes, levando em consideração a sobreposição gradual de pavimentos, seguindo a sequência natural de construção. Foram discutidos os efeitos de se escorar diferentes quantidades de pavimentos e apresentado um método simplificado para estimar as cargas resultantes do escoramento na estrutura. Os autores defendem que os carregamentos durante a construção podem superar os carregamentos usuais de serviço em uma margem considerável, tornando imprescindível sua consideração.

É crucial destacar que a análise construtiva deve ser conduzida com base no projeto e no cronograma de construção, uma vez que cada etapa deve ser avaliada conforme sua execução. Isso permite considerar as ações apropriadas em cada estágio. Enquanto as cargas viáveis de ocupação têm impacto somente após a conclusão da estrutura, as demais ações, como peso próprio, revestimento, alvenarias, montagem e armazenamento de materiais, têm um papel significativo em relação ao carregamento global e podem alterar os esforços estruturais se não forem adequadamente consideradas.

A diferença entre os modelos convencional e incremental é exemplificada de maneira clara nas Figura 2-6 e 2-7. Enquanto o método convencional trata os carregamentos como se a estrutura já estivesse completa, o método incremental aplica os carregamentos à medida que a estrutura é construída.

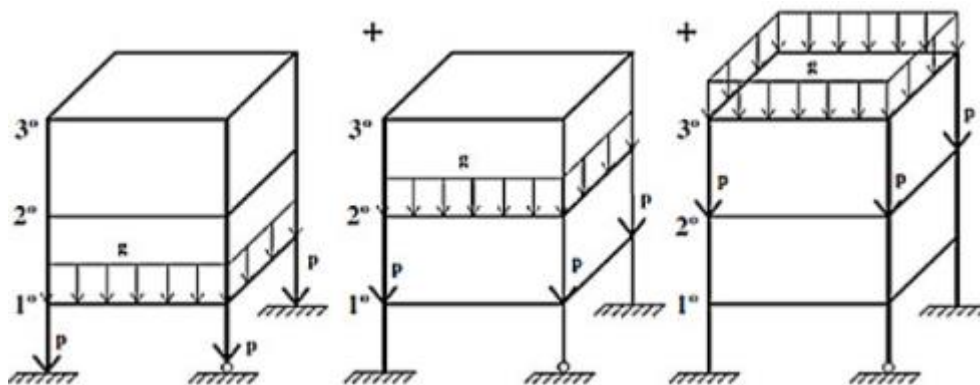


Figura 2-6 – Etapas no modelo convencional. Fonte: GORZA, 2000

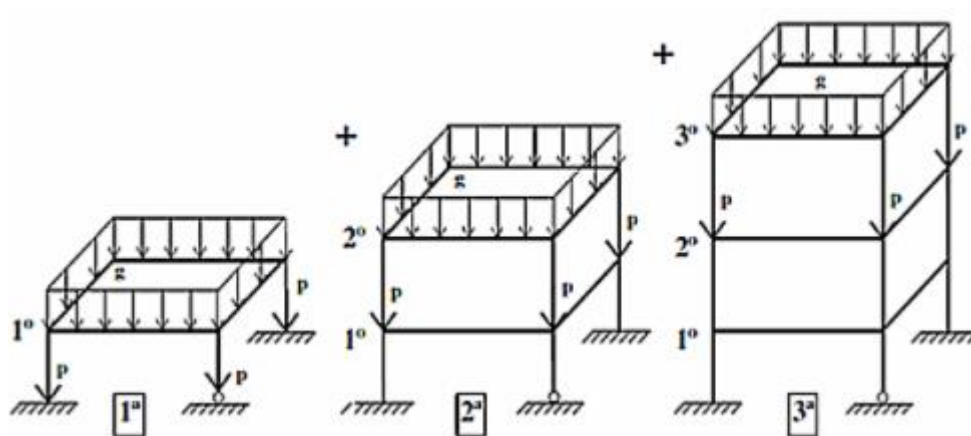


Figura 2-7 – Etapas no modelo evolutivo. Fonte: GORZA, 2000

Ressalta-se que, independentemente do modelo usado para analisar edifícios de vários andares, não é coerente considerar esforços em um elemento que ainda não existe. Em outras palavras, o peso próprio do primeiro pavimento não pode afetar os esforços no segundo pavimento, que ainda não foi construído. Isso é válido apenas para os esforços decorrentes da parte de deformação lenta desse carregamento. É evidente que um elemento só pode ser solicitado por carregamentos após sua própria construção.

Quanto à forma como os deslocamentos são obtidos, tem-se que na abordagem incremental, os deslocamentos ocorrem em cada andar após sua construção, enquanto no método convencional, os deslocamentos são acumulados em relação a um referencial global fixo. Este último calcula os deslocamentos desde a posição inicial até a posição final, quando a estrutura está totalmente construída. Consequentemente, deslocamentos irrelevantes são incorretamente computados em alguns andares.

Apesar de muitos programas de cálculo atuais não adotarem diretamente o método incremental, diversos utilizam técnicas numéricas para ajustar os diagramas de solicitações internos, tornando-os mais consistentes com a realidade, entre eles, o TQS. O modelo de cálculo incremental, por sua vez, tem se difundido, sendo reconhecido por melhor descrever o comportamento estrutural. Nesse modelo, a análise teórica simula a construção real, calculando as lajes andar a andar, com as cargas aplicadas à medida que ocorrem.

Em edifícios altos, o deslocamento vertical diferencial (Figura 2-8) entre pilares adjacentes assume maior relevância, gerando redistribuição de esforços normais nos pilares e esforços significativos nas vigas que os conectam. Previsões equivocadas dos deslocamentos diferenciais podem comprometer a estrutura, ocasionando fissuração, deflexões excessivas, danos a acabamentos e instalações não estruturais, além de momentos fletores e esforços cortantes adicionais não previstos no projeto.

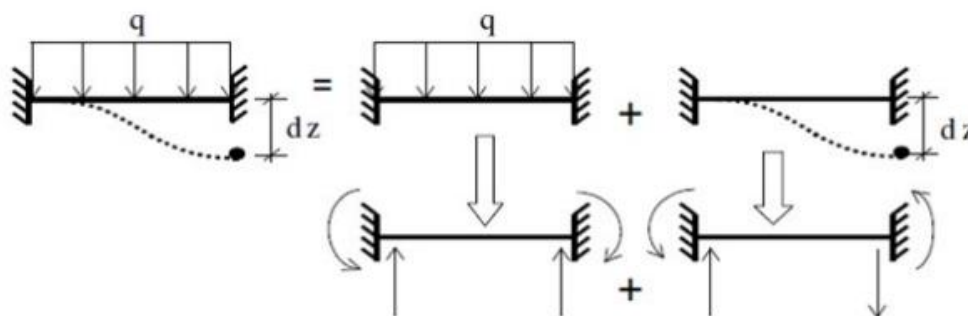


Figura 2-8 – Viga sob efeito de deslocamento diferencial. Fonte: GORZA, 2000

Ao se considerar a importância dos deslocamentos diferenciais no cálculo dos esforços finais em edifícios, fica clara a necessidade de determiná-los com precisão. Portanto, a correta avaliação desses deslocamentos torna-se essencial para a integridade estrutural e a segurança das edificações.

A análise incremental é uma ferramenta do programa TQS que permite simular o comportamento de uma estrutura de maneira progressiva, considerando as etapas construtivas e os carregamentos que são aplicados sequencialmente ao longo do tempo. Essa abordagem é particularmente relevante para avaliar o comportamento das estruturas durante a fase de construção, na qual as cargas e as condições de apoio podem variar conforme o progresso da obra.

O TQS permite modelar a evolução da estrutura em cada etapa do processo construtivo, incorporando a aplicação gradual de cargas, escoramentos, concretagem, entre outros. Isso é fundamental para capturar de maneira precisa os efeitos das deformações, tensões e redistribuição de esforços que ocorrem à medida que a construção avança.

Como pode ser observado na Figura 2-9, o efeito incremental adiciona parcelas de cargas durante a construção e considera as deformações de cada pavimento durante as etapas construtivas.

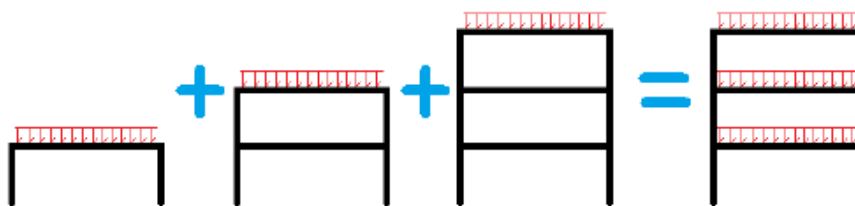


Figura 2-9 – Efeito incremental. Fonte: TQS informática

Ao realizar este tipo de análise, é possível identificar potenciais problemas estruturais, como deformações excessivas, deslocamentos críticos e concentrações de tensões em pontos específicos da estrutura, permitindo-se tomar decisões de projeto, realizar ajustes construtivos e garantir a integridade e segurança da estrutura ao longo de todas as fases da construção.

Além disso, a análise incremental também é útil para otimizar o dimensionamento dos elementos estruturais, levando em consideração as variações nos carregamentos e nas condições de apoio durante a construção. Isso contribui para projetos mais eficientes e econômicos.

Em resumo, a análise incremental é uma ferramenta essencial para simular o comportamento de estruturas durante o processo construtivo, permitindo uma avaliação detalhada das respostas estruturais às etapas de carregamento sucessivas e auxiliando no projeto e na tomada de decisões que garantem a segurança e o desempenho da estrutura ao longo de sua vida útil.

## 2.4. Deslocamento com única e múltiplas etapas

Como a análise convencional considera a geração de todos os pavimentos de uma só vez, o deslocamento é calculado de forma simplificada, aplicando somatórios das cargas e das deformações de cada pavimento. Esse procedimento utiliza a equação que calcula a deformação axial (alongamento ou encurtamento) de um elemento estrutural submetido a uma carga axial, conforme apresentado na Fórmula 2.1:

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.1)$$

onde:

$\delta$  é a deformação axial

P é a força axial aplicada

L é o comprimento original do elemento

E é o módulo de elasticidade longitudinal

A é a área da seção transversal

Dessa forma, como pode ser observado na Figura 2-10, tomando como base uma construção de 10 pavimentos, quando os deslocamentos são calculados com o edifício sendo construído em um único passo, o deslocamento ( $\delta$ ) no sexto pavimento é obtido conforme a Fórmula 2.2:

$$\delta = \frac{10P \cdot L}{E \cdot A} + \frac{9P \cdot L}{E \cdot A} + \frac{8P \cdot L}{E \cdot A} + \frac{7P \cdot L}{E \cdot A} + \frac{6P \cdot L}{E \cdot A} + \frac{5P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{45 \cdot P \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.2)$$

Essa fórmula representa o somatório das deformações axiais em cada pavimento sob a ação das cargas, refletindo uma abordagem simplificada que considera a construção de todos os pavimentos de uma só vez.

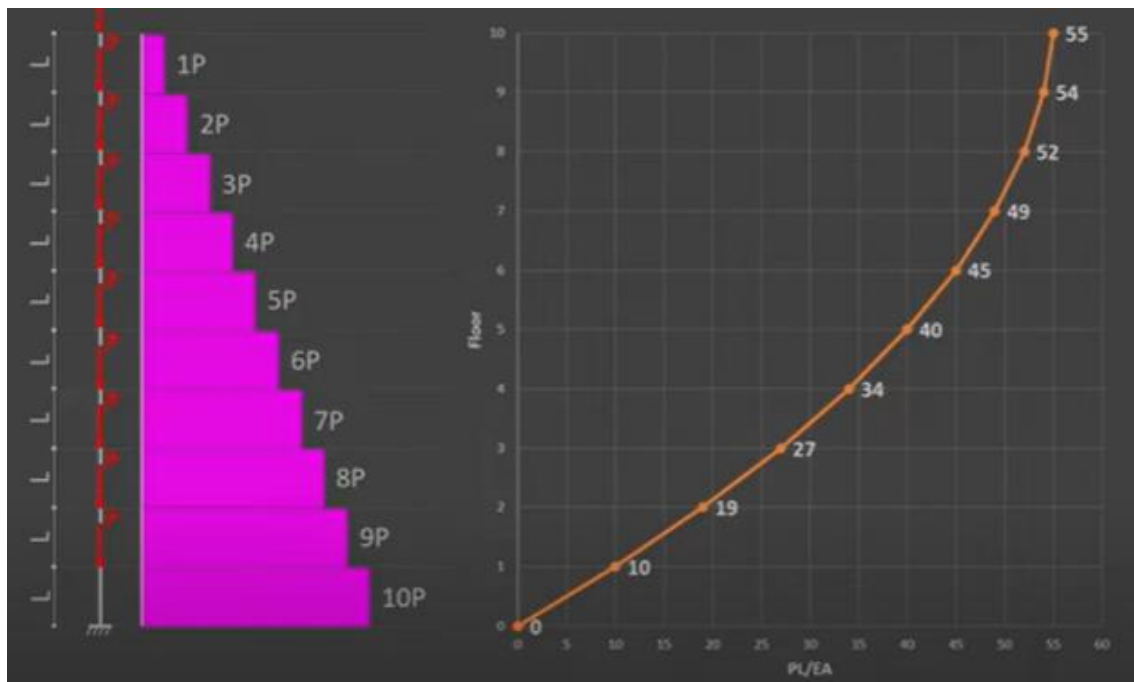


Figura 2-10 – Análise passo único. Fonte: TQS

Diferentemente da análise convencional apresentada anteriormente, a análise incremental, como pode ser observado na Figura 2-11, indica o deslocamento ( $\delta$ ) no mesmo sexto pavimento tal como mostra a Fórmula 2.3:

$$\delta = \frac{5P \cdot 6L}{E \cdot A} = \frac{30 \cdot P \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.3)$$

Essa fórmula representa a deformação axial do pavimento sob a ação da carga atuante sobre ele, demonstrando que a deformação do piso em análise é independente do carregamento dos pavimentos inferiores.

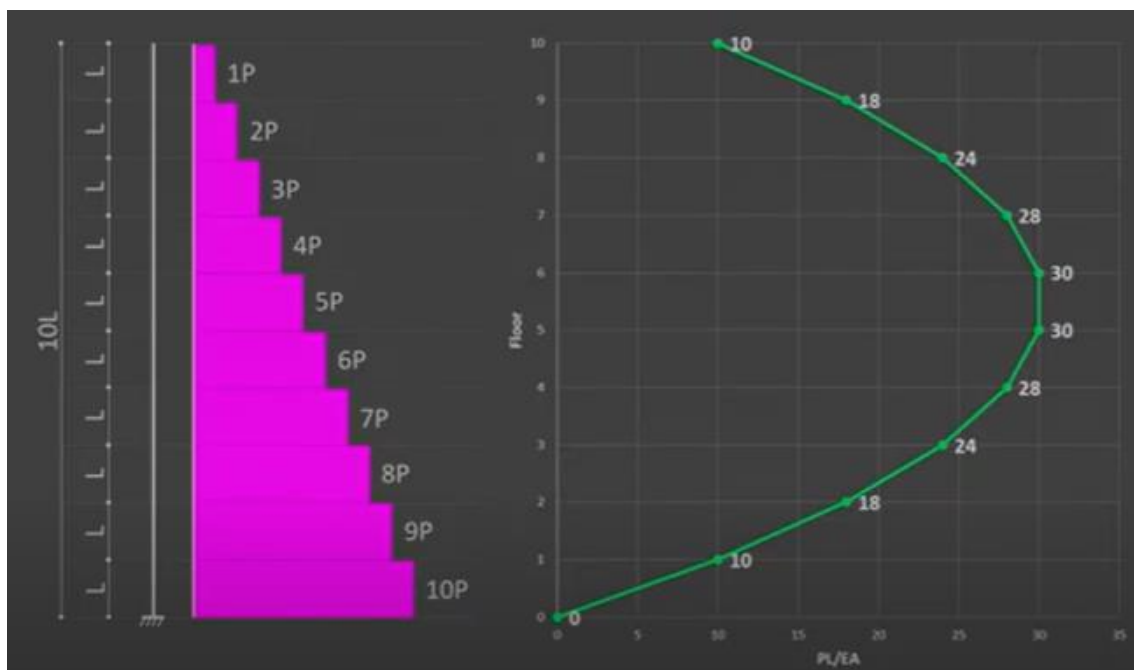


Figura 2-11 – Análise incremental. Fonte: Modificado de TQS

### 3. ESTUDO DE CASOS

---

Para alcançar os objetivos deste estudo, são realizados os seguintes passos:

- 1- Seleção das Edificações de Referência: são escolhidas duas edificações de alturas diferentes, a edificação com 15 andares (EDIF15) e a edificação com 40 andares (EDIF40), a fim de examinar a influência das fases construtivas em diferentes contextos verticais.
- 2- A análise estrutural neste trabalho baseia-se nos modelos desenvolvidos por Lima e Macedo (2014) no programa SAP2000, complementados pela implementação realizada pelo autor no programa ROBOT. São comparados os resultados obtidos a partir de três abordagens distintas de simulação do processo construtivo, descritas a seguir:
  - a. Modelo Clássico: Representa uma construção instantânea, onde toda a estrutura é considerada concluída em um único estágio. Nesse modelo, não se considera o aumento de rigidez dos pilares durante o processo construtivo, simplificando significativamente o comportamento estrutural.
  - b. Modelo Evolutivo: Simula o processo de construção em etapas, permitindo que as cargas sejam aplicadas progressivamente à medida que os elementos estruturais são finalizados. Contudo, essa abordagem não leva em conta os efeitos do escoramento e do reescoramento, o que ainda limita sua precisão em relação às condições reais de construção.
  - c. Modelo EVOL+R: Também representa a construção em etapas, mas inclui as contribuições do escoramento e do reescoramento durante o processo. Essa abordagem busca simular de forma mais detalhada as condições reais do processo construtivo, considerando o suporte temporário oferecido pelo escoramento e seu impacto no comportamento da estrutura.
- 3- Análise do modelo padrão:
  - a. Coeficiente MULAXI foi definido como 3,0, enquanto o aumento de inércia padrão no modelo das vigas de transição ou tirantes (MULETR) foi ajustado para 10,0. Esses valores foram utilizados com o objetivo de reduzir os deslocamentos e simular as fases construtivas, mesmo sendo

com modelo em passo único, buscando neutralizar o efeito do encurtamento dos pilares durante o processo de construção.

- b. Modelo incremental: Foi empregado o método incremental disponível na versão 23.9 do programa TQS para analisar as mesmas edificações. Esse método simulará a construção passo a passo, aplicando os carregamentos gradualmente conforme as fases construtivas.

- 4- Comparação dos Resultados: Os resultados obtidos das análises do SAP2000 e ROBOT serão comparados com os resultados do TQS.

A estrutura analisada foi projetada com base no projeto de formas ilustrado na Figura 3-1, utilizado no estudo de Lima e Macedo (2014). A essa abordagem foram incorporadas análises adicionais, realizadas com os modelos de análise padrão e incremental por meio do programa TQS. Esse procedimento foi conduzido com o objetivo de enriquecer a compreensão das implicações estruturais e facilitar a validação das análises propostas.

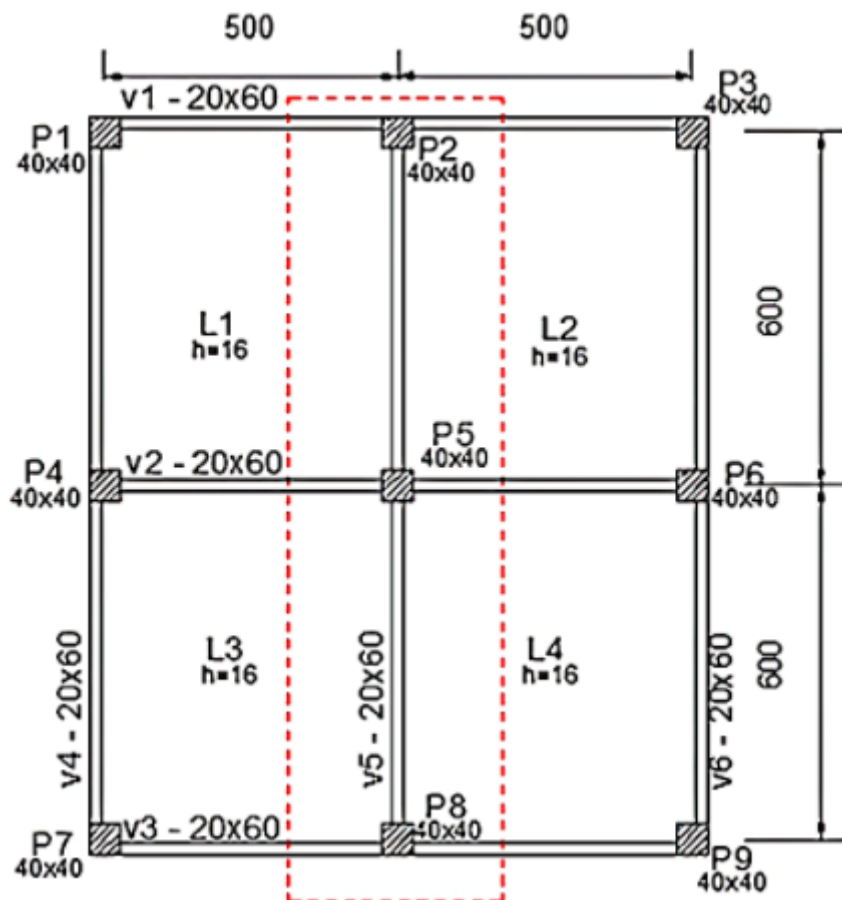


Figura 3-1 – Fôrma do pavimento-tipo (medidas em cm). Fonte: Lima e Macedo (2014)

A metodologia adotada nesta pesquisa foi fundamentada no estudo de Lima e Macedo (2014), utilizando os mesmos parâmetros de projeto para assegurar a consistência na análise comparativa. O concreto empregado em todos os elementos estruturais (vigas, pilares e fundações) é da classe C25 e foi aplicada uma sobrecarga de construção de 1,5 kN/m<sup>2</sup>.

A Figura 3-2 apresentada é um fluxograma detalhado do processo de análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas de edifícios, utilizando o programa TQS. O fluxograma ilustra, de forma clara e sequencial, as etapas que devem ser seguidas desde a criação do modelo estrutural até a emissão dos desenhos finais, com foco na precisão e na segurança estrutural.

A primeira fase envolve ações e a criação de um novo modelo, onde são configuradas as características geométricas e os materiais utilizados. A etapa de modelagem estrutural permite a importação da arquitetura e o lançamento dos elementos como pilares, vigas e lajes, garantindo uma análise visual tridimensional da estrutura antes de se prosseguir com os cálculos. Após a modelagem, a fase de critérios de projeto permite que o usuário ajuste os parâmetros de cálculo e assegura que as normas pertinentes, como a ABNT NBR 6118:2023, sejam atendidas.

O processamento global envolve a execução da análise estrutural, gerando um resumo estrutural para verificar se houve erros graves que exijam correção. Caso existam avisos ou erros, o fluxograma indica que ajustes devem ser feitos na estrutura antes de prosseguir. A fase de análise estrutural inclui verificações de estabilidade global e a aplicação de modelos como o pórtico espacial e a análise de grelha, que permitem avaliar deslocamentos, esforços e vibrações.

Se a estrutura passar nos critérios de análise, o fluxograma segue para o dimensionamento, detalhamento e desenho de armaduras, etapa em que pilares, vigas, lajes e fundações são detalhados conforme os resultados das análises de ELU (Estado Limite Último) e ELS (Estado Limite de Serviço). Caso algum elemento não seja dimensionável, novas iterações e ajustes são necessários.

Finalmente, após a fase de detalhamento, o processo segue para a montagem de plantas e plotagem e emissão dos documentos técnicos, permitindo a geração de arquivos para uso em BIM e a exportação para programas como Revit. A última etapa é o *backup* do projeto, garantindo a preservação dos dados e a rastreabilidade dos documentos. O fluxograma é um guia abrangente que exemplifica o fluxo de trabalho no TQS, garantindo conformidade normativa, eficiência de projeto e qualidade nos resultados.

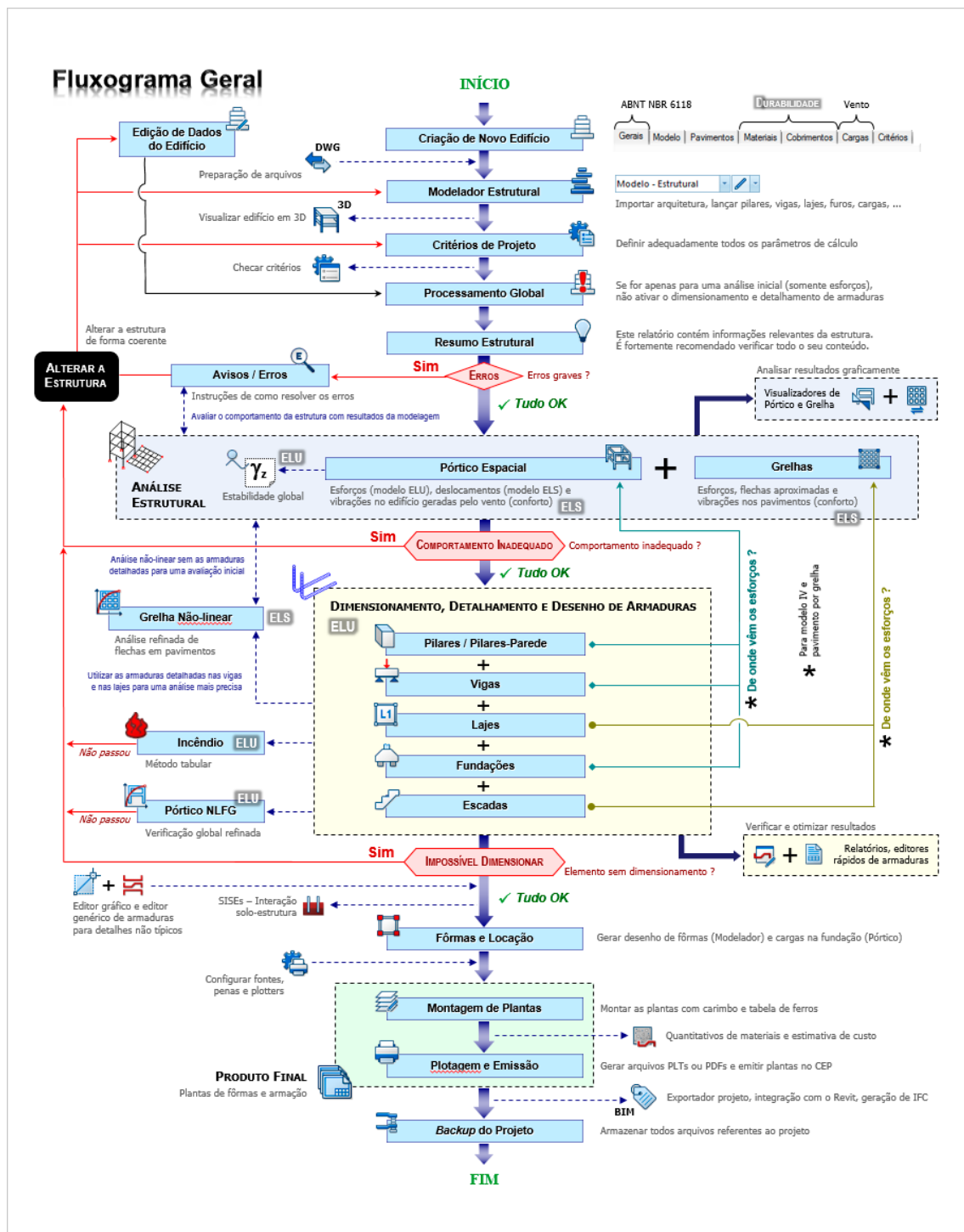


Figura 3-2 – Fluxograma Geral TQS. Fonte: TQS informática

### 3.1 – Características dos modelos

O EDIF 15 e o EDIF 40 foram modelados com a mesma metodologia, diferenciando-se apenas pelo número de pavimentos tipos, sendo térreo mais 14 repetições no EDIF 15 e térreo mais 39 repetições no EDIF 40. Ambos possuem lances com pé-direito de 3m, resultando em alturas totais de 45m e 120m, respectivamente. Essa configuração permite realizar uma análise comparativa entre estruturas com alturas distintas, avaliando o impacto desse fator no comportamento estrutural.

