Estudo Sobre a Influência do Processo Construtivo em Edificações de Múltiplos Pavimentos em Concreto Armado

Alexandre Esteves Gomes dos Santos[1]
Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho[2]
Sergio Hampshire de Carvalho Santos[3]

Resumo

O crescimento acelerado dos centros urbanos impulsiona a verticalização, tornando os edifícios de múltiplos andares uma solução eficiente para o uso do espaço urbano em empreendimentos comerciais e residenciais. Dessa forma, faz-se necessário o domínio dos materiais e da modelagem estrutural com a finalidade de elaborar estruturas mais econômicas e confiáveis.

A prática do engenheiro estrutural é amplamente assistida por *softwares* de análise, como SAP2000, ROBOT, CYPECAD e TQS, que possibilitam, por meio da modelagem de elementos finitos e a avaliação de diversas condições estruturais. Assim, é fundamental compreender as propriedades dos materiais, os métodos de cálculo e as condições de contorno aplicáveis.

Nesse contexto, o artigo apresenta uma análise comparativa entre modelos desenvolvidos nos softwares SAP2000 e ROBOT e um modelo incremental elaborado no TQS. Este último considera o encurtamento dos pilares durante a construção e a variação de rigidez, representada pelos coeficientes MULAXI (para pilares) e MULETR (para vigas). A análise incremental difere de abordagens tradicionais em passo único, nas quais as cargas são aplicadas apenas após a conclusão da estrutura.

Os resultados indicam que os deslocamentos calculados pela análise incremental, são significativamente distintos daqueles obtidos no modelo de passo único. A metodologia de validação do efeito incremental inclui a comparação dos deslocamentos e esforços obtidos pelos diferentes modelos computacionais, evidenciando a importância de considerar os efeitos progressivos na construção de edifícios altos.

Esse trabalho reforça a relevância da análise incremental como ferramenta para aprimorar a precisão na modelagem estrutural, contribuindo para projetos mais eficientes e seguros em edificações de grande porte.

Palavras-chave: Encurtamento dos pilares; modelagem de elementos finitos; efeito incremental.

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. 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. 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, consequentemente, no projeto.

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.

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

[1] M. Sc. Escola Politécnica da UFRJ/ Programa de Projeto de Estruturas/ aegsantos@poli.ufrj.br
[2] D. Sc. Escola Politécnica da UFRJ/ Programa de Projeto de Estruturas/ julioholtz@poli.ufrj.br
[3] D. Sc. Escola Politécnica da UFRJ/ Programa de Projeto de Estruturas/ sergiohampshire@gmail.com

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.

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, escoramento e reescoramento. 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.

Metodologia

Com o propósito de validar os resultados obtidos pelos programas, foi conduzida uma análise utilizando a mesma configuração da arquitetura (Figura 1), carregamentos e materiais adotados no trabalho de Lima e Macedo (2014). Essa análise abrange uma edificação de 15 pavimentos (EDIF15) e outra de 40 pavimentos (EDIF40).

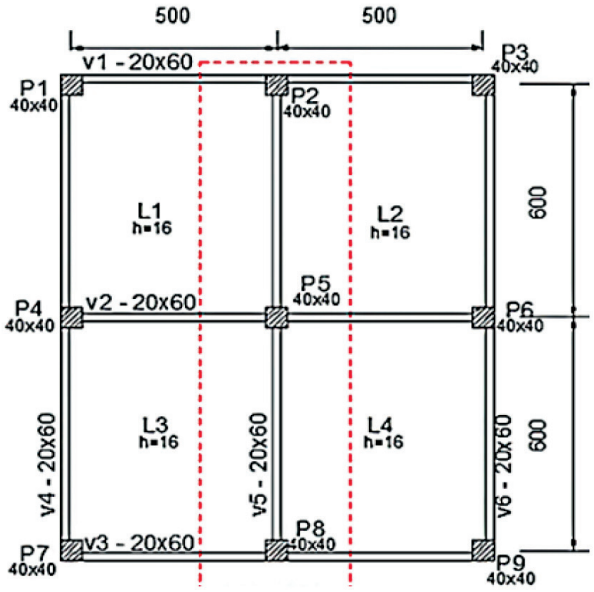

Figura 1 *– Forma do pavimento-tipo (medidas em cm). Fonte: Lima e Macedo (2014).*

Tabela 1 – Características dos modelos elaborados.