### 3.2 - Modelagem estrutural pelo TQS

Inicialmente, é fundamental proceder à escolha do modelo estrutural do edifício que é desenvolvido no programa TQS, pois isto determina a abordagem de análise e os parâmetros que são utilizados ao longo do processo de modelagem e dimensionamento da estrutura. Cabe destacar que, na versão utilizada do TQS V23.9.20, existem limitações em relação às opções de modelagem disponíveis, sendo possível a realização apenas dos modelos IV e VI. Essa restrição deve ser considerada pelos projetistas ao se configurar a estrutura, conforme ilustrado na Figura 3-3, que detalha as opções dos modelos a serem escolhidos.

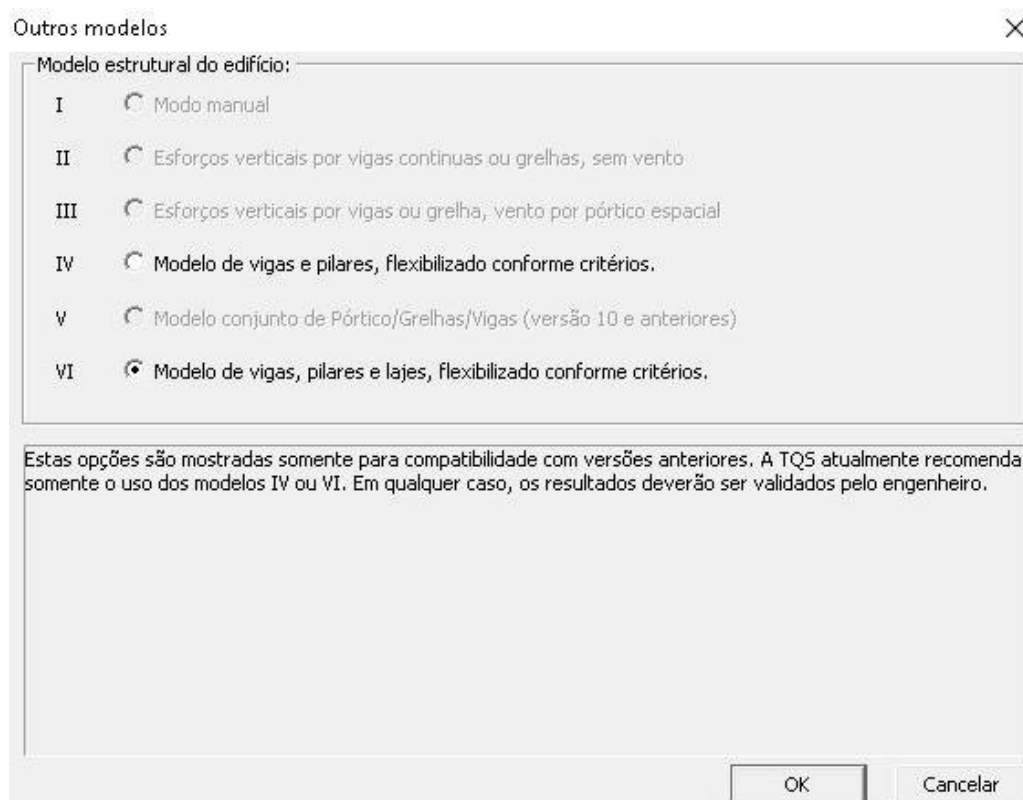
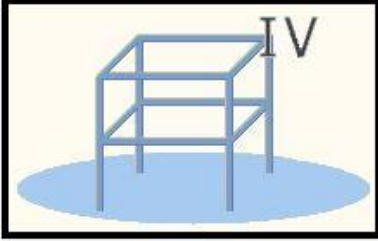


Figura 3-3 – Modelos a serem utilizados na análise. Fonte: TQS

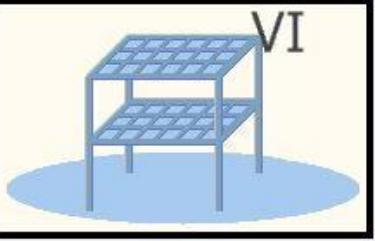
A escolha entre os Modelos IV e VI no programa TQS deve ser feita considerando as características da estrutura e os objetivos específicos da análise. O Modelo IV, conforme descrição apresentada na Figura 3-4, é representado por um pórtico espacial composto por vigas e pilares, com as lajes tratadas como diafragmas rígidos que não contribuem diretamente para a rigidez global. As lajes são analisadas separadamente, e suas cargas são transferidas para o pórtico espacial. Essa abordagem é indicada para edifícios de altura média ou baixa, onde a interação entre lajes e outros elementos estruturais não é significativa, permitindo uma análise simplificada que ainda assegura a integridade estrutural.

Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Modelo estrutural do edifício:



IV ☒ Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios.



VI ☐ Modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizado conforme critérios.

Outros

☐ ?

☐ ?

Modelos independentes:

☒ A estrutura se comporta como um corpo único, sem juntas ou torres separadas

☐ Comportamento de corpos separados por espaços ou juntas, sob ação de vento

Vigas de transição / tirantes

Processo P-Delta

Análise dinâmica

Interação Solo-Estruturas

Pré-moldados

Efeito incremental

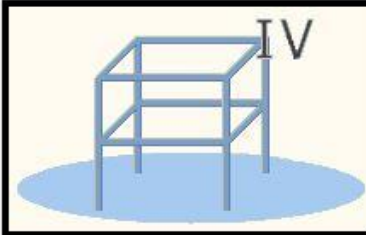
O edifício será modelado por um pórtico espacial mais os modelos dos pavimentos (vigas contínuas ou grelhas). O pórtico será composto apenas por barras que simulam as vigas e pilares da estrutura, com o efeito de diafragma rígido das lajes devidamente incorporado. Os efeitos oriundos das ações verticais e horizontais nas vigas e pilares serão calculados com o pórtico espacial. Nas lajes, somente os efeitos gerados pelas ações verticais serão calculados, de acordo com o modelo selecionado para os pavimentos. Nos pavimentos simulados por grelha de lajes, os esforços resultantes das barras de lajes sobre as vigas serão transferidas como cargas para o pórtico espacial, ou seja, há uma certa integração entre ambos os modelos (pórtico espacial e grelhas). Para os demais tipos de modelos de pavimento, as cargas das lajes serão transferidas para o pórtico por meio de quinhões de carga. Tratamento especial para vigas de transição e que suportam tirantes pode ser ativado no botão abaixo. A flexibilização das ligações viga-pilar, a separação de modelos específicos p/avaliações ELU e ELS, bem como seus respectivos coeficientes de não-linearidade física, são controlados por critérios gerais do Pórtico-TQS.

Figura 3-4 – Modelo IV. Fonte: TQS.

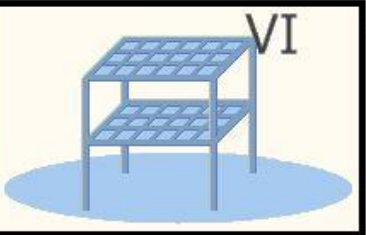
O Modelo VI, apresentado na Figura 3-5, oferece uma análise mais detalhada ao considerar a interação entre vigas, pilares e lajes como um sistema integrado, com a flexibilidade de todos os elementos respeitando critérios específicos. Nesse modelo, as lajes participam efetivamente da rigidez global, o que permite uma simulação mais realista dos esforços e deslocamentos. O Modelo VI é especialmente recomendado para edifícios altos e complexos, onde a rigidez das lajes influencia a redistribuição de cargas e a estabilidade geral da estrutura. Essa abordagem é fundamental para projetos que exigem uma avaliação precisa das ações horizontais, como vento e sismos, evitando deslocamentos excessivos e garantindo a segurança estrutural.

Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Modelo estrutural do edifício:



IV



VI

Outros

IV ☐ Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios. ?

VI ☒ Modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizado conforme critérios. ?

Modelos independentes

☒ A estrutura se comporta como um corpo único, sem juntas ou torres separadas

☐ Comportamento de corpos separados por espaços ou juntas, sob ação de vento

Vigas de transição / tirantes

Processo P-Delta

Análise dinâmica

Interação Solo-Estruturas

Pré-moldados

Efeito incremental

O edifício será modelado por um pórtico espacial, composto por elementos que simularão as vigas, pilares e lajes da estrutura. Os efeitos gerados pela aplicação das ações verticais e horizontais serão calculados com esse modelo. Dessa forma, além das vigas e pilares, as lajes passarão a resistir parte dos esforços gerados pelo vento, situação essa não flagrada pelos demais modelos. Embora seja obrigatório definir o modelo dos pavimentos como grelha de lajes, esta não será utilizada e servirá apenas de base para geração do modelo espacial. Será utilizada a técnica de subestruturas para otimizar o tempo de processamento. Tratamento especial para vigas de transição e que suportam tirantes pode ser ativado no botão abaixo. A flexibilização das ligações viga-pilar, a separação de modelos específicos p/ avaliações ELU e ELS, bem como seus respectivos coeficientes de não-linearidade física, são controlados por critérios gerais do Pórtico-TQS.

Figura 3-5 – Modelo VI. Fonte: TQS.

Esse modelo foi O adotado neste estudo devido ao uso do efeito incremental no TQS, aplicado exclusivamente ao Modelo VI, conforme ilustrado na Figura 2-9. Essa abordagem permite uma representação mais precisa do comportamento de edifícios altos, ao considerar a sequência construtiva e o carregamento progressivo em cada etapa da obra. A metodologia leva em conta a deformação axial dos pilares sob carga vertical, especialmente daqueles submetidos a maiores tensões normais, o que resulta em uma redistribuição mais coerente dos esforços para os demais pilares da estrutura. Além disso, o método possibilita a acomodação progressiva dos pisos durante a construção, sem a necessidade de intervenções manuais, como ajustes na área das seções transversais dos pilares (MULAXI) ou do acréscimo de inércia nas vigas (MULETR), de acordo com o critério padrão de projeto definido pelo TQS.

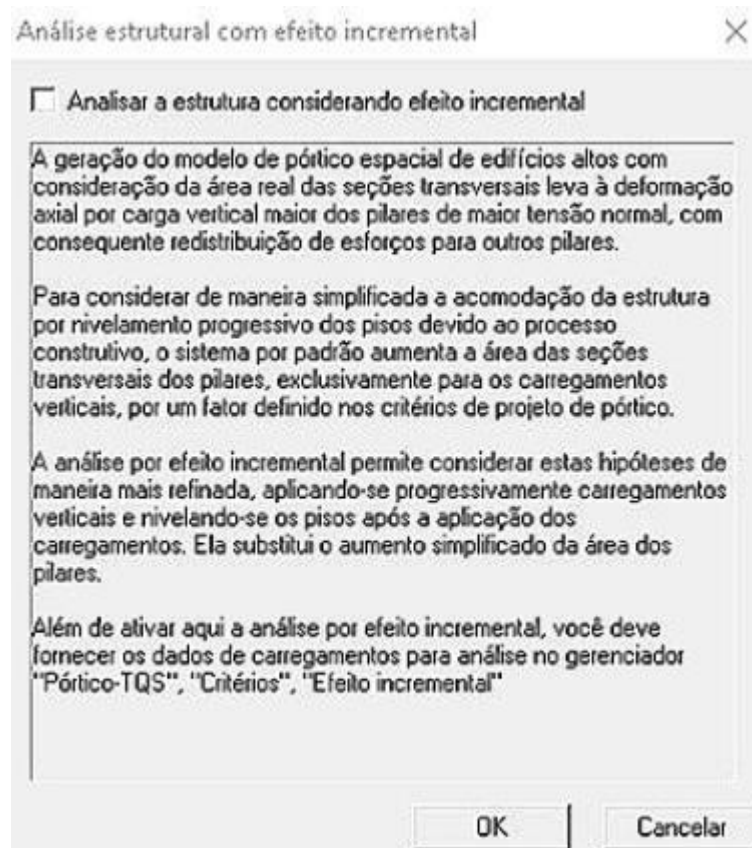


Figura 3-6 – Análise estrutural com efeito incremental. Fonte: TQS.

Para simular adequadamente o incremento de cargas, deve ser definido o histórico de carregamento com base nas parcelas e etapas de cargas, sendo aplicado conforme ilustrado na Figura 3-7.

**TQS** Definição de Parcelas e etapas de carga

Histórico de Carregamento | Curva E x Tempo | Resultados Intermediários

**Explicação**  
Nesta área são definidos os critérios que controlam o histórico de carregamento e o número de fases construtivas a serem analisadas.

**Critérios**  
Número de pavimentos construídos ao mesmo tempo: 1  
Número de dias que representam uma fase construtiva: 7

**Histórico de Carregamentos:**

| Caso de carregamento                          |     | Parcela(%) | Fase  |
|-----------------------------------------------|-----|------------|-------|
| Todas permanentes e acidentais dos pavimentos | ... | 0          | 0     |
|                                               | ... | 100        | Final |
| Peso Próprio                                  | ... | 100        | 0     |
|                                               | ... | 0          | Final |
| Cargas permanentes                            | ... | 100        | 0     |
|                                               | ... | 0          | Final |
| Cargas acidentais                             | ... | 100        | 0     |
|                                               | ... | 0          | Final |

OK Cancel

Figura 3-7 – Aplicação das etapas de carregamento. Fonte: TQS.

Para fins de avaliação do módulo de elasticidade ao longo do tempo, empregou-se o item 12.3.3 da NBR6118:2023, sendo a relação entre  $f_{ckj}$  e  $f_{ck}$  dada pelas Fórmulas 3.1 e 3.2:

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3.2)$$

$$\beta_{12}^{\frac{1}{2}} = \frac{E_{ci}(t)}{E_{ci}} \quad (3.3)$$

onde:

$s = 0,38$  para concreto de cimento CPIV (adotado);

$t$  é a idade efetiva do concreto, expressa em dias;

$E_{ci}$  é o modulo de elasticidade inicial do concreto.

A Figura 3-8 apresenta a implementação da curva E x tempo no programa TQS, utilizando-se das fórmulas apresentadas anteriormente.

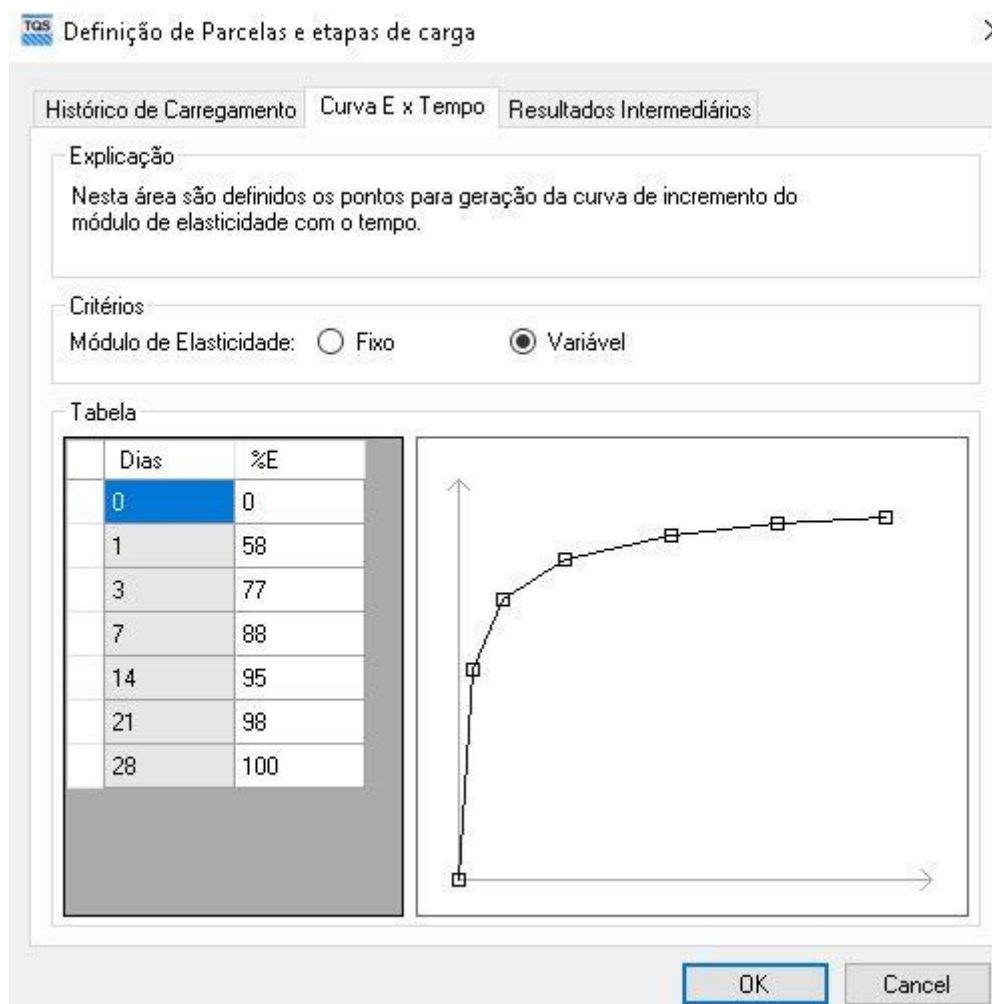


Figura 3-8 – Curva de incremento do módulo de elasticidade. Fonte: TQS.

Assim, a exploração da funcionalidade de fases construtivas do TQS e a utilização das premissas estabelecidas proporcionam um embasamento robusto para investigar as respostas estruturais em diferentes estágios de construção. Isso contribui para a obtenção de resultados confiáveis e significativos, alinhados com os objetivos e o escopo desta dissertação.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

---

A análise de resultados constitui uma etapa fundamental para verificar a validade das hipóteses propostas e compreender os fenômenos investigados. Essa fase envolve a apresentação detalhada dos dados coletados, utilizando elementos visuais como gráficos e tabelas para facilitar a interpretação e identificação de padrões e relações significativas. Além disso, a análise é complementada por uma discussão crítica que contextualiza os achados no âmbito do conhecimento existente, evidenciando contribuições, limitações e novas perspectivas para o campo de estudo.

### 4.1. Análise de variação do MULETR e MULAXI

A determinação do valor do MULAXI torna-se um ponto de interesse, uma vez que sua adoção no TQS pode influenciar significativamente os resultados obtidos. É necessário destacar que, independentemente do valor escolhido para o MULAXI, o impacto observado não se limita aos pavimentos intermediários, mas se estende por toda a estrutura.

Para confrontar as informações previamente apresentadas no subitem 2.1 “Fator de aumento da seção dos pilares (MULAXI)”, foi confeccionada a Tabela 4-1 que compara as reações verticais nos apoios dos pilares. Essa análise inclui os resultados obtidos com a abordagem incremental bem como outras diversas configurações: a inércia da viga multiplicada por 10,0, sem a utilização do MULAXI, denominada MULETR (10); a inércia da viga multiplicada por 10,0 com MULAXI configurado em 3,0, que representa a configuração padrão do programa; a análise sem qualquer aumento de rigidez nos pilares e nas vigas; e, por fim, a configuração sem aumento da inércia da viga, mas com aumento de rigidez nos pilares utilizando MULAXI igual a 3,0, referida como MULAXI (3).

Tabela 4-1 – Reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez (kN)

(continua)

| PILAR | INCREMENTAL | MULETR<br>(10) | MULAXI (3)<br>+ MULETR<br>(10) | SEM<br>AUMENTO DE<br>RIGIDEZ | MULAXI<br>(3) |
|-------|-------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| P1    | 998,2       | 1113,7         | 911,4                          | 1113,7                       | 981           |

Tabela 4-1 – Reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez  
(kN)

(conclusão)

| PILAR | INCREMENTAL | MULETR<br>(10) | MULAXI (3)<br>+ MULETR<br>(10) | SEM<br>AUMENTO<br>DE RIGIDEZ | MULAXI<br>(3) |
|-------|-------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| P2    | 1700,7      | 1675,0         | 1743,0                         | 1675,0                       | 1720,8        |
| P3    | 996,0       | 1111,2         | 911,0                          | 1111,2                       | 979,9         |
| P4    | 1791,7      | 1782,9         | 1748,0                         | 1782,9                       | 1778,5        |
| P5    | 3172,8      | 2780,9         | 3522,0                         | 2780,9                       | 3228,1        |
| P6    | 1773,9      | 1764,6         | 1726,7                         | 1764,6                       | 1758,3        |
| P7    | 991,4       | 1105,5         | 904,9                          | 1105,5                       | 973,8         |
| P8    | 1689,1      | 1665,2         | 1731,7                         | 1665,2                       | 1709,8        |
| P9    | 986,6       | 1101,6         | 901,7                          | 1101,4                       | 970,4         |
| SOMA  | 14100,4     | 14100,4        | 14100,4                        | 14100,4                      | 14100,4       |

Observa-se que não há acréscimo de carga, mas sim uma redistribuição conforme o aumento da rigidez em direção ao centro da edificação, reduzindo as cargas nas extremidades da estrutura. Além disso, embora a arquitetura seja simétrica, os resultados não apresentaram essa mesma simetria, possivelmente devido ao uso do modelo VI do TQS, que considera a estrutura dimensionada com a laje, cuja malha pode não possuir dimensões idênticas em todos os seus elementos.

A Figura 4-1 ilustra, na forma de gráfico de barras, as reações nos pilares do EDIF 15 obtidos a partir das diversas configurações de rigidez dos elementos de vigas e/ou pilares.

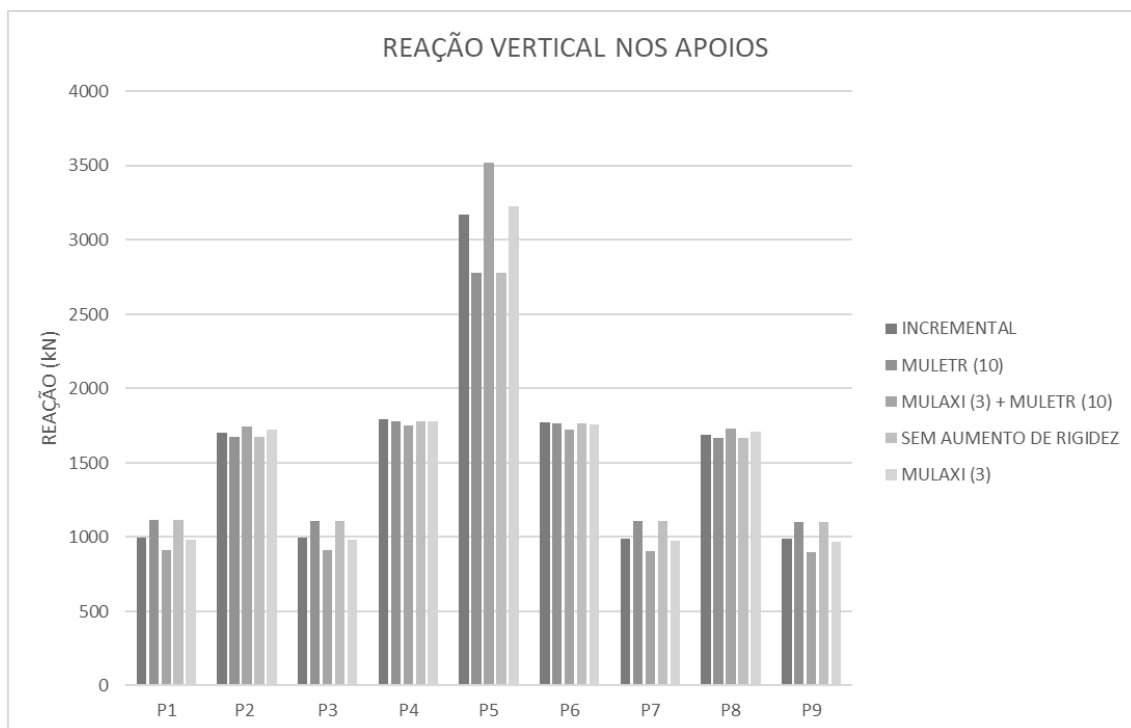


Figura 4-1 – Variação das reações nos apoios a partir de diversas configurações de rigidez.

A redistribuição dos esforços pode levar a maiores solicitações nos pilares externos ao longo da vida útil da edificação, resultando em recalques diferenciais ou em problemas internos, como fissuras nas alvenarias. Na Tabela 4-2 está a diferença das reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez em comparação com a análise incremental o que evidencia essa redistribuição dos esforços.

Tabela 4-2 – Diferença das reações nos pilares do EDIF 15 para diferentes configurações de rigidez em comparação com a análise incremental (kN)

| PILAR | MULETR (10) | MULAXI (3) + MULETR (10) | SEM AUMENTO DE RIGIDEZ | MULAXI (3) |
|-------|-------------|--------------------------|------------------------|------------|
| P1    | 11,6%       | -8,7%                    | 11,6%                  | -1,7%      |
| P2    | -1,5%       | 2,5%                     | -1,5%                  | 1,2%       |
| P3    | 11,6%       | -8,5%                    | 11,6%                  | -1,6%      |
| P4    | -0,5%       | -2,4%                    | -0,5%                  | -0,7%      |
| P5    | -12,4%      | 11,0%                    | -12,4%                 | 1,7%       |
| P6    | -0,5%       | -2,7%                    | -0,5%                  | -0,9%      |
| P7    | 11,5%       | -8,7%                    | 11,5%                  | -1,8%      |
| P8    | -1,4%       | 2,5%                     | -1,4%                  | 1,2%       |
| P9    | 11,6%       | -8,6%                    | 11,6%                  | -1,6%      |

Pode-se destacar que, na análise do EDIF 15, o aumento de rigidez axial do pilar igual a 3,0 foi o único que apresentou condições seguras e eficientes, considerando que variações inferiores a 5% em relação ao efeito incremental foram identificadas. Ressalta-se também que embora o método de aumento de rigidez do pilar seja eficaz, sua aplicação exige um estudo detalhado e uma definição criteriosa do valor desse acréscimo visto que seu valor depende das características específicas de cada edificação. Assim, torna-se necessário, em cada caso, realizar uma modelagem por elementos finitos com o uso do recurso de faseamento da obra, comparando os resultados com aqueles obtidos pelo aumento da rigidez.

Ao se comparar os modelos com o aumento de rigidez na viga (MULETR 10) e sem qualquer incremento de rigidez, verifica-se que ambos produzem os mesmos resultados. Isso se deve ao fato de não utilizar o MULAXI e não haver vigas de transição no modelo estrutural e assim executa a rotina conforme a Figura 2-3 – Critérios para definição do aumento da seção dos pilares. Fonte: TQS adaptado.

No entanto, os resultados obtidos quando se faz o enrijecimento dos pilares (MULAXI igual a 3,0), considerando as condições com e sem o enrijecimento das vigas (MULETR igual a 10), apresentam diferenças entre si, mesmo na ausência de viga de transição no modelo estudado. Isso ratifica os critérios de cálculo apresentados na Figura 2-3, em que a área da seção transversal do pilar considerada no pórtico ( $A_{pi}$ ) é alterada quando o MULETR está ativado em conjunto com o MULAXI.

Essa comparação foi conduzida exclusivamente no modelo do EDIF 15, visto que os resultados obtidos durante o processo de cálculo validaram a rotina apresentada na Figura 2-3.

A aplicação do fator MULAXI no TQS ajusta a área efetiva dos pilares, reduzindo as deformações axiais previstas e promovendo uma distribuição de esforços mais uniforme ao longo da estrutura, quando modelada em passo único. Dessa forma, M.E.F. CLÁSSICO, sem consideração de aumento de rigidez, utilizou-se os resultados dos momentos fletores modelado pelo programa SAP2000 seguindo o trabalho de Lima e Macedo (2014), e pelo ROBOT para as reações de apoio, visto que o trabalho citado não analisa a reação de apoio de todos os pilares da edificação, o MULAXI 1 representa a área da seção transversal do pilar sem qualquer aumento, mantendo sua rigidez axial igual a E.A (módulo de elasticidade vezes a área original), ou seja, sem multiplicadores de

rigidez adicionais, o MULAXI 2, MULAXI 3, MULAXI 4 e MULAXI 10 terá o aumento de rigidez axial de 1, 2, 3, 4 e 10 respectivamente e o INCREMENTAL será elaborado com a utilização da análise em múltiplos passos do TQS, como pode ser observado na Tabela 4-3.

O MULAXI 10, como apresentado anteriormente é semelhante a adoção de qualquer valor de MULAXI menor que 10, caso seja utilizado juntamente com o MULETR padrão do programa de 10, sendo assim, este será adotado como TQS PADRÃO por seguir a escolha do programa nos índices do MULAXI (Figura 2-1) e do MULETR (Figura 2-2). No caso da análise da deformada o usuário deve utilizar-se da análise não majorada, que desconsidera o aumento de rigidez da viga de transição e do pilar independentemente do valor do MULAXI adotado.

Tabela 4-3 – Efeito MULAXI nos modelos comparados

| DESCRIÇÃO       | RIGIDEZ DO PILAR | FATOR MULAXI | RIGIDEZ ALTERADA |
|-----------------|------------------|--------------|------------------|
| M.E.F. CLÁSSICO | E . A            | -            | E . A            |
| MULAXI 1        | E . A            | 1            | E . A            |
| MULAXI 2        | E . A            | 2            | E . 2A           |
| MULAXI 3        | E . A            | 3            | E . 3A           |
| MULAXI 4        | E . A            | 4            | E . 4A           |
| MULAXI 10       | E . A            | 10           | E . 10A          |
| INCREMENTAL     | E . A            | -            | E . A            |

A Tabela 4-4 resume os momentos fletores da viga V5, próximo ao P5 do EDIF 15 para os diversos valores de aumento de rigidez axial dos pilares.

Tabela 4-4 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15 (kN.m)

(continua)

| Pav. | SAP 2000<br>Clássico | TQS<br>MULAXI<br>1 | TQS<br>MULAXI<br>2 | TQS<br>MULAXI<br>3 | TQS<br>MULAXI<br>4 | TQS<br>Padrão<br>MULAXI<br>10 | TQS<br>Incremental |
|------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1    | -57,1                | -80,0              | -83,2              | -84,6              | -85,4              | -87,0                         | -80,5              |
| 2    | -48,0                | -71,4              | -77,3              | -79,9              | -81,4              | -84,6                         | -71,9              |
| 3    | -41,5                | -64,9              | -73,2              | -76,9              | -79,1              | -83,6                         | -64,8              |
| 4    | -35,7                | -58,9              | -69,3              | -74,0              | -76,7              | -82,5                         | -59,4              |
| 5    | -30,6                | -53,7              | -65,8              | -71,3              | -74,6              | -81,6                         | -55,5              |
| 6    | -26,3                | -49,1              | -62,6              | -69,0              | -72,7              | -80,7                         | -53,1              |
| 7    | -22,5                | -45,0              | -59,9              | -66,9              | -71,0              | -79,9                         | -52,0              |
| 8    | -19,3                | -41,5              | -57,4              | -65,0              | -69,5              | -79,2                         | -52,2              |

Tabela 4-4 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15 (kN.m)

(conclusão)

| Pav. | SAP 2000<br>Clássico | TQS<br>MULAXI<br>1 | TQS<br>MULAXI<br>2 | TQS<br>MULAXI<br>3 | TQS<br>MULAXI<br>4 | TQS<br>Padrão<br>MULAXI<br>10 | TQS<br>Incremental |
|------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
| 9    | -16,6                | -38,4              | -55,3              | -63,4              | -68,2              | -78,6                         | -53,6              |
| 10   | -14,3                | -35,8              | -53,5              | -62,0              | -67,0              | -78,1                         | -56,0              |
| 11   | -12,4                | -33,7              | -52,0              | -60,8              | -66,1              | -77,6                         | -59,6              |
| 12   | -10,8                | -31,9              | -50,7              | -59,9              | -65,3              | -77,2                         | -64,2              |
| 13   | -9,9                 | -30,8              | -50,0              | -59,3              | -64,9              | -77,1                         | -69,9              |
| 14   | -7,2                 | -28,5              | -48,3              | -57,9              | -63,6              | -76,2                         | -76,5              |
| 15   | -19,7                | -42,8              | -60,3              | -68,8              | -73,8              | -84,5                         | -88,4              |

Na Figura 4-2 está representado graficamente os momentos fletores negativos ao longo dos pavimentos do EDIF 15.

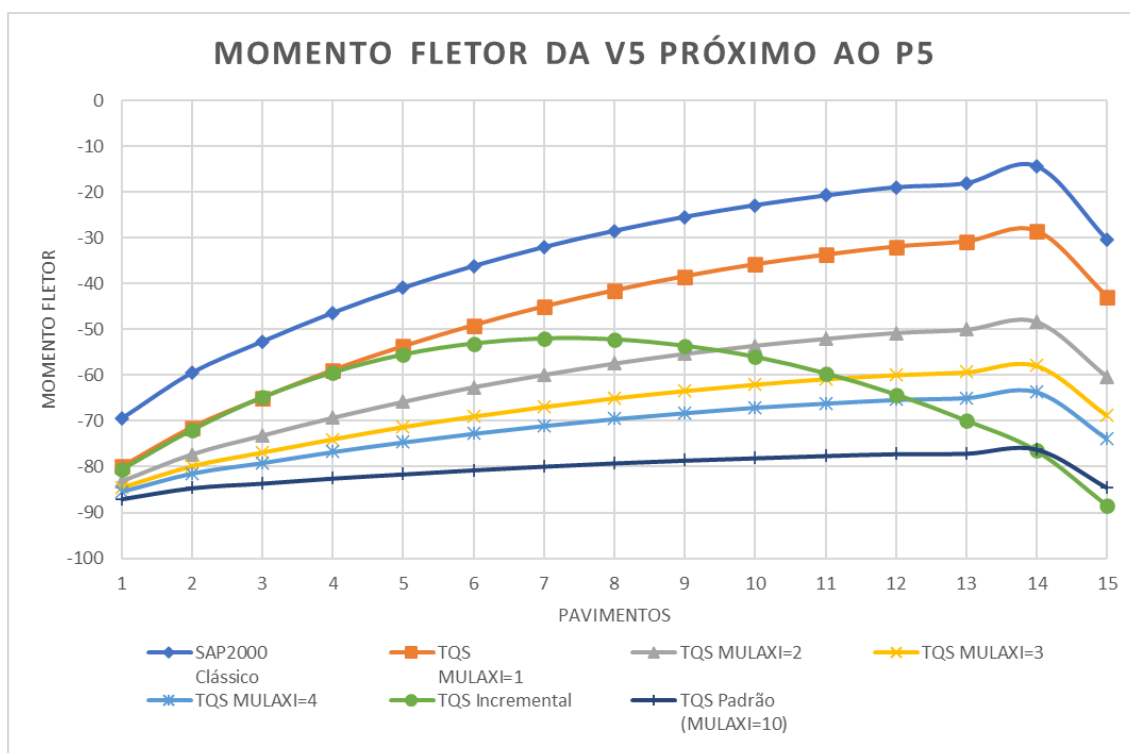


Figura 4-2 – Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.

A Figura 4-3 ilustra a diferença percentual entre os momentos fletores da viga V5 calculados a partir dos diversos modelos de análises, tomando como referência as respostas do TQS incremental.

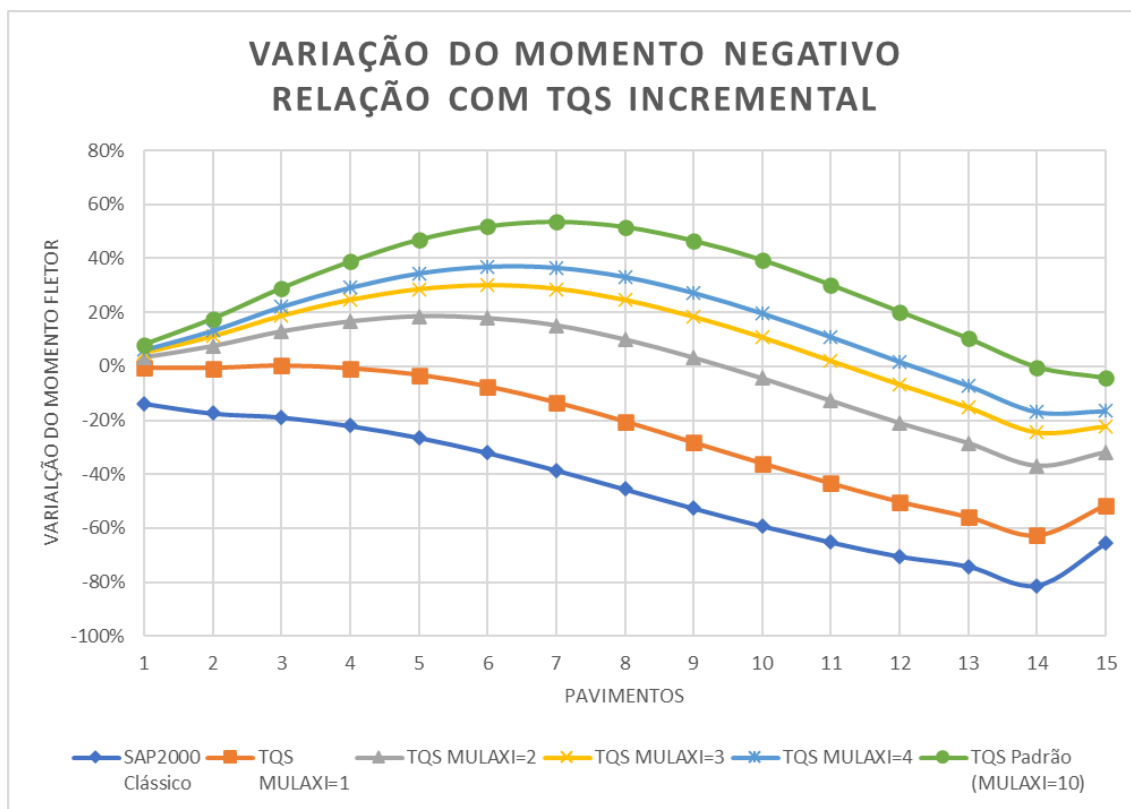


Figura 4-3 – Variação do momento fletor em % da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.

Ao aumentar o valor do MULAXI no TQS, observa-se uma mudança considerável nas solicitações de todos os pavimentos, contrariamente à expectativa da sequência incremental, que tal alteração afetaria apenas pavimentos intermediários. Esta análise gera questionamentos sobre a aplicabilidade desse acréscimo de rigidez nos pilares como solução para corrigir os resultados.

A análise estrutural requer uma abordagem mais refinada, considerando a variação do MULAXI de acordo com o pavimento específico. Dessa forma, é possível alinhar os resultados obtidos com os princípios do efeito incremental, proporcionando uma interpretação mais coerente da resposta estrutural.

Como esperado, o modelo utilizando o MULAXI gera respostas significativamente distantes dos resultados obtidos no estudo de construção em múltiplas etapas. As respostas dos modelos clássico e TQS com MULAXI igual a 1,0 levaram a estimativas não seguras. Por outro lado, ao se utilizar a configuração padrão do programa, observa-se um superdimensionamento dos momentos fletores nos primeiros quatorze pavimentos, enquanto no décimo quinto pavimento ocorre um subdimensionamento de

aproximadamente 4%. Mesmo com essa variação, os resultados indicam que a segurança estrutural não seria comprometida.

Convém destacar que, no último pavimento, observa-se um aumento do momento fletor negativo, possivelmente decorrente da interpretação do programa. A descontinuidade do pilar pode levar o programa a considerar que o ponto de retirada dos esforços se desloca da face para uma região mais interna da seção do pilar, onde a rigidez é maior, resultando em um acréscimo do momento fletor.

A Tabela 4-5, bem como as Figura 4-4 e 4-25, mostram os momentos fletores positivos da viga V5, no meio do vão, entre os pilares P2 e P5.

Tabela 4-5 – Momentos fletores, no meio do vão, da viga V5 do EDIF 15 (kN.m)

| Pav. | SAP 2000<br>Clássico | TQS<br>MULAXI<br>1 | TQS<br>MULAXI<br>2 | TQS<br>MULAXI<br>3 | TQS<br>MULAXI<br>4 | TQS<br>Padrão<br>MULAXI<br>10 | TQS<br>Incremental |
|------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1    | 39,9                 | 48,7               | 48,5               | 48,5               | 48,5               | 48,6                          | 50,6               |
| 2    | 39,4                 | 48,7               | 48,2               | 48,0               | 47,9               | 47,8                          | 51,5               |
| 3    | 39,8                 | 49,3               | 48,7               | 48,4               | 48,2               | 47,9                          | 52,1               |
| 4    | 40,0                 | 49,8               | 48,9               | 48,6               | 48,4               | 47,9                          | 52,6               |
| 5    | 40,2                 | 50,2               | 49,2               | 48,8               | 48,5               | 48,0                          | 52,9               |
| 6    | 40,4                 | 50,5               | 49,4               | 49,0               | 48,7               | 48,1                          | 53,1               |
| 7    | 40,6                 | 51,1               | 49,7               | 49,1               | 48,8               | 48,1                          | 53,2               |
| 8    | 40,7                 | 51,7               | 49,8               | 49,3               | 48,9               | 48,2                          | 53,2               |
| 9    | 40,8                 | 52,2               | 50,0               | 49,4               | 49,0               | 48,2                          | 53,2               |
| 10   | 41,0                 | 52,6               | 50,2               | 49,5               | 49,1               | 48,3                          | 53,0               |
| 11   | 41,0                 | 53,0               | 50,3               | 49,6               | 49,2               | 48,3                          | 52,7               |
| 12   | 41,1                 | 53,3               | 50,3               | 49,6               | 49,2               | 48,3                          | 52,4               |
| 13   | 41,3                 | 53,6               | 50,5               | 49,8               | 49,3               | 48,4                          | 52,0               |
| 14   | 40,4                 | 53,3               | 50,0               | 49,3               | 48,9               | 48,0                          | 51,4               |
| 15   | 46,7                 | 59,2               | 56,4               | 55,1               | 54,3               | 53,3                          | 54,3               |

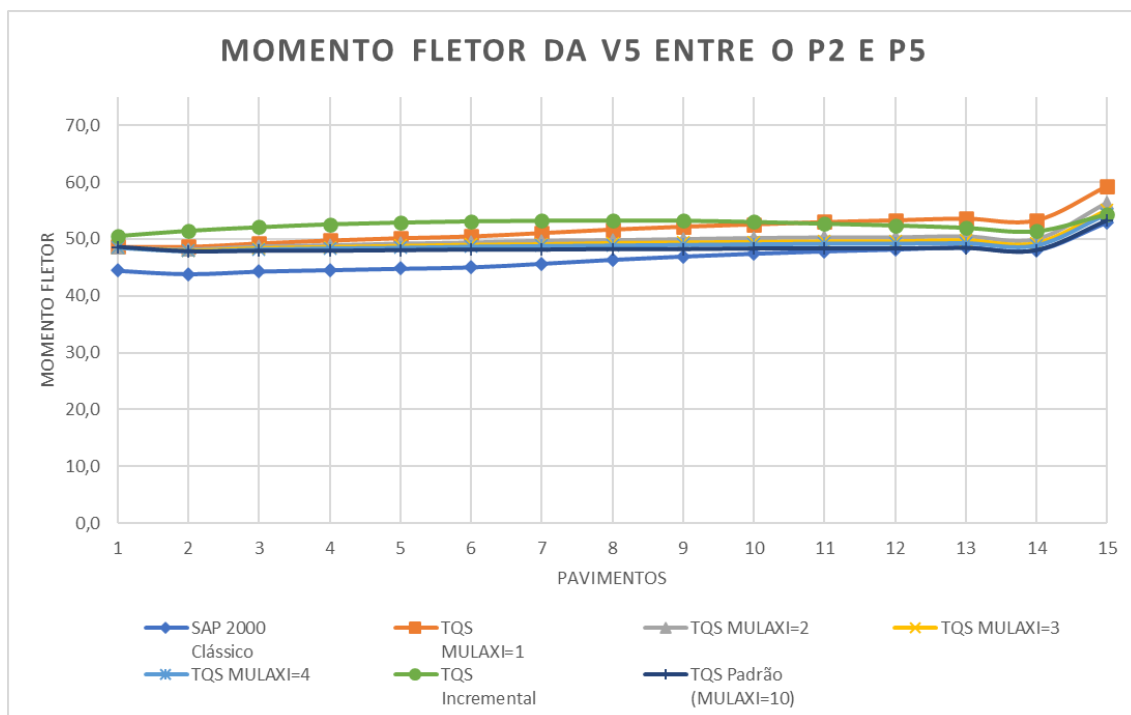


Figura 4-4 – Momento fletor em kN.m, no meio do vão, da viga do EDIF 15.

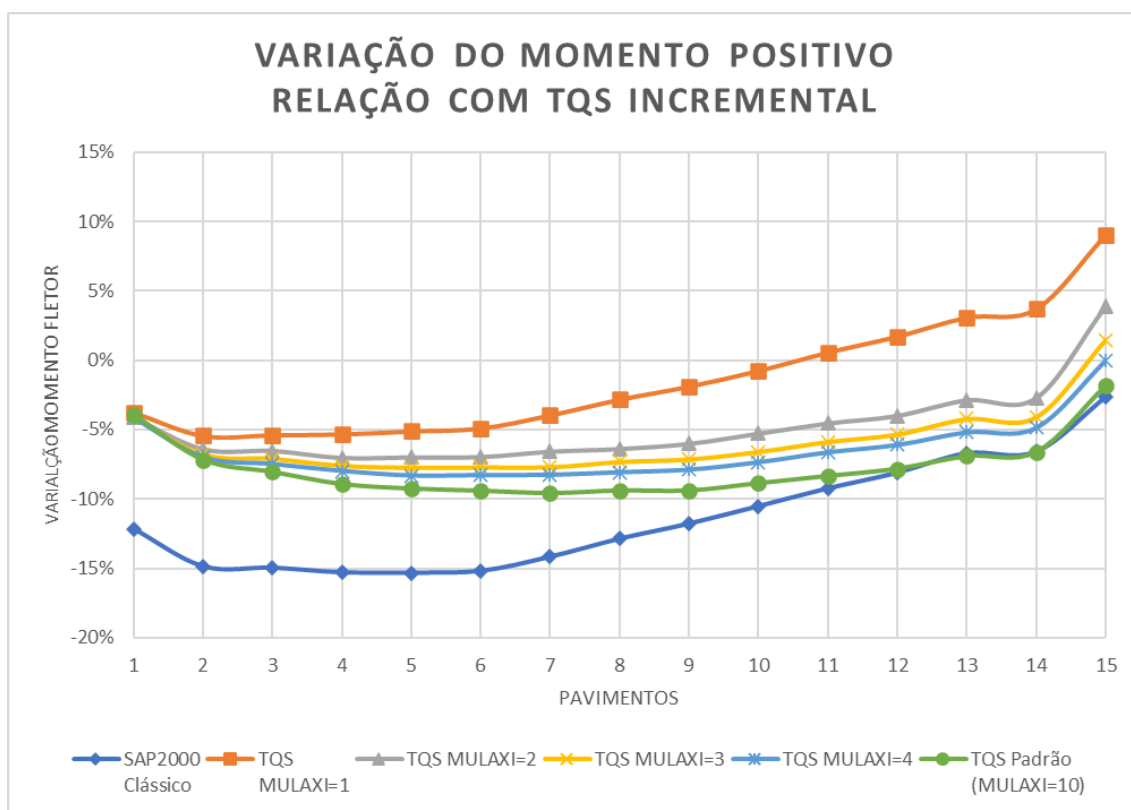


Figura 4-5 – Variação do momento fletor em %, no meio do vão, da viga V5 do EDIF 15.

Conforme previsto, com base nos dados anteriores, o aumento de rigidez nos pilares resultou em um incremento nos momentos fletores negativos, o que, por sua vez, levou a uma redução nos momentos fletores positivos. Nos pavimentos intermediários, essa abordagem gerou diferenças de até 10%, no modelo TQS padrão (MULAXI=10), comprometendo a segurança no dimensionamento estrutural.

Da mesma forma que o ocorrido no momento fletor negativo, no último pavimento, observa-se um aumento do momento fletor positivo, possivelmente decorrente da interpretação do programa. A descontinuidade do pilar, ao reduzir o local do apoio, pode aumentar o comprimento da viga, conseqüentemente dando um acréscimo do momento fletor positivo.

Os deslocamentos apresentados na Tabela 4-6 e na Figura 4-6 complementam a análise, fornecendo uma perspectiva adicional sobre o comportamento estrutural nas condições avaliadas.