Modelo		Múltiplos passos	Passo único	Aumento de rigidez do pilar (MULAXI)	Aumento de rigidez da viga de transição (MULETR)	Observações
ROBOT / SAP2000	Clássico	–	X	–	–	Autor para o ROBOT e estudo de Lima e Macedo (2014) para o SAP2000
SAP2000	Evolutivo	X	–	–	–	Estudo de Lima e Macedo (2014)
	Evol +R	X	–	–	–	Estudo de Lima e Macedo (2014) com efeitos do escoramento e reescoramento
TQS	Incremental	X	–	–	–	–
	Padrão	–	X	3	10	Resultados iguais ao MULAXI 10
	MULETR 10	–	X	–	10	Resultados iguais ao MULAXI 1
	MULAXI 1	–	X	1	–	Resultados iguais a MULETR 10
	MULAXI 2	–	X	2	–	–
	MULAXI 3	–	X	3	–	–
	MULAXI 4	–	X	4	–	–
	MULAXI 10	–	X	10	–	Resultados iguais ao Padrão

Os modelos utilizados 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 3 m, resultando em alturas totais de 45 m e 120 m, respectivamente.

Na geração dos edifícios, são desenvolvidos modelos para ambas as alturas, considerando diferentes abordagens em cada programa. Aplicam-se duas metodologias: a de múltiplos passos e a de passo único conforme apresentado na Tabela 1

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.

Análise de Resultados

A análise de resultados constitui uma etapa fundamental para verificar a validade das hipóteses propostas e compreender os fenômenos investigados.

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. 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 do TQS, em que a área da seção transversal do pilar considerada no pórtico (Api) é multiplicada pelo MULETR quando ativado em conjunto com o MULAXI.

A Figura 2 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.

Observa-se que não há acréscimo de carga, mas sim uma redistribuição conforme o aumento da rigidez em direção ao centro da edificação. 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.

Ao aumentar o valor do MULAXI no TQS, observa-se uma mudança considerável nas solicitações de todos os pavimentos. Esta análise gera questionamentos sobre a aplicabilidade desse acréscimo de rigidez nos pilares como solução para corrigir os resultados.

Na Figura 3 está ilustrado graficamente os momentos fletores negativos da V5 próximo ao P5 do EDIF 15.

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%.

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

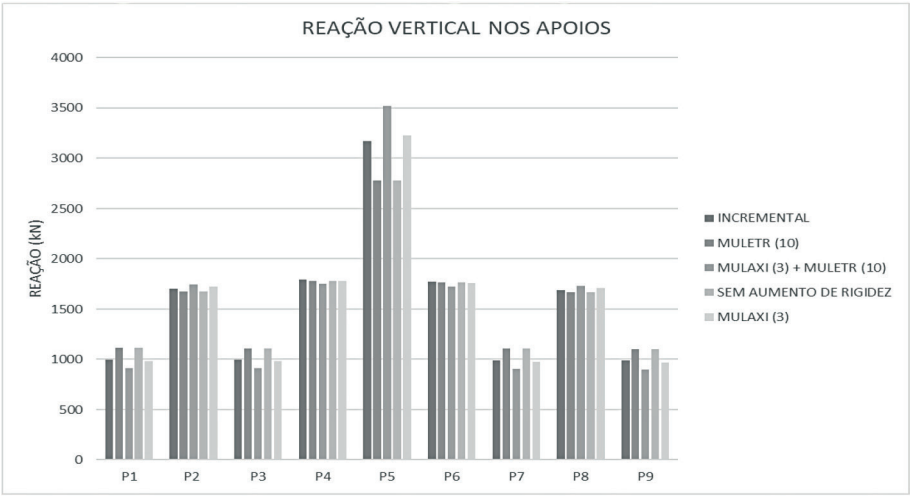

***Figura 2** – Variação das reações nos apoios a partir de diversas configurações de rigidez.*

acréscimo do momento fletor.