Tabela 4-6 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15 (mm)

| Pavimento | SAP 2000<br>Clássico | TQS<br>Padrão | TQS<br>Incremental |
|-----------|----------------------|---------------|--------------------|
| 1         | 0,60                 | 0,90          | 1,10               |
| 2         | 1,20                 | 1,80          | 1,90               |
| 3         | 1,60                 | 2,60          | 2,60               |
| 4         | 1,90                 | 3,20          | 3,10               |
| 5         | 2,30                 | 3,80          | 3,50               |
| 6         | 2,60                 | 4,40          | 3,70               |
| 7         | 2,90                 | 4,90          | 3,90               |
| 8         | 3,10                 | 5,30          | 3,90               |
| 9         | 3,30                 | 5,70          | 3,80               |
| 10        | 3,50                 | 6,00          | 3,50               |
| 11        | 3,60                 | 6,20          | 3,20               |
| 12        | 3,80                 | 6,40          | 2,80               |
| 13        | 3,80                 | 6,60          | 2,30               |
| 14        | 3,90                 | 6,70          | 1,70               |
| 15        | 3,90                 | 6,70          | 0,90               |

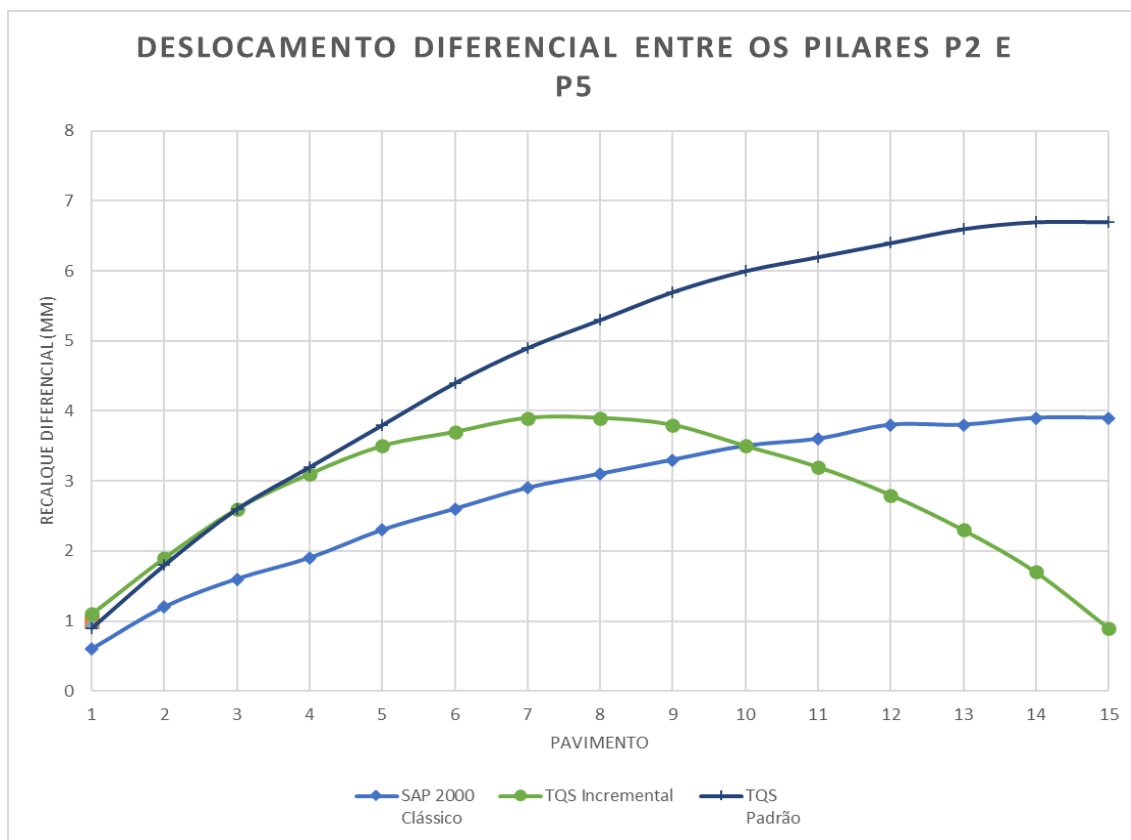


Figura 4-6 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15.

Os deslocamentos, de acordo com o esperado, apresentaram diferenças significativas entre os métodos de construção em passo único e em múltiplos passos. Dessa forma, não é aconselhável utilizar o método de aumento da rigidez para a análise de deslocamentos, uma vez que essa abordagem não reflete adequadamente o comportamento estrutural progressivo ao longo da construção.

A Tabela 4-7 e Figura 4-7 apresentam as reações verticais nos apoios para as diversas configurações de rigidez axial dos pilares.

Tabela 4-7 – Reações verticais nos apoios do EDIF 15 (kN)

(continua)

| Pilar | ROBOT Clássico | TQS MULAXI 1 | TQS MULAXI 2 | TQS MULAXI 3 | TQS MULAXI 4 | TQS Incremental | TQS Padrão MULAXI 10 |
|-------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|
| P1    | 1119,0         | 1113,7       | 1022,0       | 981,0        | 957,9        | 998,2           | 911,4                |
| P2    | 1681,2         | 1675,0       | 1706,4       | 1720,8       | 1728,7       | 1700,7          | 1743,4               |
| P3    | 1119,0         | 1111,2       | 1020,4       | 979,9        | 957,0        | 996,0           | 911,0                |
| P4    | 1767,3         | 1782,9       | 1785,9       | 1778,5       | 1771,3       | 1791,7          | 1748,0               |

Tabela 4-7 – Reações verticais nos apoios do EDIF 15 (kN)

(conclusão)

| Pilar | ROBOT Clássico | TQS MULAXI 1 | TQS MULAXI 2 | TQS MULAXI 3 | TQS MULAXI 4 | TQS Incremental | TQS Padrão MULAXI 10 |
|-------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|
| P5    | 2727,4         | 2780,9       | 3078,5       | 3228,1       | 3318,9       | 3172,8          | 3521,9               |
| P6    | 1767,3         | 1764,6       | 1766,2       | 1758,3       | 1750,7       | 1773,9          | 1726,7               |
| P7    | 1119,0         | 1105,5       | 1014,4       | 973,8        | 950,9        | 991,4           | 904,9                |
| P8    | 1681,2         | 1665,2       | 1695,9       | 1709,8       | 1717,4       | 1689,1          | 1731,4               |
| P9    | 1119,0         | 1101,4       | 1010,8       | 970,4        | 947,6        | 986,6           | 901,7                |
| Soma  | 14100,4        | 14100,4      | 14100,4      | 14100,4      | 14100,4      | 14100,4         | 14100,4              |

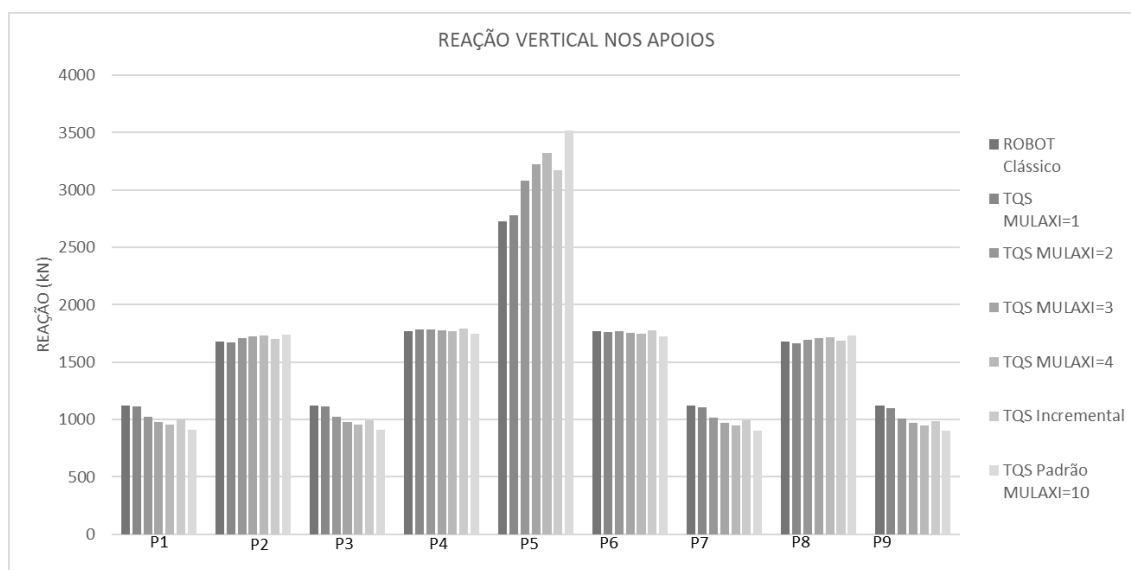


Figura 4-7 – Reações verticais nos apoios do EDIF 15.

A Figura 4-8 ilustra a diferença percentual entre reações nos pilares do EDIF 15 calculados a partir dos diversos modelos de análise, tomando como referência as respostas do TQS incremental.

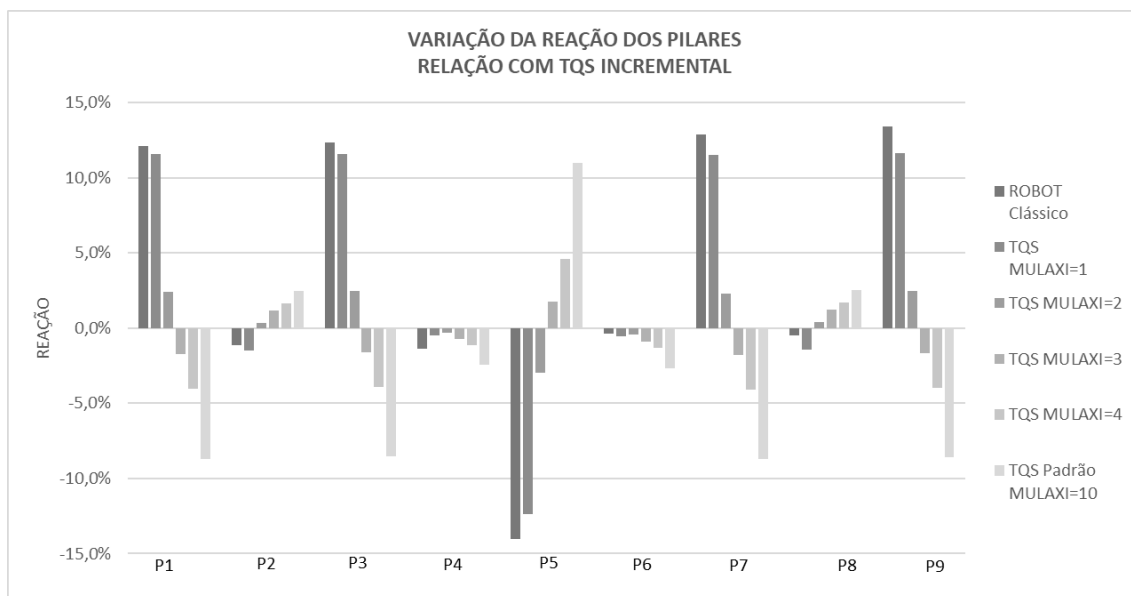


Figura 4-8 – Variação das reações verticais nos apoios do EDIF 15.

Utilizando o TQS com atributos padrões, as reações são majoradas em consideração à análise incremental do TQS em 11% no pilar central. Ademais, as reações se mostram próximas às do incremental, com variação próxima dos 2%, no modelo TQS com MULAXI igual a 3,0.

Similarmente à análise realizada para o EDIF 15, foram também confeccionados modelos para estudar as solicitações e deslocamentos no edifício de 40 andares. A Tabela 4-8, a Figura 4-9 e a Figura 4-10 resumem os resultados obtidos.

Tabela 4-8 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m)

(continua)

| Pav. | SAP 2000 Clássico | TQS MULAXI 1 | TQS MULAXI 2 | TQS MULAXI 3 | TQS MULAXI 4 | TQS Incremental | TQS Padrão MULAXI 10 |
|------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|
| 1    | -64,2             | -79,0        | -81,7        | -83,0        | -83,8        | -76,4           | -85,8                |
| 2    | -50,4             | -69,3        | -74,3        | -76,7        | -78,3        | -63,6           | -82,2                |
| 3    | -39,2             | -61,7        | -68,7        | -72,2        | -74,4        | -52,3           | -80,0                |
| 4    | -28,9             | -54,7        | -63,3        | -67,6        | -70,4        | -42,5           | -77,7                |
| 5    | -19,6             | -48,3        | -58,3        | -63,4        | -66,7        | -34,1           | -75,6                |
| 6    | -11,1             | -42,5        | -53,6        | -59,4        | -63,2        | -27,0           | -73,5                |
| 7    | -3,4              | -37,3        | -49,2        | -55,6        | -59,9        | -21,0           | -71,5                |
| 8    | 3,6               | -32,5        | -45,1        | -52,1        | -56,7        | -16,0           | -69,5                |
| 9    | 10,0              | -28,1        | -41,3        | -48,7        | -53,7        | -11,8           | -67,7                |
| 10   | 15,8              | -24,1        | -37,7        | -45,5        | -50,9        | -8,4            | -65,9                |

Tabela 4-8 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m)

(conclusão)

| Pav. | SAP<br>2000<br>Clássico | TQS<br>MULAXI<br>1 | TQS<br>MULAXI<br>2 | TQS<br>MULAXI<br>3 | TQS<br>MULAXI<br>4 | TQS<br>Incremental | TQS<br>Padrão<br>MULAXI<br>10 |
|------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| 11   | 21,0                    | -20,5              | -34,4              | -42,6              | -48,2              | -5,6               | -64,2                         |
| 12   | 25,8                    | -17,2              | -31,3              | -39,7              | -45,6              | -3,4               | -62,6                         |
| 13   | 30,2                    | -14,2              | -28,4              | -37,1              | -43,2              | -1,7               | -61,0                         |
| 14   | 34,1                    | -11,4              | -25,7              | -34,6              | -40,9              | -0,4               | -59,5                         |
| 15   | 37,7                    | -8,9               | -23,2              | -32,3              | -38,8              | 0,0                | -58,1                         |
| 16   | 41,0                    | -6,6               | -20,8              | -30,1              | -36,7              | 0,0                | -56,7                         |
| 17   | 44,0                    | -4,5               | -18,7              | -28,0              | -34,8              | 0,0                | -55,4                         |
| 18   | 46,7                    | -2,5               | -16,6              | -26,0              | -33,0              | 0,0                | -54,2                         |
| 19   | 49,1                    | -0,8               | -14,7              | -24,2              | -31,3              | 0,0                | -53,0                         |
| 20   | 51,3                    | 0,8                | -12,9              | -22,5              | -29,7              | 0,0                | -51,9                         |
| 21   | 53,4                    | 2,3                | -11,3              | -20,9              | -28,2              | -1,0               | -50,9                         |
| 22   | 55,2                    | 3,6                | -9,8               | -19,4              | -26,7              | -2,2               | -49,9                         |
| 23   | 56,9                    | 4,9                | -8,3               | -18,0              | -25,4              | -3,6               | -48,9                         |
| 24   | 58,4                    | 6,0                | -7,0               | -16,7              | -24,2              | -5,3               | -48,1                         |
| 25   | 59,8                    | 7,0                | -5,8               | -15,5              | -23,0              | -7,3               | -47,2                         |
| 26   | 61,0                    | 8,0                | -4,7               | -14,4              | -21,9              | -9,5               | -46,5                         |
| 27   | 62,2                    | 8,9                | -3,7               | -13,3              | -20,9              | -12,0              | -45,8                         |
| 28   | 63,2                    | 9,7                | -2,7               | -12,4              | -20,0              | -14,8              | -45,1                         |
| 29   | 64,2                    | 10,4               | -1,8               | -11,5              | -19,2              | -17,9              | -44,5                         |
| 30   | 65,0                    | 11,1               | -1,0               | -10,7              | -18,4              | -21,4              | -43,9                         |
| 31   | 65,8                    | 11,7               | -0,3               | -10,0              | -17,7              | -25,2              | -43,4                         |
| 32   | 66,5                    | 12,2               | 0,4                | -9,3               | -17,1              | -29,5              | -43,0                         |
| 33   | 67,2                    | 12,7               | 1,0                | -8,7               | -16,5              | -34,2              | -42,5                         |
| 34   | 67,7                    | 13,2               | 1,5                | -8,2               | -16,0              | -39,3              | -42,2                         |
| 35   | 68,3                    | 13,6               | 1,9                | -7,7               | -15,6              | -45,0              | -41,9                         |
| 36   | 68,8                    | 14,0               | 2,3                | -7,4               | -15,2              | -51,3              | -41,6                         |
| 37   | 69,2                    | 14,5               | 2,7                | -7,0               | -14,9              | -58,2              | -41,4                         |
| 38   | 69,3                    | 14,5               | 2,7                | -7,0               | -14,9              | -65,9              | -41,4                         |
| 39   | 73,1                    | 16,6               | 4,7                | -5,2               | -13,2              | -74,1              | -40,1                         |
| 40   | 47,5                    | -3,6               | -14,1              | -22,8              | -29,8              | -87,4              | -53,4                         |

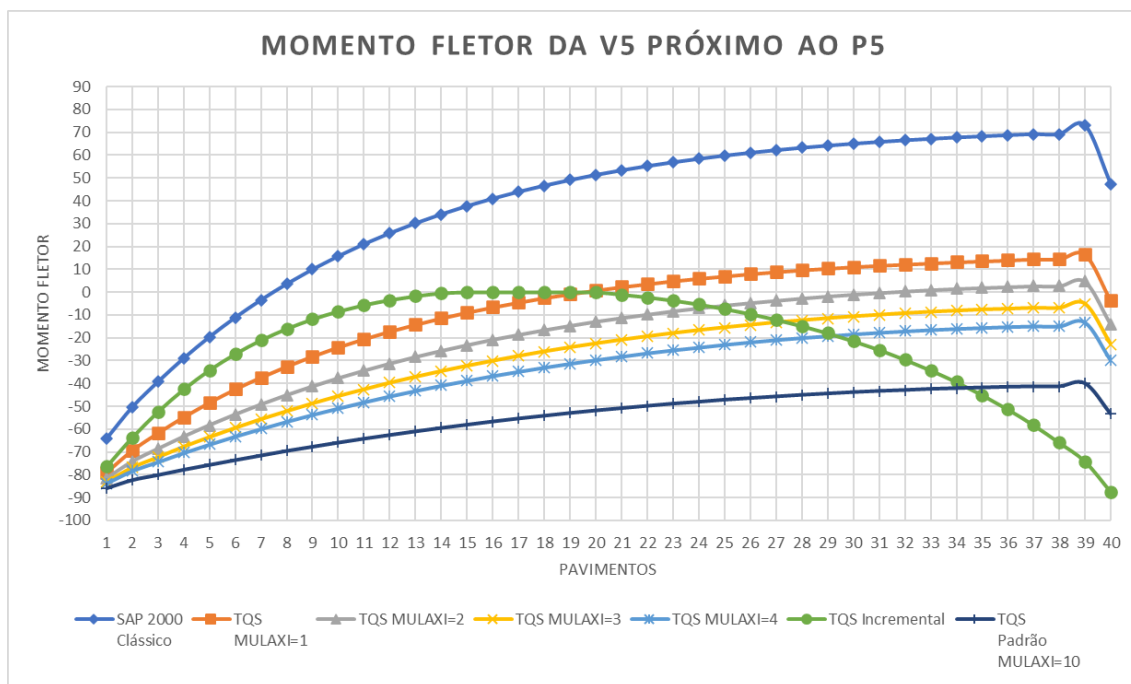


Figura 4-9 – Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.

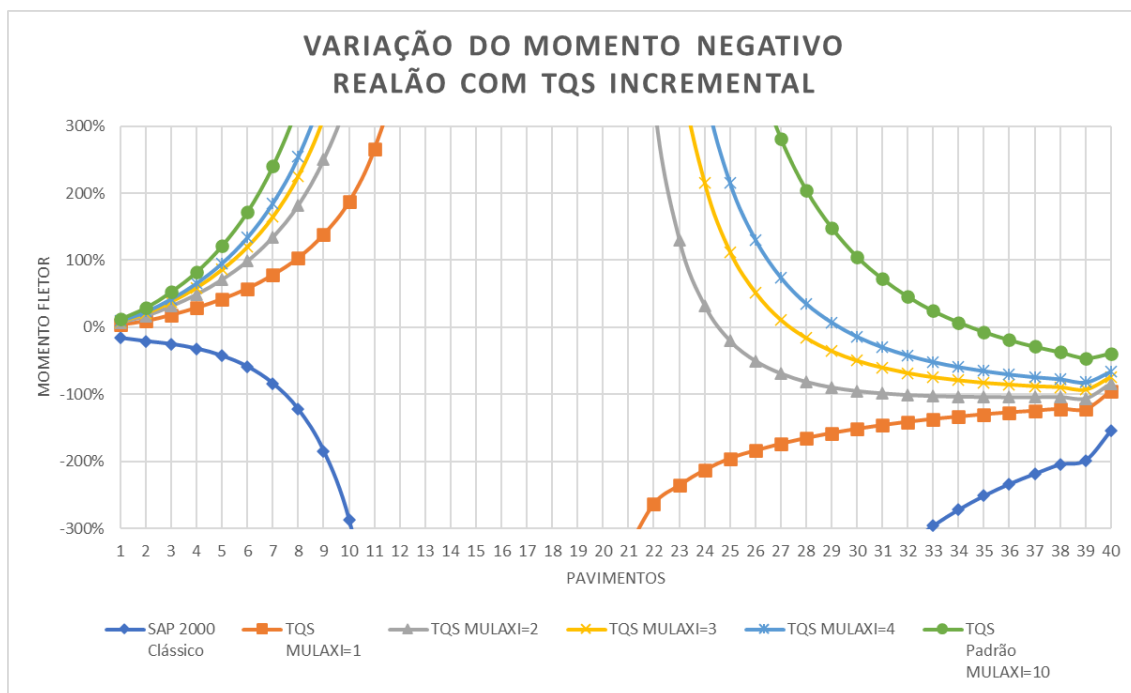


Figura 4-10 – Variação do momento fletor em % da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.

Assim como indicado no caso do EDIF 15, os modelos que enrijecem os pilares não apresentam resultados compatíveis com aqueles obtidos da análise incremental. Com a configuração padrão do programa, observa-se um superdimensionamento nos primeiros trinta e quatro pavimentos, seguido por um subdimensionamento superior a 7% a partir desse ponto, atingindo até 46%, conforme ilustrado na Figura 4-10. Essa discrepância destaca um risco potencial para a integridade estrutural.

A Tabela 4-9 apresenta os momentos fletores positivos da viga V5, no vão meio do vão, por pavimento no EDIF 40. A partir desses dados foram gerados os gráficos das Figura 4-11 e Figura 4-12.

Tabela 4-9 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m)

(continua)

| Pav. | SAP<br>2000<br>Clássico | TQS<br>MULAXI<br>1 | TQS<br>MULAXI<br>2 | TQS<br>MULAXI<br>3 | TQS<br>MULAX<br>4 | TQS<br>Incremental | TQS<br>Padrão<br>MULAXI<br>10 |
|------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1    | 39,9                    | 48,8               | 48,6               | 48,5               | 48,5              | 50,9               | 48,5                          |
| 2    | 40,4                    | 48,9               | 48,5               | 48,3               | 48,2              | 52,2               | 47,8                          |
| 3    | 42,1                    | 49,6               | 49,0               | 48,8               | 48,6              | 53,1               | 48,1                          |
| 4    | 44,1                    | 50,1               | 49,4               | 49,1               | 48,9              | 54,1               | 48,3                          |
| 5    | 46,2                    | 50,6               | 49,8               | 49,4               | 49,2              | 55,5               | 48,5                          |
| 6    | 48,5                    | 51,6               | 50,2               | 49,7               | 49,4              | 56,8               | 48,6                          |
| 7    | 50,9                    | 52,5               | 50,6               | 50,0               | 49,7              | 57,9               | 48,8                          |
| 8    | 53,3                    | 53,3               | 51,1               | 50,3               | 49,9              | 58,8               | 48,9                          |
| 9    | 55,6                    | 54,1               | 51,8               | 50,6               | 50,2              | 59,6               | 49,1                          |
| 10   | 57,8                    | 54,8               | 52,4               | 51,0               | 50,4              | 60,2               | 49,2                          |
| 11   | 60,0                    | 55,4               | 53,0               | 51,5               | 50,6              | 61,0               | 49,3                          |
| 12   | 62,1                    | 56,0               | 53,5               | 52,0               | 51,0              | 61,6               | 49,5                          |
| 13   | 64,1                    | 56,6               | 54,0               | 52,5               | 51,4              | 62,1               | 49,6                          |
| 14   | 65,9                    | 57,0               | 54,5               | 52,9               | 51,8              | 62,5               | 49,7                          |
| 15   | 67,7                    | 57,9               | 54,9               | 53,3               | 52,2              | 62,7               | 49,8                          |
| 16   | 69,3                    | 58,5               | 55,3               | 53,7               | 52,5              | 62,9               | 49,9                          |
| 17   | 70,9                    | 59,1               | 55,7               | 54,1               | 52,9              | 62,9               | 50,0                          |
| 18   | 72,3                    | 59,6               | 56,1               | 54,4               | 53,2              | 62,9               | 50,1                          |
| 19   | 73,6                    | 60,1               | 56,4               | 54,7               | 53,5              | 62,9               | 50,2                          |
| 20   | 74,8                    | 60,5               | 56,7               | 55,0               | 53,8              | 62,6               | 50,3                          |
| 21   | 76,0                    | 60,9               | 57,2               | 55,3               | 54,0              | 62,4               | 50,4                          |
| 22   | 77,0                    | 61,3               | 57,6               | 55,6               | 54,3              | 62,0               | 50,4                          |
| 23   | 78,0                    | 61,7               | 58,0               | 55,8               | 54,5              | 61,6               | 50,5                          |
| 24   | 78,8                    | 62,0               | 58,3               | 56,0               | 54,7              | 61,2               | 50,6                          |
| 25   | 79,6                    | 62,3               | 58,7               | 56,3               | 54,9              | 60,6               | 50,6                          |
| 26   | 80,4                    | 62,5               | 59,0               | 56,5               | 55,1              | 60,0               | 50,8                          |
| 27   | 81,1                    | 62,8               | 59,3               | 56,6               | 55,3              | 59,7               | 50,9                          |

Tabela 4-9 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m)

(conclusão)

| Pav. | SAP 2000 Clássico | TQS MULAXI 1 | TQS MULAXI 2 | TQS MULAXI 3 | TQS MULAXI 4 | TQS Incremental | TQS Padrão MULAXI 10 |
|------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|
| 28   | 81,7              | 63,0         | 59,5         | 56,8         | 55,4         | 59,2            | 51,0                 |
| 29   | 82,3              | 63,2         | 59,8         | 57,1         | 55,6         | 58,6            | 51,1                 |
| 30   | 82,8              | 63,4         | 60,0         | 57,3         | 55,7         | 58,0            | 51,2                 |
| 31   | 83,3              | 63,5         | 60,2         | 57,5         | 55,8         | 57,3            | 51,3                 |
| 32   | 83,7              | 63,7         | 60,4         | 57,7         | 56,0         | 56,6            | 51,4                 |
| 33   | 84,1              | 63,8         | 60,5         | 57,8         | 56,1         | 55,8            | 51,5                 |
| 34   | 84,4              | 64,0         | 60,7         | 58,0         | 56,1         | 54,9            | 51,5                 |
| 35   | 84,8              | 64,1         | 60,8         | 58,1         | 56,2         | 54,0            | 51,6                 |
| 36   | 85,1              | 64,2         | 60,9         | 58,2         | 56,3         | 53,5            | 51,6                 |
| 37   | 85,4              | 64,3         | 61,0         | 58,3         | 56,3         | 53,0            | 51,6                 |
| 38   | 85,5              | 64,4         | 61,1         | 58,4         | 56,5         | 52,4            | 51,7                 |
| 39   | 87,1              | 64,2         | 60,9         | 58,2         | 56,0         | 51,7            | 51,3                 |
| 40   | 79,7              | 68,5         | 65,8         | 63,6         | 61,9         | 54,3            | 57,5                 |

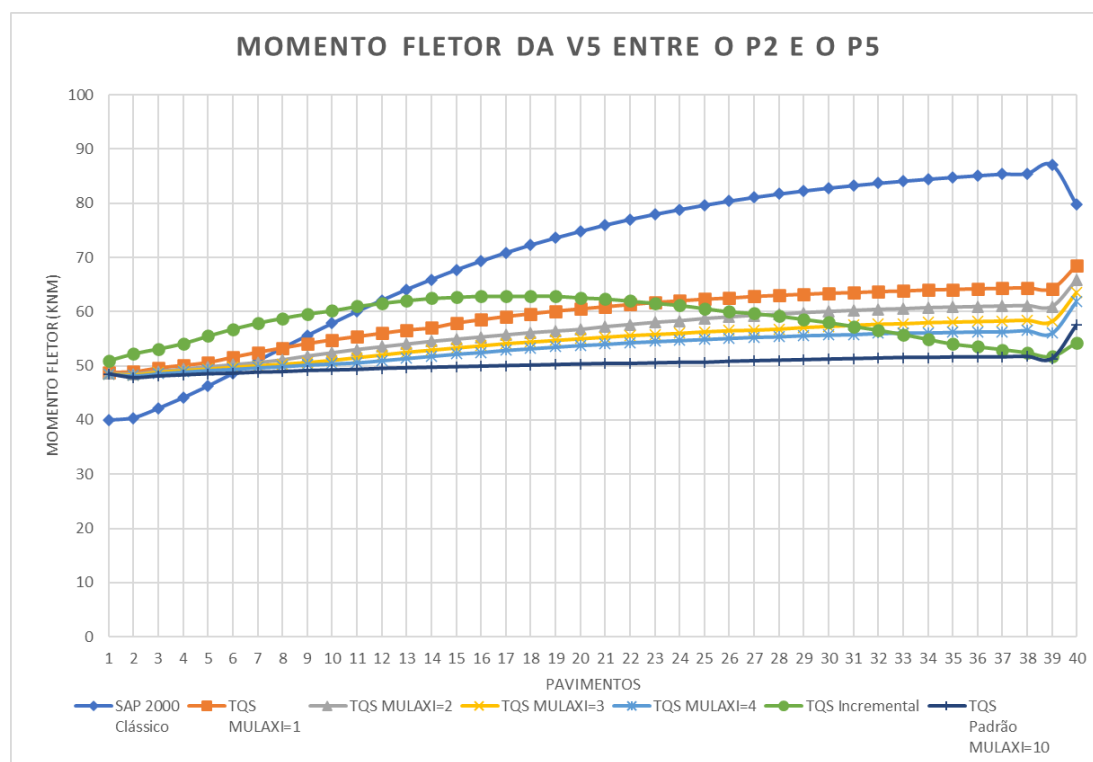


Figura 4-11 – Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.

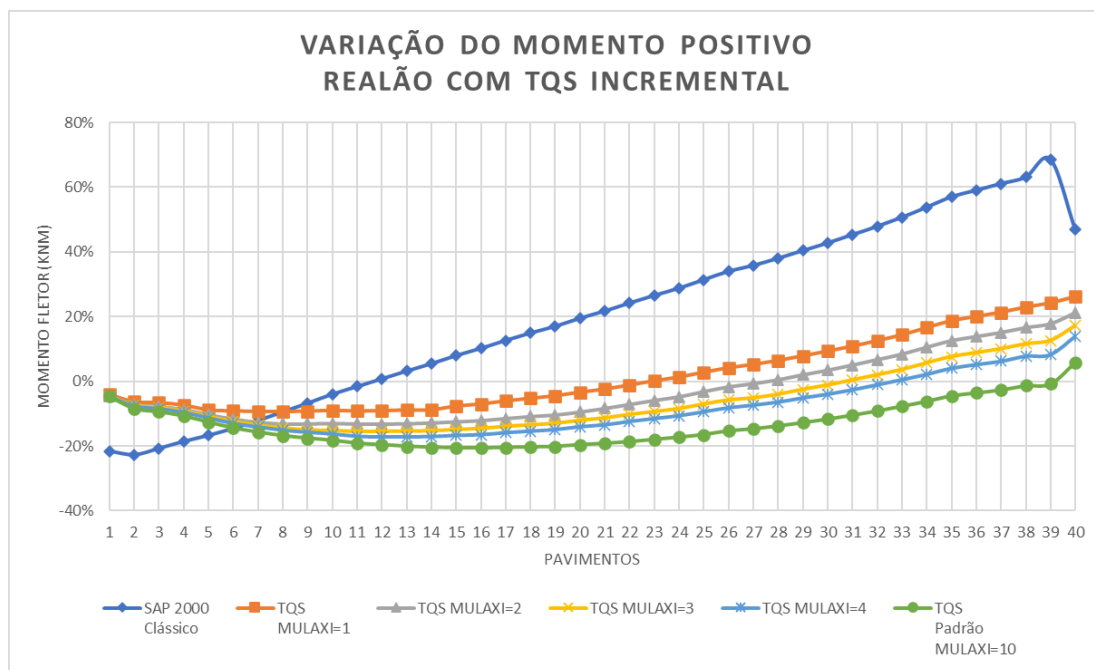


Figura 4-12 – Variação do Momento Fletor da viga V5 no meio do vão em relação com o TQS Incremental do EDIF 15.

De maneira semelhante ao verificado no EDIF 15, os momentos fletores positivos obtidos dos modelos com aumento de rigidez dos pilares apresentam valores menores do que os determinados da análise incremental. Ao utilizar os parâmetros padrão do programa, chega-se a diferença de até 21% nos pavimentos intermediários. Essa diferença significativa propõe um possível risco na utilização dos valores padrão, pois a redução excessiva dos momentos fletores positivos pode comprometer a segurança estrutural.

Diferentemente dos demais modelos, o SAP 2000, desenvolvido por Lima e Macedo (2014), apresenta uma redução do momento fletor positivo no último pavimento, a qual os autores atribuem a uma pequena distorção nessa região. No entanto, esse resultado diverge do observado no EDIF 15, pois, ao reduzir o momento, modifica a possível causa dessa distorção.

Assim como no caso do EDIF 15, os deslocamentos calculados utilizando o recurso de aumento da seção dos pilares apresentaram resultados muito diferentes da análise incremental. Isso permite concluir que o aumento da rigidez não é aconselhável para a análise dos deslocamentos, pois pode distorcer a interpretação dos comportamentos estruturais reais, conforme exposto nas Tabela 4-10 e Figura 4-13.

Tabela 4-10 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40 (mm)

| Pavimento | SAP<br>2000<br>Clássico | TQS<br>Padrão | TQS<br>Incremental |
|-----------|-------------------------|---------------|--------------------|
| 1         | 1,01                    | 0,90          | 1,40               |
| 2         | 1,93                    | 1,60          | 2,70               |
| 3         | 2,76                    | 2,40          | 3,80               |
| 4         | 3,52                    | 3,00          | 4,70               |
| 5         | 4,21                    | 3,60          | 5,50               |
| 6         | 4,84                    | 4,20          | 6,20               |
| 7         | 5,41                    | 4,60          | 6,80               |
| 8         | 5,92                    | 5,10          | 7,30               |
| 9         | 6,40                    | 5,50          | 7,70               |
| 10        | 6,82                    | 5,90          | 8,00               |
| 11        | 7,21                    | 6,20          | 8,20               |
| 12        | 7,57                    | 6,50          | 8,50               |
| 13        | 7,89                    | 6,80          | 8,60               |
| 14        | 8,18                    | 7,10          | 8,80               |
| 15        | 8,44                    | 7,30          | 8,80               |
| 16        | 8,69                    | 7,50          | 8,90               |
| 17        | 8,91                    | 7,70          | 8,90               |
| 18        | 9,10                    | 7,80          | 8,90               |
| 19        | 9,29                    | 8,00          | 8,80               |
| 20        | 9,45                    | 8,10          | 8,80               |
| 21        | 9,60                    | 8,30          | 8,70               |
| 22        | 9,74                    | 8,50          | 8,60               |
| 23        | 9,86                    | 8,50          | 8,50               |
| 24        | 9,97                    | 8,70          | 8,30               |
| 25        | 10,07                   | 8,80          | 8,10               |
| 26        | 10,17                   | 8,90          | 8,00               |
| 27        | 10,25                   | 8,90          | 7,60               |
| 28        | 10,33                   | 9,00          | 7,40               |
| 29        | 10,40                   | 9,10          | 7,10               |
| 30        | 10,46                   | 9,10          | 6,80               |
| 31        | 10,52                   | 9,10          | 6,40               |
| 32        | 10,57                   | 9,20          | 6,10               |
| 33        | 10,62                   | 9,30          | 5,60               |
| 34        | 10,66                   | 9,30          | 5,10               |
| 35        | 10,70                   | 9,30          | 4,60               |
| 36        | 10,74                   | 9,30          | 4,00               |
| 37        | 10,77                   | 9,40          | 3,40               |
| 38        | 10,80                   | 9,40          | 2,70               |
| 39        | 10,83                   | 9,50          | 1,90               |
| 40        | 10,85                   | 9,50          | 1,10               |

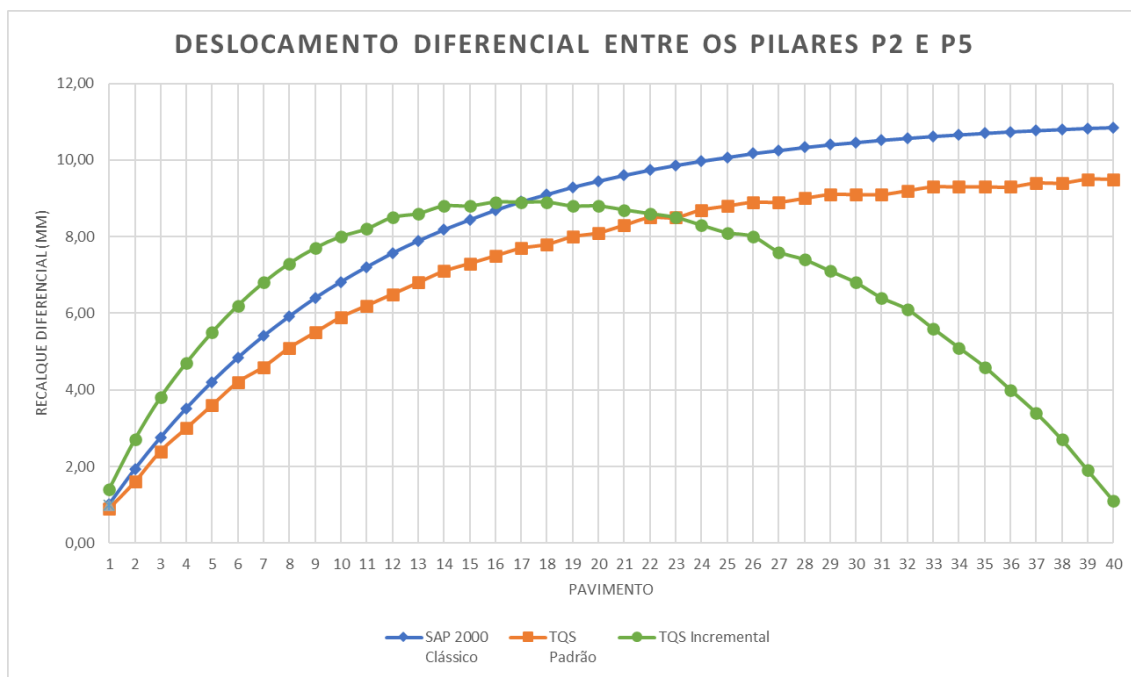


Figura 4-13 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40.

Os resultados corroboram com a análise de deformação descrita no subitem 2.4 deste trabalho, indicando que a análise incremental considera deformações máximas nos andares intermediários, enquanto a análise em uma única etapa tende a produzir deslocamentos crescentes com o aumento do número de pavimentos.

A Tabela 4-11, a Figura 4-14 e a Figura 4-15 mostram as reações verticais calculadas a partir dos diversos modelos de análise.

Tabela 4-11 – Resultante nos apoios do EDIF 40 (kN)

| Pilar | ROBOT Clássico | TQS MULAXI 1 | TQS MULAXI 2 | TQS MULAXI 3 | TQS MULAXI 4 | TQS Incremental | TQS Padrão |
|-------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|------------|
| P1    | 3804,1         | 3667,7       | 3447,7       | 3294,3       | 3179         | 3357,3          | 2825,3     |
| P2    | 4238,9         | 4288,2       | 4334,8       | 4372,5       | 4404,2       | 4342,2          | 4517,4     |
| P3    | 3804,1         | 3652,4       | 3435,3       | 3283,8       | 3169,8       | 3344,8          | 2820,0     |
| P4    | 4398,7         | 4482,8       | 4591,7       | 4656,6       | 4697,1       | 4632,0          | 4761,0     |
| P5    | 5109,5         | 5527,8       | 6096,3       | 6503,8       | 6820,3       | 6360,9          | 7879,2     |
| P6    | 4398,7         | 4447,9       | 4551,8       | 4613,5       | 4651,8       | 4593,7          | 4709,6     |
| P7    | 3804,1         | 3643,5       | 3423,9       | 3271,0       | 3156,0       | 3335,1          | 2804,2     |
| P8    | 4238,9         | 4263,6       | 4310,1       | 4347,6       | 4378,9       | 4315,9          | 4490,3     |
| P9    | 3804,1         | 3627,2       | 3409,7       | 3258,1       | 3144,0       | 3319,3          | 2794,2     |
| Soma  | 37601,1        | 37601,1      | 37601,1      | 37601,1      | 37601,1      | 37601,1         | 37601,1    |

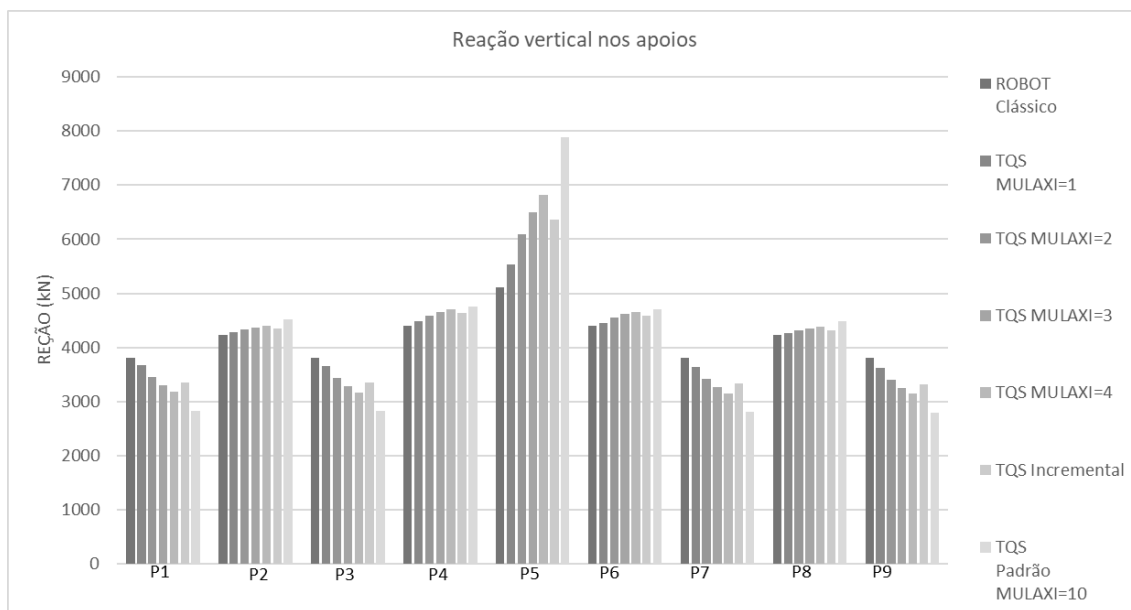


Figura 4-14 – Reações verticais nos apoios do EDIF 40.

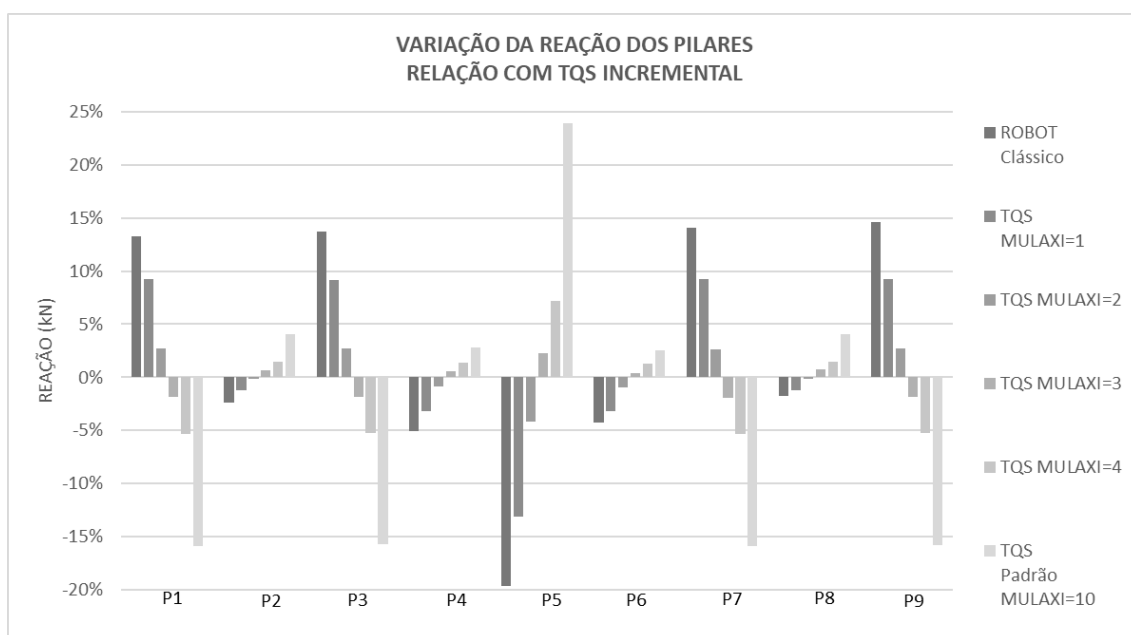


Figura 4-15 – Variação das reações verticais nos apoios do EDIF 40.

Similarmente, ao ser aplicado o TQS com atributos padrão, as reações saí majoradas em consideração à análise incremental do TQS, em 24% no pilar central. As reações também se mostram próximas daquelas obtidas da análise incremental com variação próxima a 2% no modelo com MULAXI igual a 3,0.

Diante das considerações apresentadas, torna-se evidente que a simples manipulação do valor do MULAXI no TQS não é suficiente para garantir resultados coerentes, especialmente quando se trata da rigidez global da estrutura. A necessidade de adaptar o coeficiente MULAXI de acordo com o pavimento analisado destaca a importância de uma abordagem mais detalhada e personalizada na análise estrutural.

#### **4.2. Comparação entre os modelos EDIF 15**

A Figura 4.1 ilustra, em perspectiva, o modelo estrutural do EDIF15 no programa TQS.



Figura 4-16 – Modelo 3D do EDIF15 fornecido pelo programa TQS.

Para fins de comparação entre os resultados obtidos das análises do TQS e do SAP2000, é apresentada a Tabela 4.2 contendo os momentos fletores da viga V5, na proximidade do apoio central (P5). Os resultados obtidos pelo TQS foram adicionados às tabelas originais 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 do trabalho de Lima e Macedo (2014).

Tabela 4-12 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15 (kN.m)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B. G. S. (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                                      | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
|           | (Final)                                           | (Final)       | (Final)      | (Final)    | (Final)         |
| 1         | -57,2                                             | -56,9         | -53,5        | -87,0      | -80,5           |
| 2         | -48,0                                             | -47,1         | -44,7        | -84,6      | -71,9           |
| 3         | -41,5                                             | -39,2         | -37,9        | -83,6      | -64,8           |
| 4         | -35,7                                             | -33,4         | -32,3        | -82,5      | -59,4           |
| 5         | -30,6                                             | -29,4         | -28,8        | -81,6      | -55,5           |
| 6         | -26,3                                             | -27,1         | -26,7        | -80,7      | -53,1           |
| 7         | -22,5                                             | -26,2         | -26,0        | -79,9      | -52,0           |
| 8         | -19,3                                             | -26,6         | -26,4        | -79,2      | -52,2           |
| 9         | -16,6                                             | -28,2         | -28,0        | -78,6      | -53,6           |
| 10        | -14,3                                             | -30,9         | -30,7        | -78,1      | -56,0           |
| 11        | -12,4                                             | -34,7         | -34,3        | -77,7      | -59,6           |
| 12        | -10,8                                             | -39,5         | -38,9        | -77,2      | -64,2           |
| 13        | -9,9                                              | -45,6         | -44,7        | -77,1      | -69,9           |
| 14        | -7,1                                              | -52,5         | -50,6        | -76,2      | -76,5           |
| 15        | -19,7                                             | -63,6         | -63,0        | -84,5      | -88,4           |

A Figura 4.2 amplia o diagrama de momentos fletores na região do apoio central da viga V5, no 11º pavimento do TQS padrão.

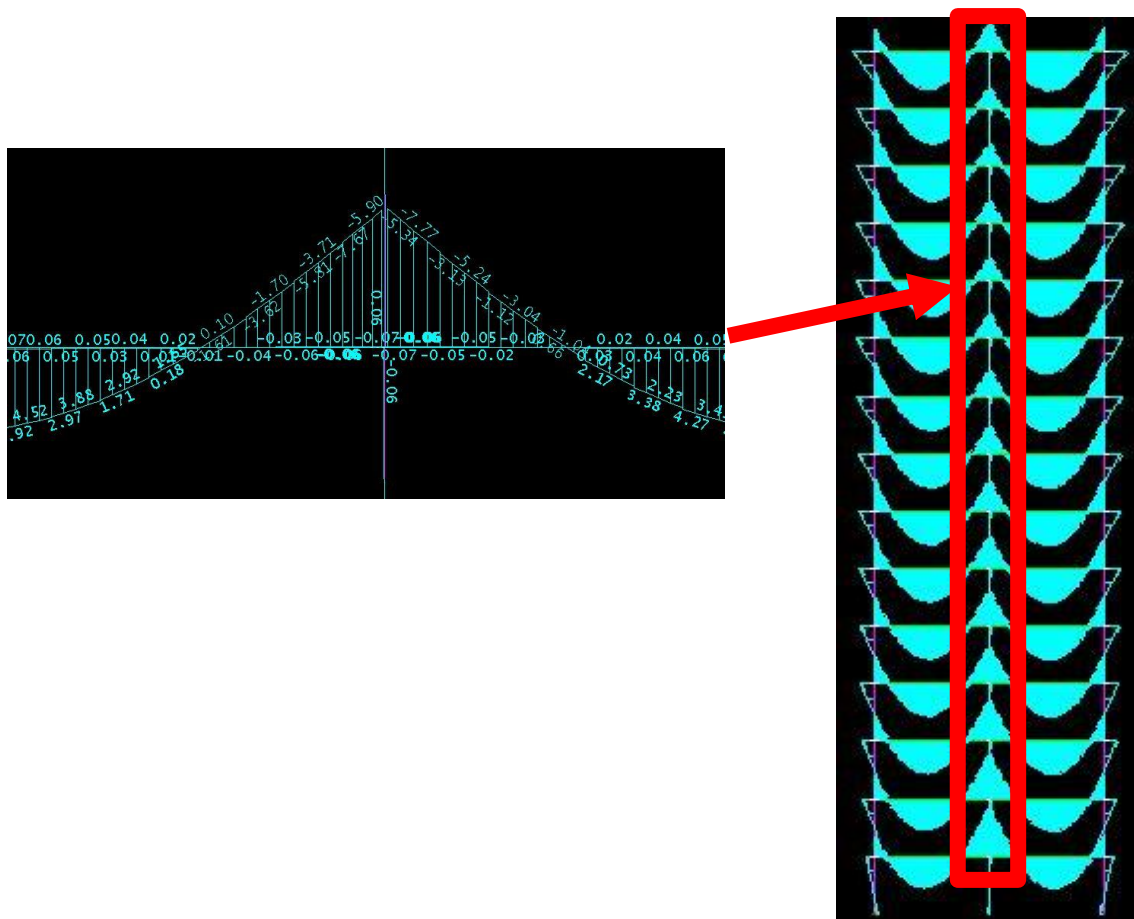


Figura 4-17 – Diagrama de momento fletor da viga V5 em tf.m próximo ao P5 do EDIF 15.

A partir dos dados da Tabela 4-12, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 4-18, que ilustra os momentos fletores negativos da viga V5, próximo ao pilar central P5. A análise detalhada dos resultados, por meio dessa representação gráfica, permite identificar variações significativas nos modelos desenvolvidos nos programas TQS e SAP2000.

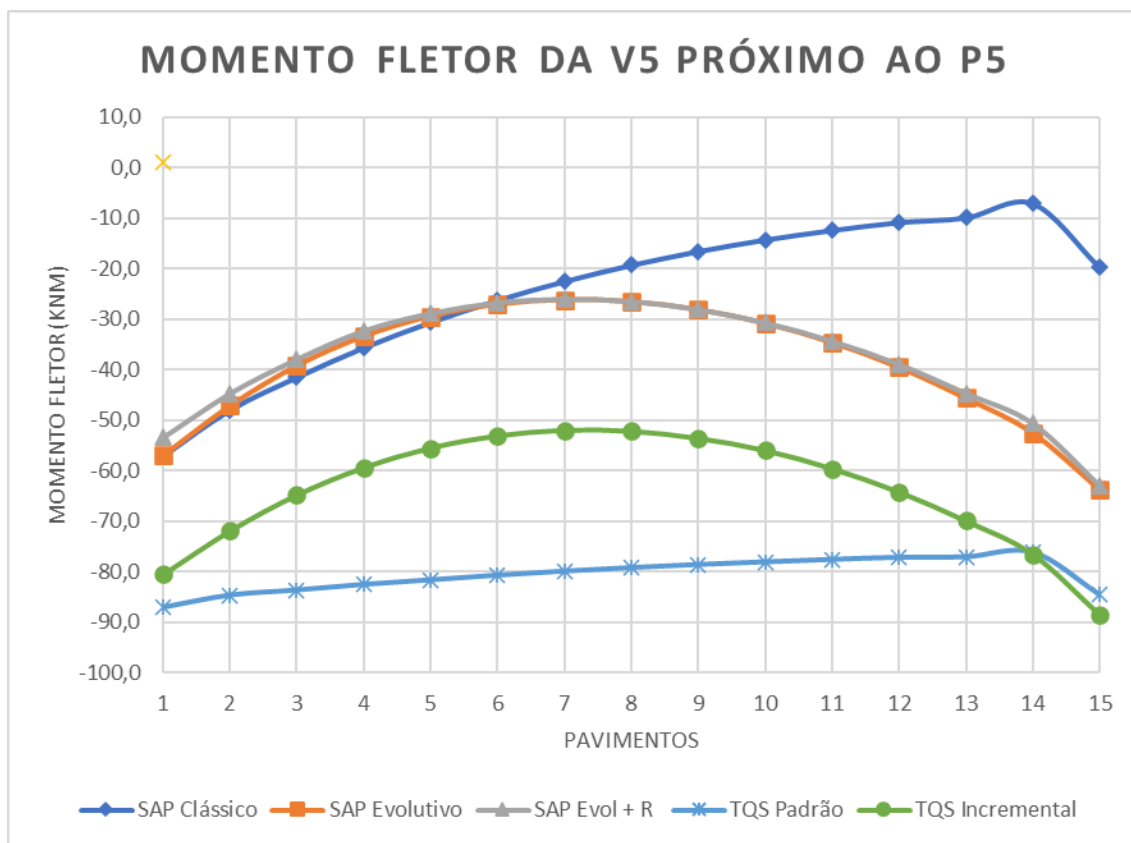


Figura 4-18 – Momento Fletor da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.

Observa-se que as respostas do modelo TQS Padrão, com valores absolutos superiores, apresentam comportamento semelhante às do SAP Clássico, com redução dos momentos fletores à medida que o número de pavimentos aumenta. O modelo incremental do TQS, por sua vez, apresenta comportamento similar ao do SAP Evolutivo nos pavimentos intermediários, destacando-se, contudo, por resultados mais conservadores.

É relevante destacar que os dados apresentados no estudo de Lima e Macedo (2014) indicam que os momentos fletores máximos observados nas fases intermediárias do processo de construção são significativamente superiores aos valores registrados na etapa final. O mesmo comportamento é verificado quando comparado aos resultados obtidos na análise realizada com o TQS incremental. No entanto, esse caso não foi apresentado, pois considera premissas distintas das adotadas no presente trabalho.

A Tabela 4-13 resume os momentos fletores no meio do vão da viga V5, entre os apoios P2 e P5.

Tabela 4-13 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 15 (kN.m)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B.<br>G. S. (2014) |                  |                 | TQS        |                    |
|-----------|------------------------------------------------------|------------------|-----------------|------------|--------------------|
|           | SAP<br>Clássico                                      | SAP<br>Evolutivo | SAP Evol +<br>R | TQS Padrão | TQS<br>Incremental |
|           | (Final)                                              | (Final)          | (Final)         | (Final)    | (Final)            |
| 1         | 39,9                                                 | 42,0             | 39,9            | 48,6       | 50,6               |
| 2         | 39,4                                                 | 42,6             | 41,3            | 47,8       | 51,5               |
| 3         | 39,8                                                 | 42,8             | 41,5            | 47,9       | 52,1               |
| 4         | 40,0                                                 | 43,1             | 41,7            | 47,9       | 52,6               |
| 5         | 40,2                                                 | 43,2             | 41,8            | 48,0       | 52,9               |
| 6         | 40,4                                                 | 43,4             | 41,9            | 48,1       | 53,1               |
| 7         | 40,6                                                 | 43,4             | 42,0            | 48,1       | 53,2               |
| 8         | 40,7                                                 | 43,5             | 42,0            | 48,2       | 53,2               |
| 9         | 40,9                                                 | 43,5             | 42,0            | 48,2       | 53,2               |
| 10        | 41,0                                                 | 43,4             | 41,9            | 48,3       | 53,0               |
| 11        | 41,1                                                 | 43,3             | 41,8            | 48,3       | 52,7               |
| 12        | 41,1                                                 | 43,2             | 41,7            | 48,3       | 52,4               |
| 13        | 41,3                                                 | 43,0             | 41,6            | 48,4       | 52,0               |
| 14        | 40,4                                                 | 42,6             | 41,1            | 48,0       | 51,4               |
| 15        | 46,7                                                 | 43,7             | 43,1            | 53,3       | 54,3               |

A Figura 4-19 amplia o diagrama de momentos fletores na região do vão da viga V5 no 14º pavimento do modelo TQS incremental. Nota-se, nesta figura que os maiores momentos fletores acontecem nos pavimentos localizados a meia altura da edificação.

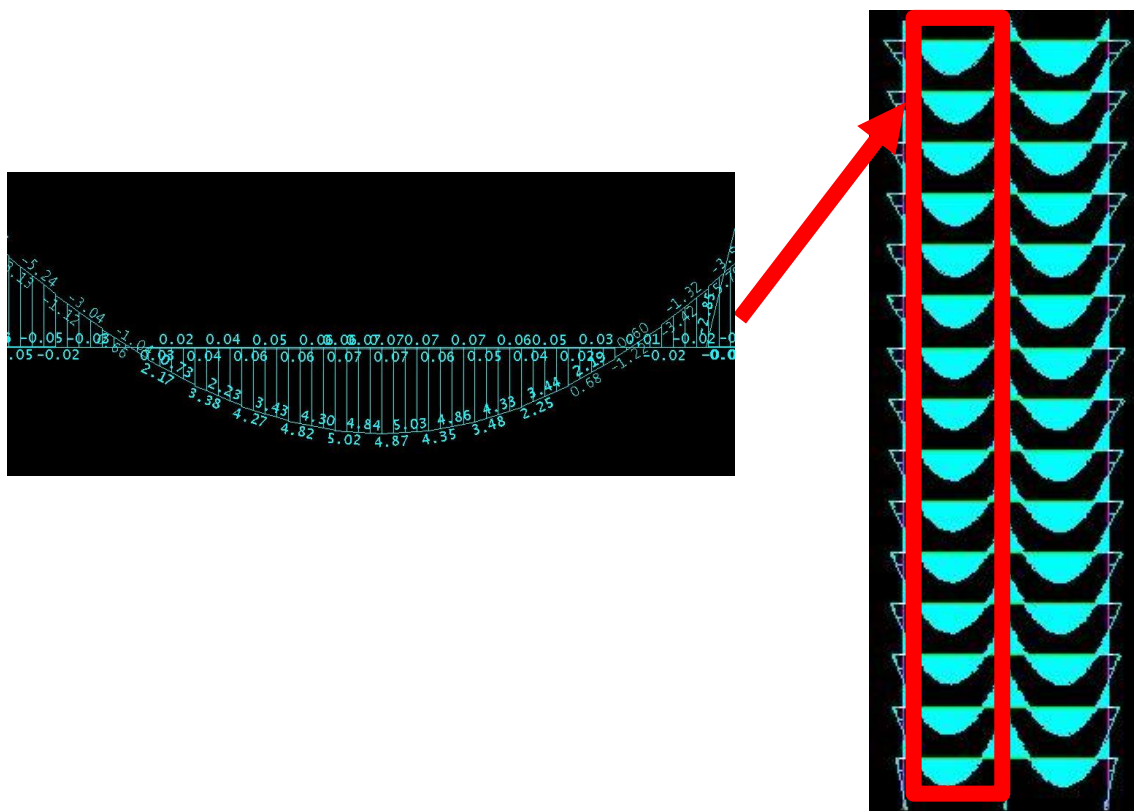


Figura 4-19 – Diagrama dos momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 15.

De forma similar ao que foi previamente exemplificado, a partir dos dados da Tabela 4-13, foi gerado o gráfico destacado na Figura 4-20. Esse gráfico ilustra os momentos fletores positivos na viga V5, na seção do meio do vão entre os pilares P2 e P5, obtidos dos diversos modelos de análise. Observa-se que os momentos fletores calculados pelo TQS são, de maneira geral, mais elevados, indicando uma abordagem mais conservadora na análise estrutural.

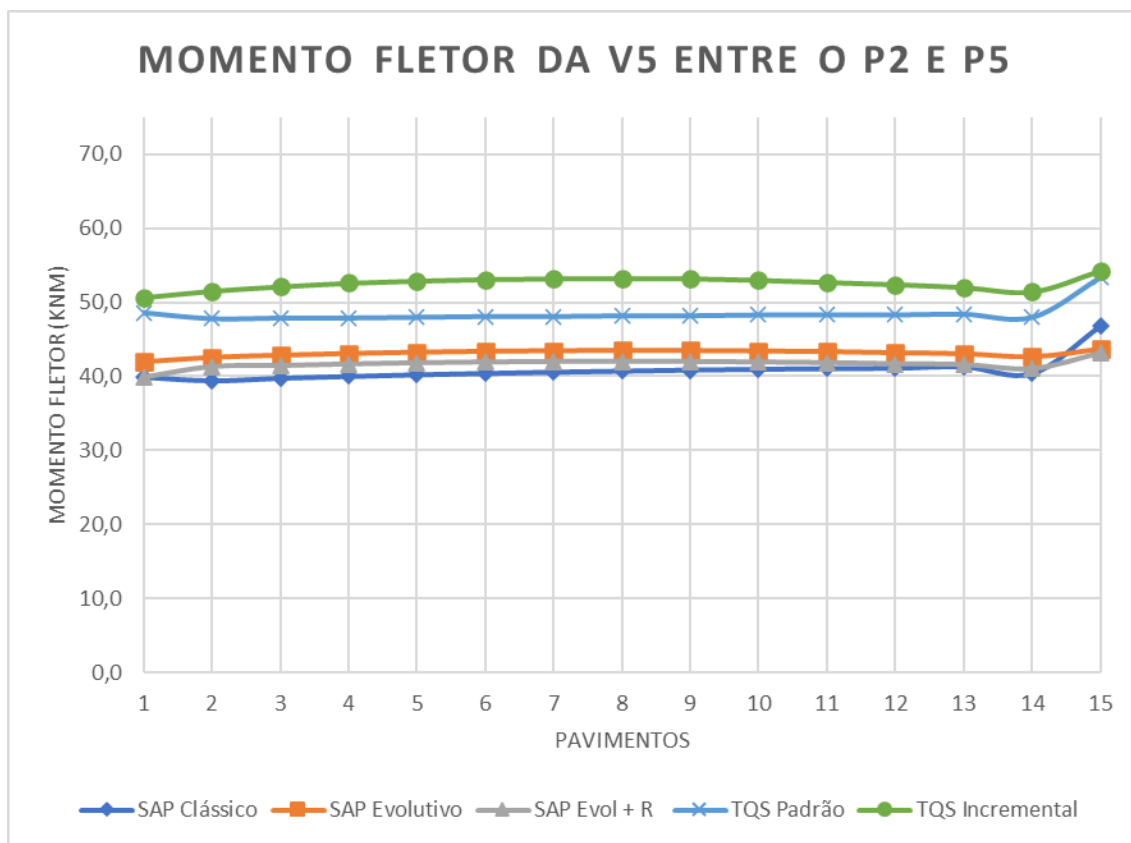


Figura 4-20 – Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 15.

Com o intuito do aprofundamento do estudo, procedeu-se à análise dos deslocamentos diferenciais que ocorrem entre os apoios P2 e P5. Esses deslocamentos são resumidos na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15 (mm)

(continua)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 1         | 0,84                            | 0,89          | 0,61         | 0,90       | 1,10            |
| 2         | 1,59                            | 1,61          | 1,14         | 1,80       | 1,90            |
| 3         | 2,05                            | 2,16          | 1,6          | 2,60       | 2,60            |
| 4         | 2,46                            | 2,56          | 2            | 3,20       | 3,10            |
| 5         | 2,71                            | 2,84          | 2,35         | 3,80       | 3,50            |
| 6         | 2,88                            | 3,01          | 2,65         | 4,40       | 3,70            |
| 7         | 2,94                            | 3,08          | 2,91         | 4,90       | 3,90            |
| 8         | 2,93                            | 3,06          | 3,13         | 5,30       | 3,90            |
| 9         | 2,83                            | 2,95          | 3,32         | 5,70       | 3,80            |
| 10        | 2,67                            | 2,77          | 3,48         | 6,00       | 3,50            |

Tabela 4-14 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15 (mm)

(conclusão)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 11        | 2,43                            | 2,51          | 3,62         | 6,20       | 3,20            |
| 12        | 2,12                            | 2,18          | 3,72         | 6,40       | 2,80            |
| 13        | 1,74                            | 1,77          | 3,81         | 6,60       | 2,30            |
| 14        | 1,27                            | 1,27          | 3,87         | 6,70       | 1,70            |
| 15        | 0,72                            | 0,69          | 3,91         | 6,70       | 0,90            |

A Figura 4-21 ilustra, de forma ampliada, os deslocamentos relativos entre os pilares P2 e P5 do 15º pavimento do modelo TQS Padrão. Nota-se que os deslocamentos relativos são maiores nos pavimentos superiores.

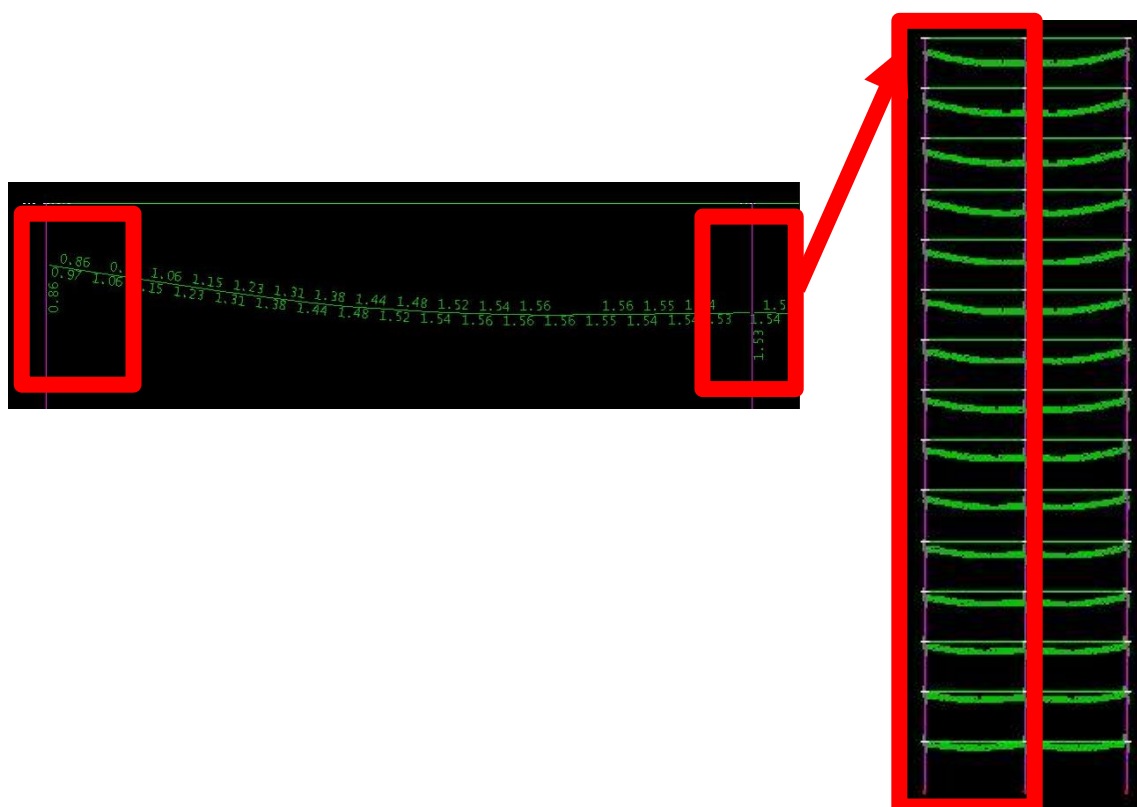


Figura 4-21 – Gráfico dos deslocamentos diferenciais em cm entre P2 e P5 do EDIF 15.

A Figura 4-22 ilustra os deslocamentos diferenciais, entre os pilares P2 e P5 do EDIF 15, obtidos a partir dos diversos modelos estruturais.

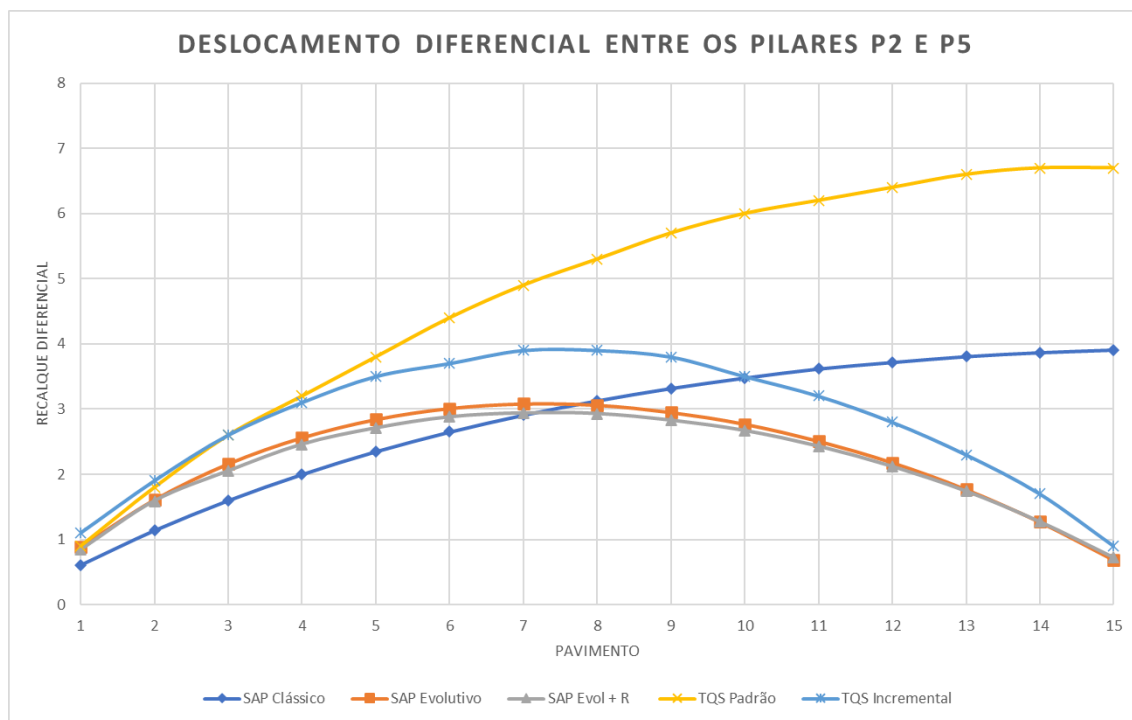


Figura 4-22 – Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 15.

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 4-22, pode-se inferir que, como previsto, o TQS Padrão e o SAP Clássico não apresentam deslocamentos que correspondam ao comportamento de edificações construídas em múltiplas etapas. No entanto, ao se empregar a análise incremental do TQS, revela-se uma tendência de comportamento muito similar àquela observada no resultado do SAP 2000, refletindo de maneira mais realística do processo construtivo.

A Tabela 4-15 apresenta as cargas nos pilares P2, P5 e P8 obtidas a partir dos modelos de análise

Tabela 4-15 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15 (kN)

| PILAR | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|       | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
|       | (Final)                         | (Final)       | (Final)      | (Final)    | (Final)         |
| P2    | 1655,2                          | 1687,5        | 1689,7       | 1743,4     | 1700,7          |
| P5    | 2501,7                          | 2931,7        | 2872,6       | 3521,9     | 3172,8          |
| P8    | 1655,2                          | 1687,5        | 1689,7       | 1731,4     | 1689,1          |

A Figura 4-23 ilustra as forças resultantes nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF15 obtidas do modelo TQS Padrão.

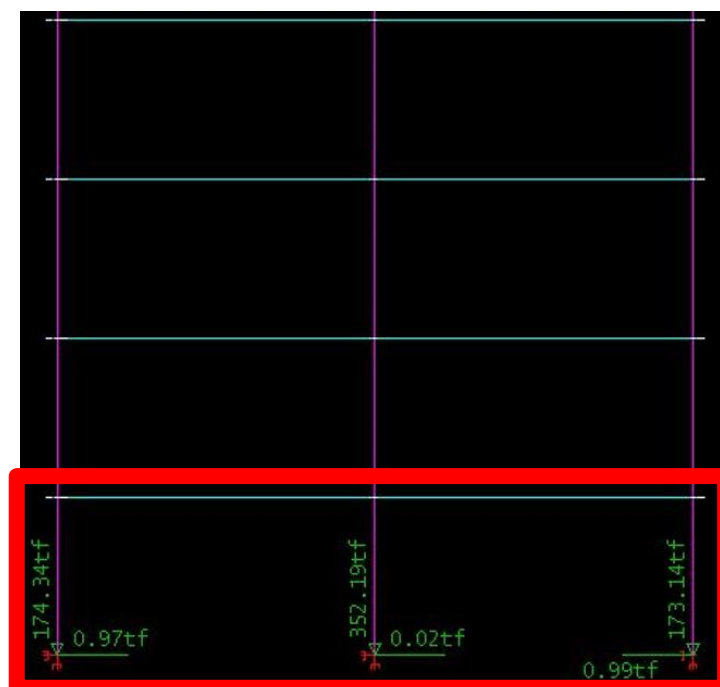


Figura 4-23 – Diagrama resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15.

A partir dos resultados obtidos, foi gerado o gráfico da Figura 4-24 que permite observar como o programa TQS, ao utilizar a ferramenta MULAXI, o modelo TQS Padrão adota uma abordagem que superestima as cargas sobre o pilar central. No entanto, alcança-se um resultado aproximado entre a análise realizada pelo SAP2000 e pelo TQS ao se empregar a técnica de análise incremental.

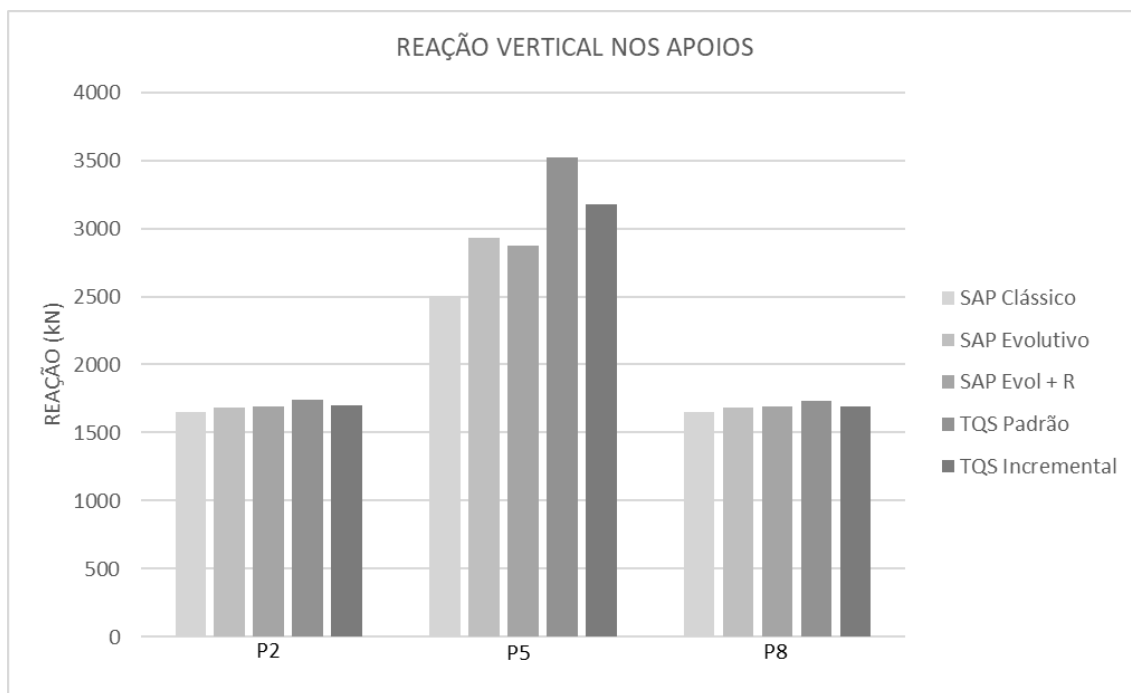


Figura 4-24 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15.

#### 4.3. Comparação entre os modelos EDIF 40

Para realizar uma comparação detalhada entre os modelos estruturais gerados pelo TQS e pelo SAP2000, utilizou-se o modelo EDIF40, conforme apresentado na Figura 4-25.



Figura 4-25 – Modelo 3D do EDIF40 fornecido pelo programa TQS.

Assim como na análise do EDIF15, foram elaboradas tabelas que contemplam os momentos fletores positivos e negativos na viga V5, os deslocamentos diferenciais entre os pilares P2 e P5 e as reações de apoio dos pilares P2, P5 e P8. Os resultados obtidos por meio das análises conduzidas no TQS foram integrados às tabelas originais do estudo de Lima e Macedo (2014) com o objetivo de o complementar, ampliando a comparação entre os dois programas.

A Tabela 4-16 contendo os momentos fletores da viga V5 na proximidade do apoio central P5 em conjunto com os resultados obtidos por Lima e Macedo (2014).

Tabela 4-16 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m)

(continua)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B. G. S.<br>(2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|------------------------------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                                         | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 1         | -64,2                                                | -60,2         | -55,9        | -85,8      | -76,4           |
| 2         | -50,4                                                | -41,7         | -38,8        | -82,2      | -63,6           |
| 3         | -39,2                                                | -24,7         | -22,6        | -80,0      | -52,3           |
| 4         | -28,9                                                | -10,1         | -8,5         | -77,7      | -42,5           |
| 5         | -19,6                                                | 2,5           | 3,5          | -75,6      | -34,1           |
| 6         | -11,1                                                | 13,2          | 13,7         | -73,5      | -27,0           |
| 7         | -3,4                                                 | 22,3          | 22,3         | -71,5      | -21,0           |
| 8         | 3,6                                                  | 29,8          | 29,5         | -69,5      | -16,0           |
| 9         | 10,0                                                 | 36,1          | 35,3         | -67,7      | -11,8           |
| 10        | 15,8                                                 | 41,1          | 40,1         | -65,9      | -8,4            |
| 11        | 21,0                                                 | 45,2          | 44,0         | -64,2      | -5,6            |
| 12        | 25,8                                                 | 48,4          | 47,0         | -62,6      | -3,4            |
| 13        | 30,2                                                 | 50,9          | 49,2         | -61,0      | -1,7            |
| 14        | 34,1                                                 | 52,6          | 50,8         | -59,5      | -0,4            |
| 15        | 37,7                                                 | 53,8          | 51,8         | -58,1      | 0,0             |
| 16        | 41,0                                                 | 54,4          | 52,4         | -56,7      | 0,0             |
| 17        | 44,0                                                 | 54,5          | 52,4         | -55,4      | 0,0             |
| 18        | 46,7                                                 | 54,2          | 51,8         | -54,2      | 0,0             |
| 19        | 49,1                                                 | 53,5          | 53,1         | -53,0      | 0,0             |
| 20        | 51,3                                                 | 52,5          | 51,3         | -51,9      | 0,0             |
| 21        | 53,4                                                 | 51,0          | 48,9         | -50,9      | -1,0            |
| 22        | 55,2                                                 | 49,2          | 47,2         | -49,9      | -2,2            |
| 23        | 56,9                                                 | 47,1          | 45,0         | -48,9      | -3,6            |
| 24        | 58,4                                                 | 44,6          | 42,5         | -48,1      | -5,3            |
| 25        | 59,8                                                 | 41,7          | 39,7         | -47,2      | -7,3            |
| 26        | 61,0                                                 | 38,4          | 36,4         | -46,5      | -9,5            |
| 27        | 62,2                                                 | 34,8          | 32,8         | -45,8      | -12,0           |
| 28        | 63,2                                                 | 30,7          | 28,7         | -45,1      | -14,8           |
| 29        | 64,2                                                 | 26,1          | 24,2         | -44,5      | -17,9           |
| 30        | 65,0                                                 | 21,0          | 19,2         | -43,9      | -21,4           |
| 31        | 65,8                                                 | 15,4          | 13,7         | -43,4      | -25,2           |
| 32        | 66,5                                                 | 9,2           | 7,6          | -43,0      | -29,5           |
| 33        | 67,2                                                 | 2,3           | 0,9          | -42,5      | -34,2           |
| 34        | 67,7                                                 | -5,3          | -6,5         | -42,2      | -39,3           |
| 35        | 68,3                                                 | -13,6         | -14,5        | -41,9      | -45,0           |
| 36        | 68,8                                                 | -22,8         | -23,4        | -41,6      | -51,3           |

Tabela 4-16 – Momentos fletores da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40 (kN.m)

(conclusão)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B. G. S.<br>(2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|------------------------------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                                         | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 37        | 69,2                                                 | -33,0         | -33,1        | -41,4      | -58,2           |
| 38        | 69,3                                                 | -44,1         | -43,7        | -41,4      | -65,9           |
| 39        | 73,1                                                 | -56,1         | -54,4        | -40,1      | -74,1           |
| 40        | 47,5                                                 | -72,6         | -72,3        | -53,4      | -87,4           |

A partir dos dados da Tabela 4-16, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 4-26, que ilustra os momentos fletores negativos da viga V5, próximo ao pilar central P5. A análise detalhada dos resultados, por meio dessa representação gráfica, permite identificar variações significativas nos modelos desenvolvidos nos programas TQS e SAP 2000.

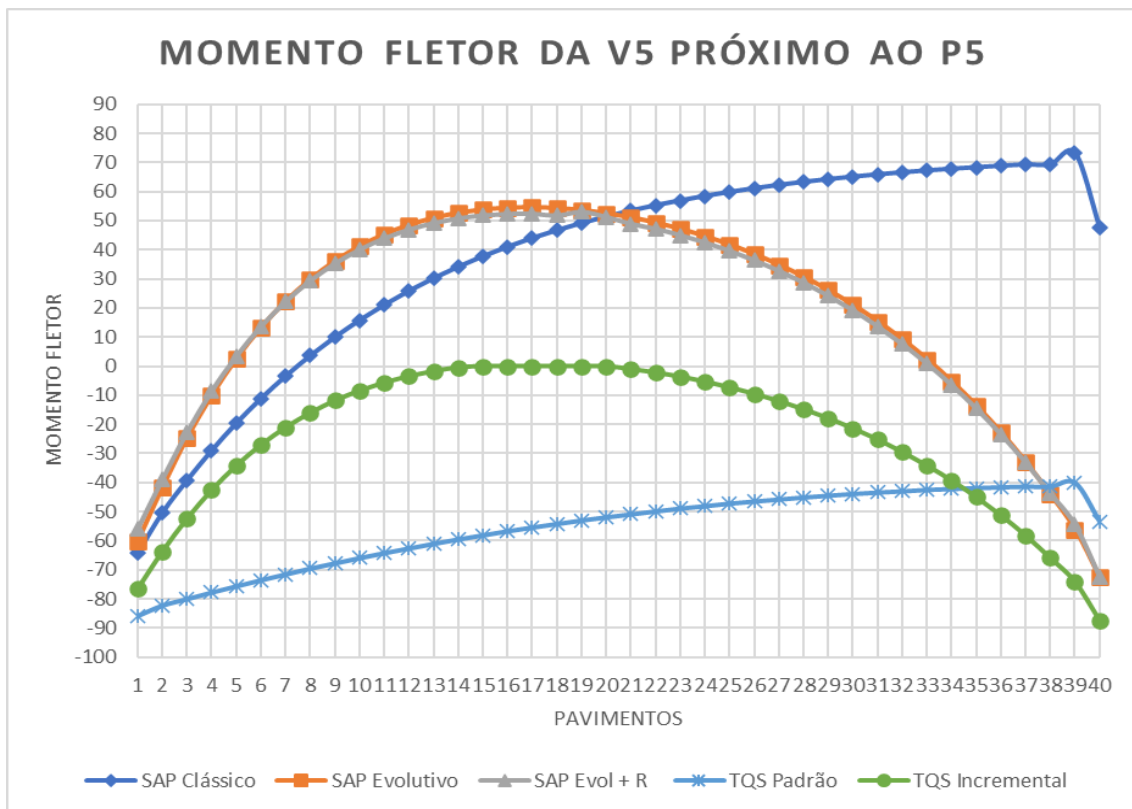


Figura 4-26 – Momento fletor da viga em kN.m V5 próximo ao P5 do EDIF 40.

A Figura 4-27 amplia o diagrama de momentos fletores na região do apoio central da voga V5, no 4º pavimento do TQS Padrão.

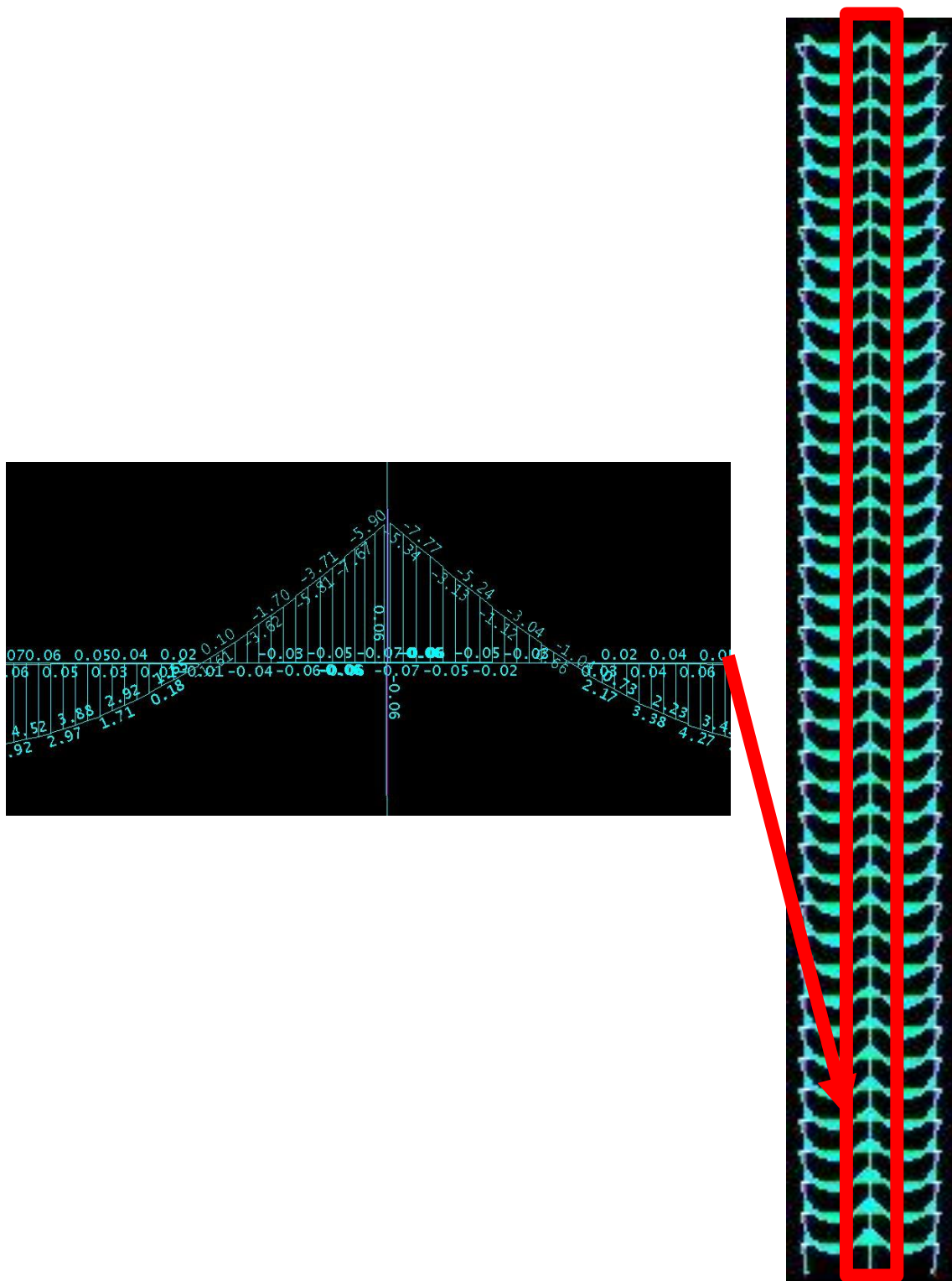


Figura 4-27 – Diagrama do momento fletor em tf.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF

O gráfico ilustrado na Figura 4-26, apresenta os momentos fletores negativos na viga V5, localizado próximo ao pilar central P5. A partir dessa imagem, são observadas variações relevantes nas respostas dos modelos desenvolvidos nos programas TQS e SAP2000.

As respostas do modelo TQS Padrão, embora com valores absolutos maiores, apresentam tendência semelhante ao SAP Clássico, com redução dos momentos fletores a medida que o número de pavimentos aumenta. Quanto ao modelo incremental do TQS, nota-se similaridade com as respostas do SAP Evolutivo, podendo ser observados resultados mais conservadores.

Os resultados obtidos seguem um padrão semelhante ao identificado anteriormente no EDIF 15. No entanto, observa-se a presença de momentos fletores positivos nos andares intermediários no modelo do SAP2000, enquanto o modelo incremental do TQS apresenta momentos fletores nulos. Esse comportamento evidencia que edificações com 40 pavimentos tendem a apresentar resultados mais expressivos, o que pode gerar desafios tanto na modelagem quanto no comportamento estrutural após a construção. Além disso, a consideração de momentos fletores negativos em edifícios muito altos, conforme indicado pela análise de múltiplos passos, pode ser questionável.

A Tabela 4-17 resume os momentos fletores no meio do vão da viga V5, entre os apoios P2 e P5.

Tabela 4-17 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m)

(continua)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B. G. S. (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                                      | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 1         | 39,9                                              | 42,9          | 40,4         | 48,5       | 50,9            |
| 2         | 40,4                                              | 45,4          | 44,1         | 47,8       | 52,2            |
| 3         | 42,1                                              | 48,4          | 47,2         | 48,1       | 53,1            |
| 4         | 44,1                                              | 52,0          | 51,0         | 48,3       | 54,1            |
| 5         | 46,2                                              | 55,9          | 54,8         | 48,5       | 55,5            |
| 6         | 48,5                                              | 59,7          | 58,5         | 48,6       | 56,8            |
| 7         | 50,9                                              | 63,2          | 62,0         | 48,8       | 57,9            |
| 8         | 53,3                                              | 66,5          | 65,1         | 48,9       | 58,8            |
| 9         | 55,6                                              | 69,3          | 67,8         | 49,1       | 59,6            |
| 10        | 57,8                                              | 71,8          | 70,2         | 49,2       | 60,2            |

Tabela 4-17 – Momentos fletores da viga V5 no meio do vão do EDIF 40 (kN.m)

(conclusão)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima S. E. H. e Macedo B. G.<br>S. (2014) |                  |                 | TQS        |                    |
|-----------|------------------------------------------------------|------------------|-----------------|------------|--------------------|
|           | SAP<br>Clássico                                      | SAP<br>Evolutivo | SAP Evol +<br>R | TQS Padrão | TQS<br>Incremental |
| 11        | 60,0                                                 | 73,9             | 72,1            | 49,3       | 61,0               |
| 12        | 62,1                                                 | 75,5             | 73,6            | 49,5       | 61,6               |
| 13        | 64,1                                                 | 76,7             | 74,8            | 49,6       | 62,1               |
| 14        | 65,9                                                 | 77,7             | 75,7            | 49,7       | 62,5               |
| 15        | 67,7                                                 | 78,3             | 76,3            | 49,8       | 62,7               |
| 16        | 69,3                                                 | 78,7             | 76,6            | 49,9       | 62,9               |
| 17        | 70,9                                                 | 78,8             | 76,6            | 50,0       | 62,9               |
| 18        | 72,3                                                 | 78,6             | 76,4            | 50,1       | 62,9               |
| 19        | 73,6                                                 | 78,2             | 76,5            | 50,2       | 62,9               |
| 20        | 74,8                                                 | 77,6             | 76,0            | 50,3       | 62,6               |
| 21        | 76,0                                                 | 76,9             | 74,7            | 50,4       | 62,4               |
| 22        | 77,0                                                 | 75,9             | 73,8            | 50,4       | 62,0               |
| 23        | 78,0                                                 | 74,9             | 72,7            | 50,5       | 61,6               |
| 24        | 78,8                                                 | 73,6             | 71,5            | 50,6       | 61,2               |
| 25        | 79,6                                                 | 72,2             | 70,1            | 50,6       | 60,6               |
| 26        | 80,4                                                 | 70,6             | 68,5            | 50,8       | 60,0               |
| 27        | 81,1                                                 | 68,8             | 66,7            | 50,9       | 59,7               |
| 28        | 81,7                                                 | 67,0             | 64,9            | 51,0       | 59,2               |
| 29        | 82,3                                                 | 65,1             | 63,0            | 51,1       | 58,6               |
| 30        | 82,8                                                 | 62,9             | 60,9            | 51,2       | 58,0               |
| 31        | 83,3                                                 | 60,8             | 58,7            | 51,3       | 57,3               |
| 32        | 83,7                                                 | 58,5             | 56,5            | 51,4       | 56,6               |
| 33        | 84,1                                                 | 56,2             | 54,2            | 51,5       | 55,8               |
| 34        | 84,4                                                 | 53,8             | 51,9            | 51,5       | 54,9               |
| 35        | 84,8                                                 | 51,5             | 49,6            | 51,6       | 54,0               |
| 36        | 85,1                                                 | 49,3             | 47,4            | 51,6       | 53,5               |
| 37        | 85,4                                                 | 47,3             | 45,4            | 51,6       | 53,0               |
| 38        | 85,5                                                 | 45,7             | 43,8            | 51,7       | 52,4               |
| 39        | 87,1                                                 | 44,3             | 42,1            | 51,3       | 51,7               |
| 40        | 79,7                                                 | 45,4             | 44,6            | 57,5       | 54,3               |

A Figura 4-28 amplia o diagrama de momentos fletores na região do vão da viga V5 no 14º pavimento do modelo TQS incremental. Nota-se, nesta figura que os maiores momentos fletores acontecem nos pavimentos localizados a meia altura da edificação.

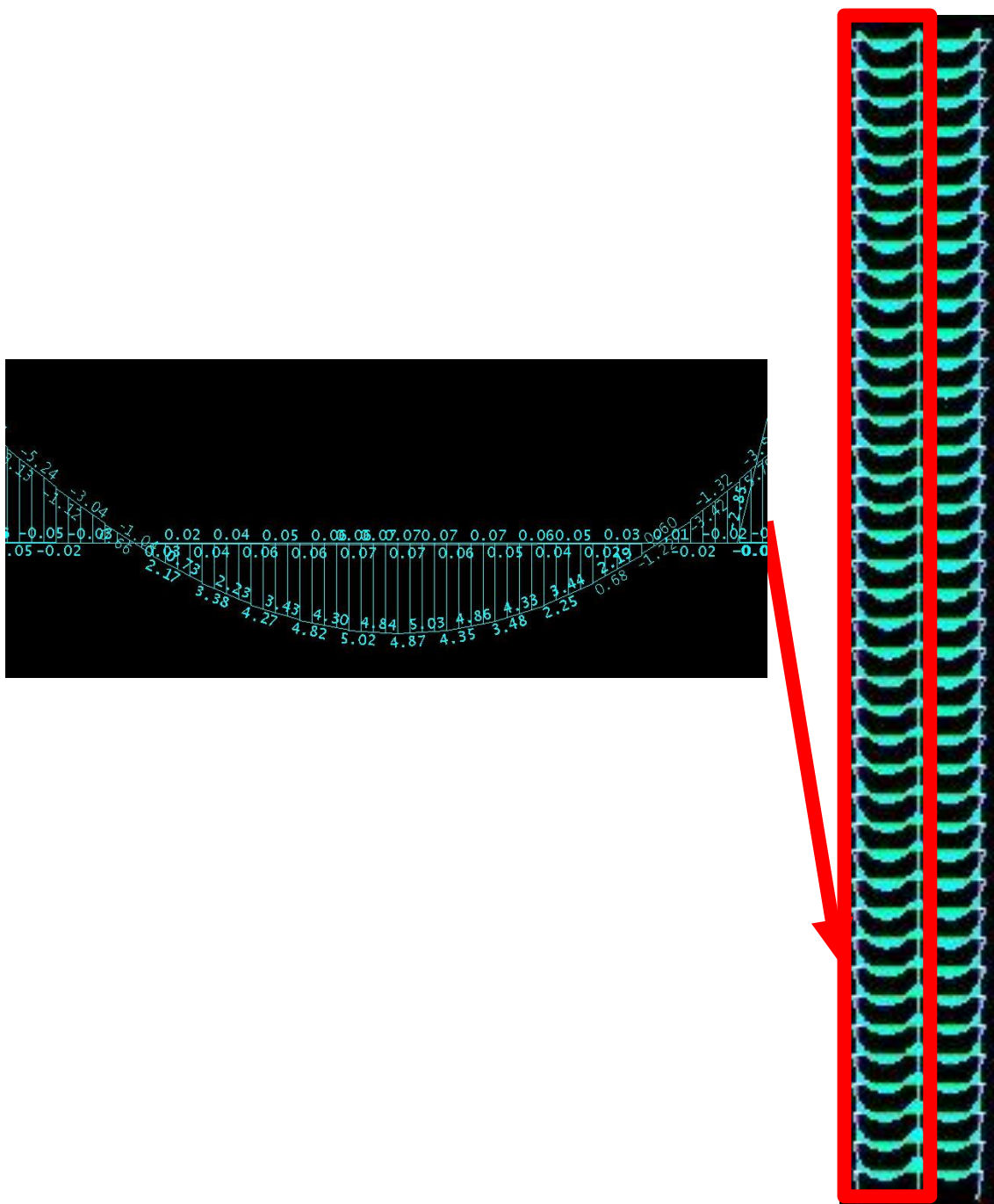


Figura 4-28 – Diagrama dos momentos fletores em tf.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.

De forma semelhante ao previamente exemplificado, a partir dos dados da Tabela 4-17, foi gerado o gráfico destacado na Figura 4-29. A imagem revela os momentos fletores na viga V5, na seção do meio do vão entre os pilares P2 e P5. É possível identificar que os momentos fletores calculados pelo TQS são, frequentemente, menores, propondo uma abordagem menos conservadora na análise estrutural.

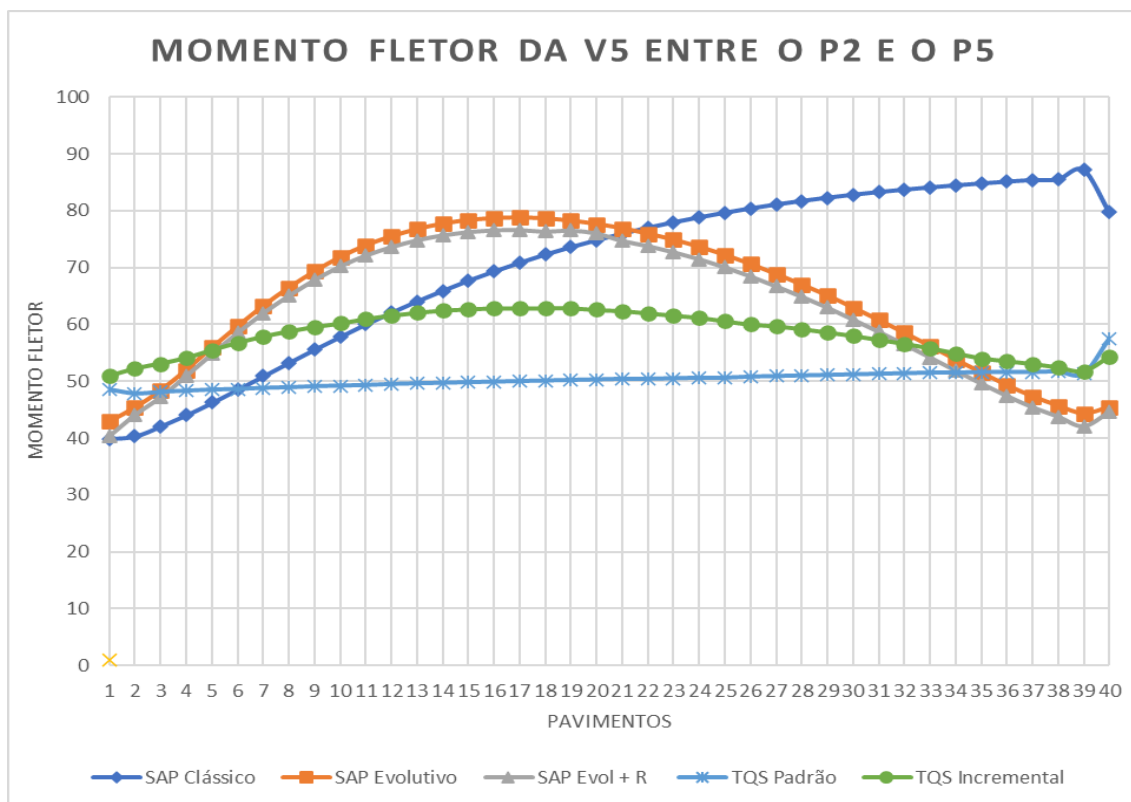


Figura 4-29 – Momento fletor em kN.m da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.

É importante ressaltar que, diferentemente do momento fletor negativo, o momento fletor positivo em modelos de múltiplos passos tende a ser maior nos pavimentos intermediários em comparação aos modelos de passo único.

Com o intuito do aprofundamento do estudo, procedeu-se à análise dos deslocamentos diferenciais que ocorrem entre os apoios P2 e P5. Esses deslocamentos são resumidos na Tabela 4-18.

Tabela 4-18 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40 (mm)

(continua)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 1         | 1,01                            | 1,65          | 1,56         | 0,90       | 1,40            |
| 2         | 1,93                            | 3,10          | 3,00         | 1,60       | 2,70            |
| 3         | 2,76                            | 4,36          | 4,15         | 2,40       | 3,80            |
| 4         | 3,52                            | 5,45          | 5,19         | 3,00       | 4,70            |
| 5         | 4,21                            | 6,39          | 6,07         | 3,60       | 5,50            |
| 6         | 4,84                            | 7,19          | 6,82         | 4,20       | 6,20            |
| 7         | 5,41                            | 7,86          | 7,46         | 4,60       | 6,80            |

Tabela 4-18 – Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40 (mm)

(conclusão)

| Pavimento | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-----------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|           | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
| 8         | 5,92                            | 8,43          | 7,99         | 5,10       | 7,30            |
| 9         | 6,40                            | 8,89          | 8,42         | 5,50       | 7,70            |
| 10        | 6,82                            | 9,28          | 8,78         | 5,90       | 8,00            |
| 11        | 7,21                            | 9,58          | 9,07         | 6,20       | 8,20            |
| 12        | 7,57                            | 9,82          | 9,30         | 6,50       | 8,50            |
| 13        | 7,89                            | 10,00         | 9,47         | 6,80       | 8,60            |
| 14        | 8,18                            | 10,13         | 9,60         | 7,10       | 8,80            |
| 15        | 8,44                            | 10,22         | 9,68         | 7,30       | 8,80            |
| 16        | 8,69                            | 10,27         | 9,73         | 7,50       | 8,90            |
| 17        | 8,91                            | 10,28         | 9,74         | 7,70       | 8,90            |
| 18        | 9,10                            | 10,26         | 9,72         | 7,80       | 8,90            |
| 19        | 9,29                            | 10,21         | 9,67         | 8,00       | 8,80            |
| 20        | 9,45                            | 10,13         | 9,70         | 8,10       | 8,80            |
| 21        | 9,60                            | 10,03         | 9,52         | 8,30       | 8,70            |
| 22        | 9,74                            | 9,90          | 9,41         | 8,50       | 8,60            |
| 23        | 9,86                            | 9,74          | 9,26         | 8,50       | 8,50            |
| 24        | 9,97                            | 9,55          | 9,09         | 8,70       | 8,30            |
| 25        | 10,07                           | 9,34          | 8,89         | 8,80       | 8,10            |
| 26        | 10,17                           | 9,10          | 8,67         | 8,90       | 8,00            |
| 27        | 10,25                           | 8,83          | 8,42         | 8,90       | 7,60            |
| 28        | 10,33                           | 8,53          | 8,14         | 9,00       | 7,40            |
| 29        | 10,40                           | 8,19          | 7,82         | 9,10       | 7,10            |
| 30        | 10,46                           | 7,81          | 7,47         | 9,10       | 6,80            |
| 31        | 10,52                           | 7,40          | 7,08         | 9,10       | 6,40            |
| 32        | 10,57                           | 6,94          | 6,66         | 9,20       | 6,10            |
| 33        | 10,62                           | 6,43          | 6,18         | 9,30       | 5,60            |
| 34        | 10,66                           | 5,87          | 5,66         | 9,30       | 5,10            |
| 35        | 10,70                           | 5,26          | 5,08         | 9,30       | 4,60            |
| 36        | 10,74                           | 4,58          | 4,44         | 9,30       | 4,00            |
| 37        | 10,77                           | 3,83          | 3,73         | 9,40       | 3,40            |
| 38        | 10,80                           | 3,00          | 2,95         | 9,40       | 2,70            |
| 39        | 10,83                           | 2,10          | 2,09         | 9,50       | 1,90            |
| 40        | 10,85                           | 1,10          | 1,13         | 9,50       | 1,10            |

A Figura 4-30 ilustra, de forma ampliada, os deslocamentos relativos entre os pilares P2 e P5 do 5 pavimento do modelo TQS Padrão. Nota-se que os deslocamentos relativos são maiores nos pavimentos superiores.

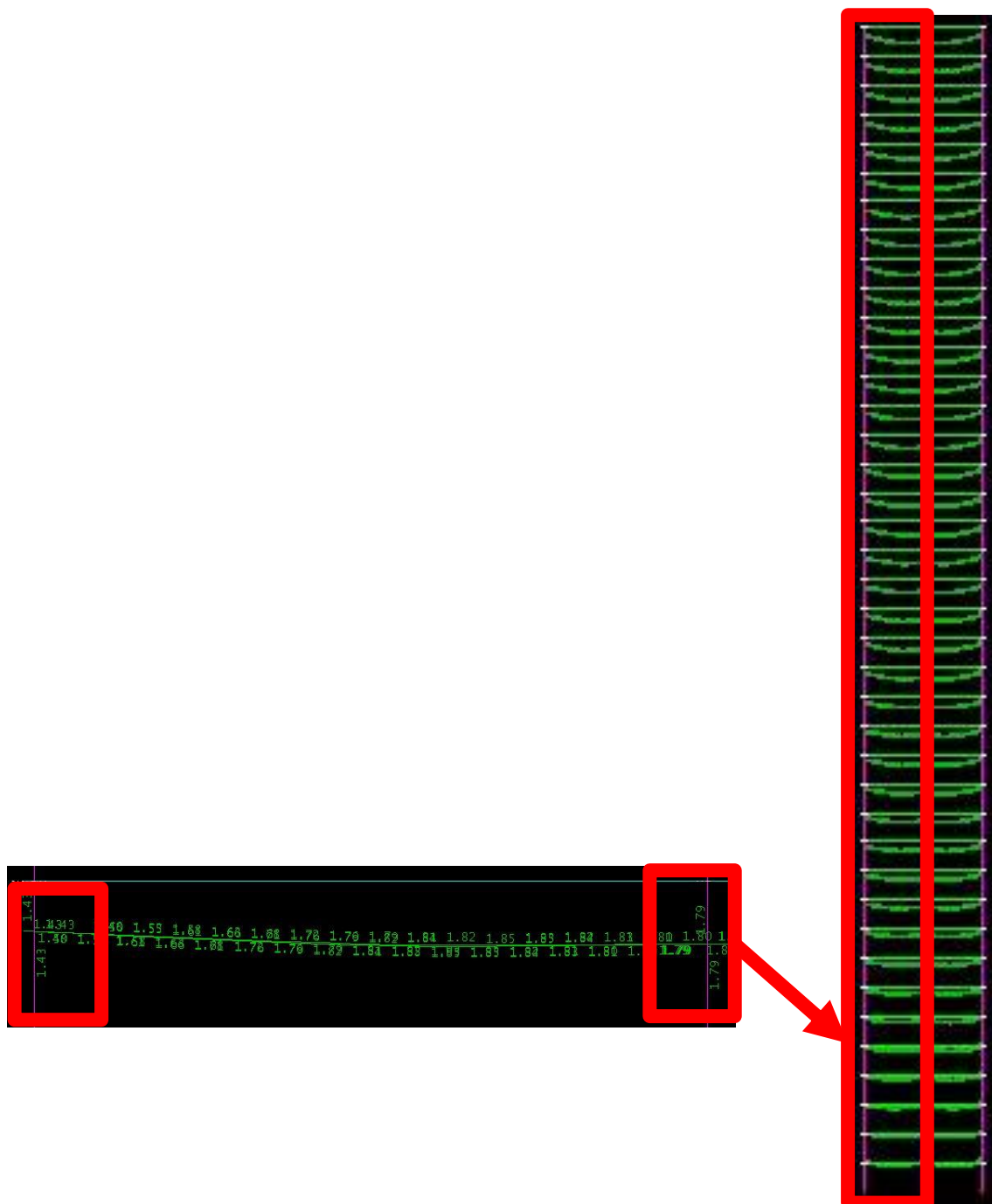


Figura 4-30 – Gráfico dos deslocamentos diferenciais em cm entre P2 e P5 do EDIF 40.

A Figura 4-31 ilustra os deslocamentos diferenciais, entre os pilares P2 e P5 do EDIF 40, obtidos a partir dos diversos modelos estruturais.

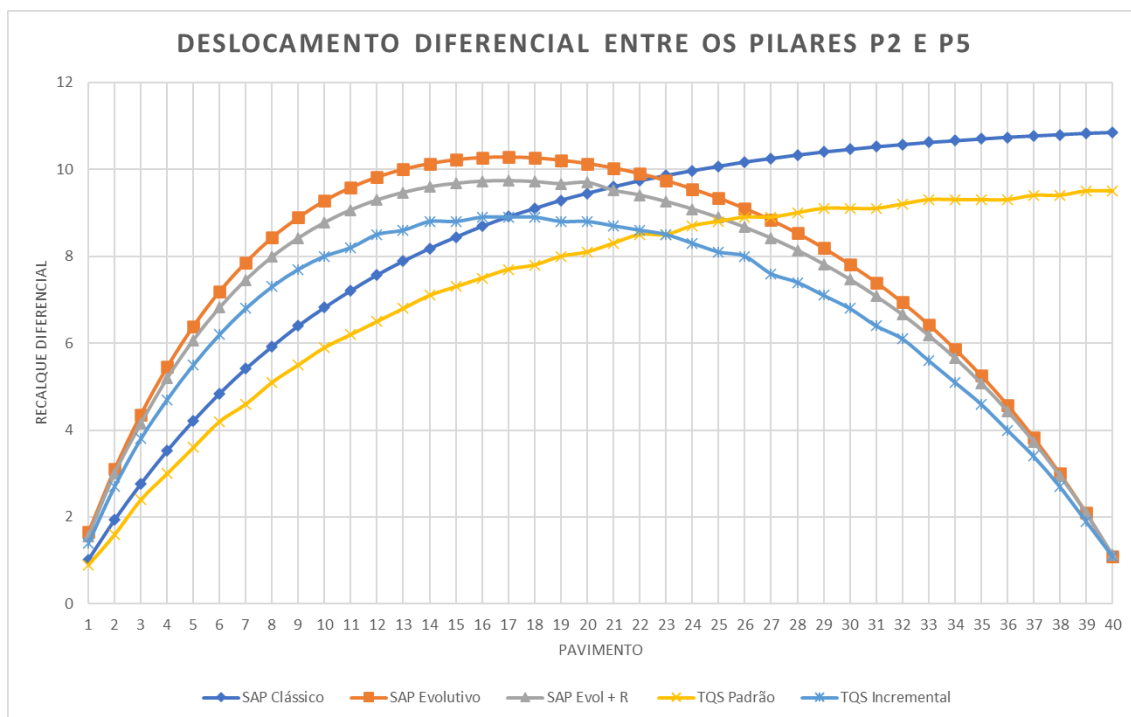


Figura 4-31 – Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 40.

Com base nos dados extraídos da Figura 4-31, conclui-se que, conforme antecipado, o TQS Padrão e o SAP Clássico não exibem deslocamentos correspondentes ao esperado para edificações construídas em múltiplas etapas. Entretanto, ao adotar a análise incremental do TQS, os resultados obtidos indicam tendência de comportamento similar à do SAP Evolutivo, ilustrando as condições reais do processo construtivo.

Analogamente ao EDIF15, as reações nos apoios foram analisadas no EDIF40 e encontram-se apresentadas na Tabela 4-19.

Tabela 4-19 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40 (kN)

| PILAR | SAP 2000 - Lima e Macedo (2014) |               |              | TQS        |                 |
|-------|---------------------------------|---------------|--------------|------------|-----------------|
|       | SAP Clássico                    | SAP Evolutivo | SAP Evol + R | TQS Padrão | TQS Incremental |
|       | (Final)                         | (Final)       | (Final)      | (Final)    | (Final)         |
| P2    | 6091,4                          | 5795,0        | 5813,0       | 4517,4     | 4342,2          |
| P5    | 7497,2                          | 8090,0        | 8054,0       | 7879,2     | 6360,9          |
| P8    | 6091,4                          | 5795,0        | 5813,0       | 4490,3     | 4315,9          |

A Figura 4-32 ilustra as forças resultantes nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF40 obtidas do modelo TQS Padrão.

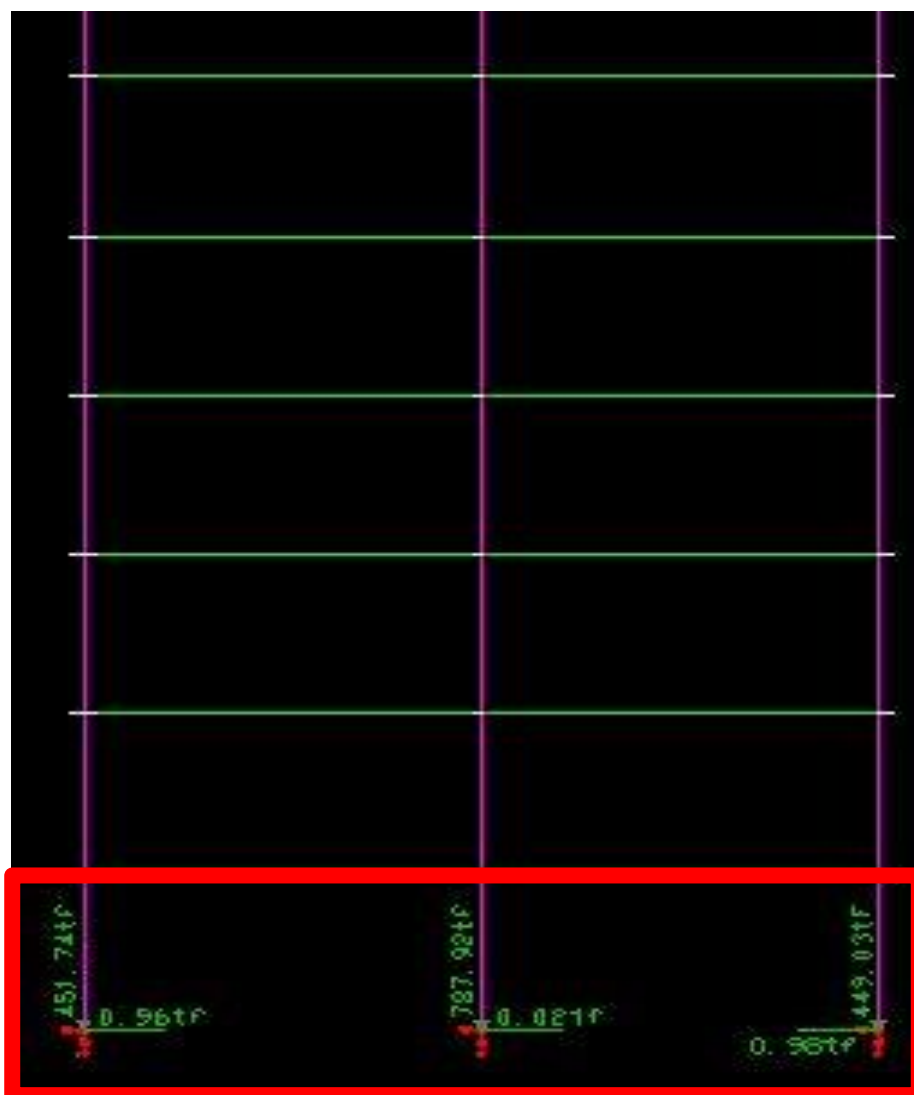


Figura 4-32 – Gráfico da resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40.

A Figura 4-33 mostra que o aumento da rigidez dos pilares no modelo TQS Padrão leva à reações de apoio semelhantes às obtidas pela abordagem incremental. Contudo, em contraponto aos resultados obtidos com o EDIF15, constatou-se que as respostas do programa TQS se mostraram inferiores em comparação aos obtidos pelo SAP2000. Nos pilares de extremidade, tal disparidade potencialmente conduziria a um processo de dimensionamento subestimado. No entanto, é necessário realizar análises adicionais, aumentando o campo amostral para validar tal afirmativa.

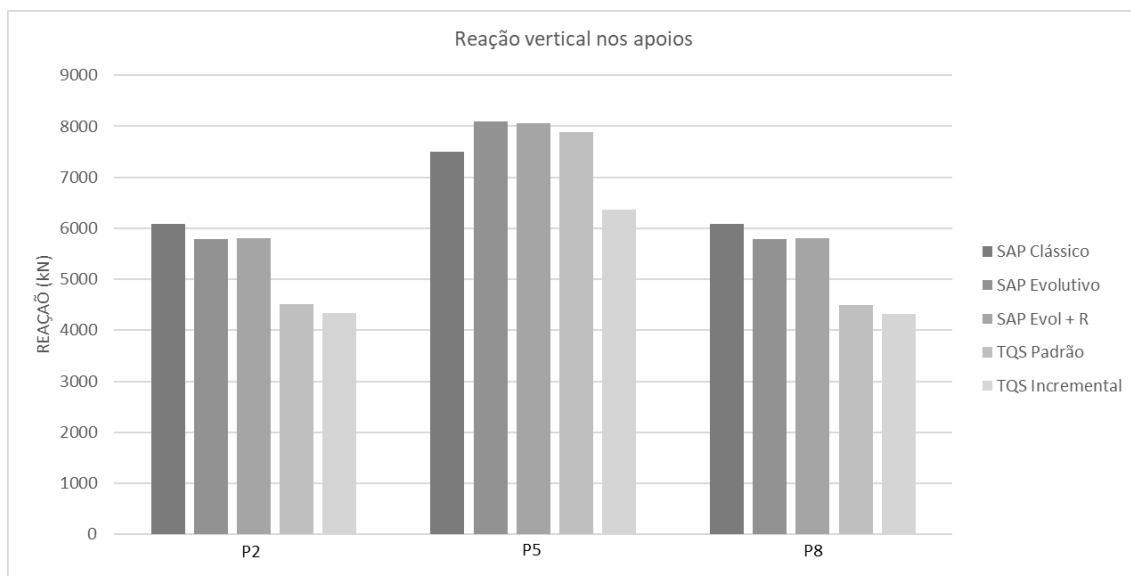


Figura 4-33 – Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40.

Durante a análise do EDIF40, foi evidenciado que o método de aumento de rigidez nos pilares (MULAXI no TQS) demonstrou uma tendência de convergência dos resultados de carregamento nos apoios em relação à abordagem incremental. Contudo, em contraponto à experiência com o EDIF15, constatou-se que os resultados obtidos através do programa TQS se mostraram inferiores em comparação aos obtidos pelo SAP2000. Nos pilares de extremidade, tal disparidade, potencialmente conduziria a um processo de dimensionamento subestimado. No entanto, é necessário realizar análises adicionais, aumentando o campo amostral para validar tal afirmativa.

## 5. CONCLUSÕES

---

Em conclusão, este estudo comparativo entre modelos de elementos finitos, tendo como base os resultados dos programas SAP2000 e TQS e explorando os métodos MULAXI e incremental, oferece uma visão abrangente sobre a influência da quantidade de andares e métodos construtivos. Ao analisar os resultados, fica evidente que a diferença na quantidade de pavimentos desempenha um papel significativo nos resultados dos métodos aplicados.

Tendo como base a arquitetura utilizada neste estudo, a modelagem de 15 pavimentos (EDIF 15) ao utilizar os parâmetros padrões do TQS (aumento de rigidez do pilar igual a 10) resulta em valores conservadores para o dimensionamento das vigas na armadura à flexão próxima do apoio P5, chegando a alcançar esforços solicitantes de até 60% superiores a análise incremental, conforme apresentado na Figura 4-18. Entretanto, o dimensionamento da armadura à flexão no meio do vão, entre os pilares P2 e P5, ficaria inferior ao necessário conforme indicado na Figura 4-20, redução de aproximadamente 10% dos resultados encontrados pela análise incremental. No entanto, para o dimensionamento das fundações e pilares recomenda-se a retirada do aumento de rigidez da viga de transição, conforme indicado na Figura 4-8, dessa forma, o aumento da rigidez do pilar passa a ser apenas o estipulado pelo MULAXI (aumento de rigidez do pilar igual a 3,0).

A modelagem do edifício de 40 pavimentos (EDIF 40) apresenta maior complexidade, especialmente na análise dos pavimentos intermediários. A avaliação em múltiplas etapas revelou que, na análise incremental realizada no programa TQS, a viga V5 próxima ao apoio P5 apresentou momentos fletores nulos. Já no SAP2000 Evolutivo e Evol +R, os momentos fletores tiveram sinais positivos, conforme demonstrado na Tabela 4-8, que apresenta os resultados de ambos os programas. Dessa forma, o modelo de passo único com aumento da rigidez dos pilares não reproduz esses resultados adequadamente, tornando o dimensionamento da armadura a flexão próxima ao apoio P5 ineficiente. O mesmo comportamento observado no EDIF 15 ocorre no dimensionamento da armadura à flexão no meio do vão, entre os pilares P2 e P5, apresentando uma variação de aproximadamente 17% entre os modelos do TQS. Esse resultado, ilustrado na Figura 4-29, reforça a importância da análise em múltiplos passos para edifícios mais altos. Para o dimensionamento das fundações e dos pilares, da mesma forma que no EDIF 15, o uso

de MULAXI igual a 3,0 resultou em valores próximos aos obtidos na análise incremental, com variações máximas de 2,2%.

Acerca dos deslocamentos diferenciais o método MULAXI revelou inconsistências nos resultados, enquanto a abordagem incremental demonstrou alinhamento significativo com as análises realizadas no SAP2000. Essa convergência indica que a análise incremental proporciona uma representação mais fiel das condições estruturais ao longo das etapas de construção, tornando-se uma alternativa mais consistente para análises detalhadas em edifícios de múltiplos pavimentos.

Essas conclusões reforçam a importância de se considerar atentamente os elementos do método de análise empregado, bem como os parâmetros de aumento da rigidez da estrutura, visando obter resultados mais representativos. As conclusões deste estudo ressaltam a necessidade de uma abordagem cautelosa ao selecionar o método mais adequado para analisar estruturas complexas, levando em consideração suas características individuais e as implicações nas respostas estruturais.

Assim como em Fortes (2019), este trabalho demonstrou a necessidade de análises mais precisas e robustas para obter resultados mais convergentes com a realidade das edificações, levando em consideração sua fase construtiva. Essa congruência de ideias reforça a necessidade de abordagens computacionais que representem com precisão as condições reais de carregamento e deformação, garantindo, assim, maior segurança, eficiência e durabilidade nos projetos estruturais.

Esta dissertação contribui para a compreensão aprimorada da influência do MULAXI nos resultados obtidos pelo TQS, destacando a importância de se considerar o efeito incremental para assegurar uma análise estrutural mais confiável.

Para perspectivas de pesquisas futuras, é recomendável considerar a inclusão de carregamentos horizontais e variações de temperatura, almejando a ampliação da análise dos efeitos incremental do TQS em comparação com a abordagem baseada em programas de elementos finitos. Isso contribuirá para uma compreensão mais abrangente e precisa desses métodos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALVARADO, Y. A.; et al. *An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings*. Engineering Structures, v. 31, n. 9, p. 2132-2140, 2009.

ALVES, B. **Análise comparativa pelo método dos elementos finitos de modelos tridimensionais clássicos e evolutivos do sistema estrutural de um edifício alto em concreto armado**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *Guide for shoring/reshoring of concrete multistory buildings*. ACI 347, USA, 2005.

ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

ARAÚJO, T. J. F. **Estudo da ligação viga-pilar em sistema estrutural de concreto considerando a variação da semi-rigidez**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15696: Escoramento de estruturas de concreto – Desempenho e segurança nas operações de montagem e desmontagem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AUTODESK. (2024). Robot Structural Analysis Professional (Versão 2022). <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>

BELCHIOR, J. L. B.; ALVES, R. H. C. P. **Avaliação dos esforços em edificações de concreto armado considerando o processo construtivo**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, 2019.

BUENO, I. K. S. **Estudo e aplicação dos critérios de projeto do TQS pórticos na elaboração do projeto estrutural de um edifício residencial em concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Goiás, 2021.

CHAKRABARTI, S. C.; NAYAK, G. C.; AGARWALA, S. K. *Effect of sequence of construction in the analysis of multistoreyed building frame*. Building and Environment, v. 13, [s.n.], p. 1-6, 1978.

CHOI, C. K.; KIM, E. D. *Multistory frames under sequential gravity loads*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985.

CHOI, S. W.; KIM, Y.; KIM, J. M.; PARK, H. S. Field *Monitoring of Column Shortenings in a High-Rise Building during Construction*. Sensors, v. 13, n. 11, p. 14321-14338, 2013.

COELHO, A. O. L. **Influência das etapas de construção e carregamento na análise de pórticos planos em edifícios altos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. (2023). SAP2000: Structural Analysis and Design Software (Versão 22). <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>DIAS, E. M. B.; OLIVEIRA, R. A. **Influências das alvenarias de vedação no comportamento de edifícios com estrutura em concreto armado**. XXXI Jornadas Sud-americanas de Ingeniería Estructural, 2004.

DINAR, Y.; RAZEL, M.; ASHRAF, M. *Chronological construction sequence effects on reinforced concrete and steel buildings*. The International Journal of Engineering and Science, 2014.

FONTE, A. O. C.; SORIANO, H. L. **Influência do efeito construtivo incremental em edifícios altos**. II Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 1989.

FORTES, G. L. **Encurtamento de pilares de concreto armado e a influência do processo construtivo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2019.

FINTEL, M.; GHOSH, S. H P.; IYENGAR, H. D. ***Structural precast concrete handbook***. Chicago: Prestressed Concrete Institute, 1986.

FRANCA, M. P. A. **Estudo da eficiência dos contraventamentos treliçados em edifícios com estrutura de aço**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

GHOSH, S. K. ***Estimation and accommodation of column length changes in tall buildings***. London, 1996.

GORZA, L. S. **Análise incremental construtiva de edifícios metálicos de andares múltiplos usando o método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2000.

GRUNDY, P.; KABAILA, A. ***Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings***. ACI Structural Journal, 1963.

HAN-SOO, K.; SE-HUN, J. ***Column shortening analysis of tall buildings***. Structural Design Tall Special Buildings, 2012.

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2000.

KRIPKA, M. **Análise incremental construtiva de edificações**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

LIMA, E. H. de S.; MACEDO, S. G. B. **Análise dos efeitos construtivos em estruturas de concreto armado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

LEGGERINI, Maria Regina Costa; KALIL, Sílvia Baptista. **Estruturas Isostáticas** – DECivil. PUCRS, disponível em: <https://ecivilufes.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/03/estruturas-isostc3a1tivas.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2024.

LOPES, F. A. F. **Análise tridimensional de um sistema de contraventamento misto aplicado em edifícios altos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MARTINS, C. H. **Contribuição da rigidez transversal à flexão das lajes na distribuição dos esforços em estruturas de edifícios de andares múltiplos.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 1998.

MARTINS, C. H. **Análise não linear de estruturas tridimensionais de edifícios de andares múltiplos com núcleos resistentes.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2001.

MATEUS, F. M. **Influência das deformações axiais dos pilares e das etapas de construção e carregamento na análise estrutural de edifícios altos com lajes lisas.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

MENON, N. V.; NOGUEIRA, R. S. **Análise incremental em pórticos de edifícios altos em concreto armado.** *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, v. 24, n. 1, p. 79-88, jan./jun. 2015.

PRADO J. F. M. A. **Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção.** Tese (Doutorado) em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 1999.

PEREIRA, A. C. O. **Estudo da influência da modelagem estrutural do núcleo nos painéis de contraventamento de edifícios altos.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2000.

PRUDENTE, M. **Análise de estruturas tridimensionais usuais de edifícios altos.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 1984.

REINEHR, R. **Análise das sequências de construção em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de Passo Fundo, 2018.

RIOS, B. M. C. **Análise tridimensional e envoltória de esforços em edifícios altos sujeitos à ações verticais e laterais.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 1991.

SILVA, F. J. B. **Análise comparativa pelo método dos elementos finitos de modelos tridimensionais de um edifício alto em concreto armado com sistema estrutural tubular e núcleo central.** tESE (Mestrado) em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.

SOUSA JUNIOR, E. **Análise da interação entre núcleos estruturais e lajes em edifícios altos**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2001.

STAFFORD SMITH, B.; COULL, A. *Tall buildings structures: analysis and design*. John Wiley & Sons, 1991.

TARANATH, B. S. *Structural analysis and design of tall buildings*. McGraw-Hill, 1998.

TEIXEIRA, M. R.; SOUSA, R. M. **Análise não linear física e geométrica de um edifício de múltiplos andares em concreto armado utilizando-se a plataforma OpenSees**. V Simpósio EPUSP, 2003.

TORRES, I. R. F. **Efeito da deformação por cortante no cálculo de edifícios de andares múltiplos com núcleos estruturais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 1999.

TQS Informática. (2024). TQS: Software de dimensionamento de estruturas de concreto (Versão 23.9). <https://www.tqs.com.br/>

VASCONCELLOS FILHO, A. **Edifícios de andares múltiplos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 1981.

XIA, X. H. *Research on the effects of construction progress and dynamic behavior of tall hybrid-structures*. Ph.D. Thesis, Hunan University, 2007.