A Figura 4 mostra os momentos fletores positivos da viga V5, no meio do vão, entre os pilares P2 e P5.

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, consequentemente dando um acréscimo do momento fletor positivo.

Os deslocamentos apresentados na Figura 5 complementam a análise, fornecendo uma perspectiva adicional sobre o comportamento estrutural nas condições avaliadas. 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.

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.

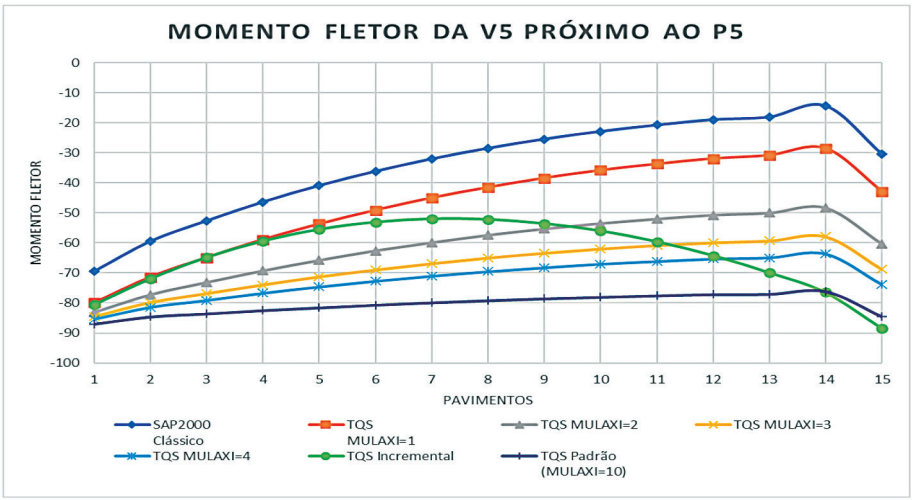

Figura 3 *– Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.*

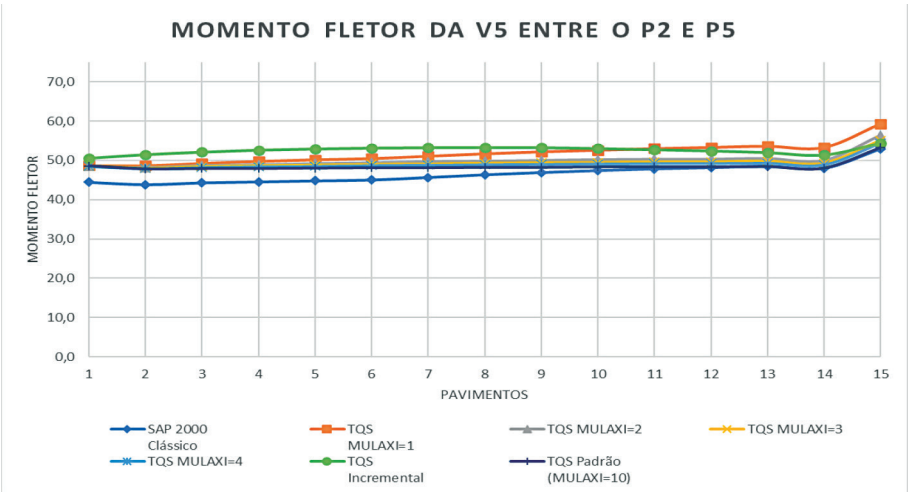

Figura 4 *– Momento fletor em kN.m, no meio do vão, da viga do EDIF 15.*

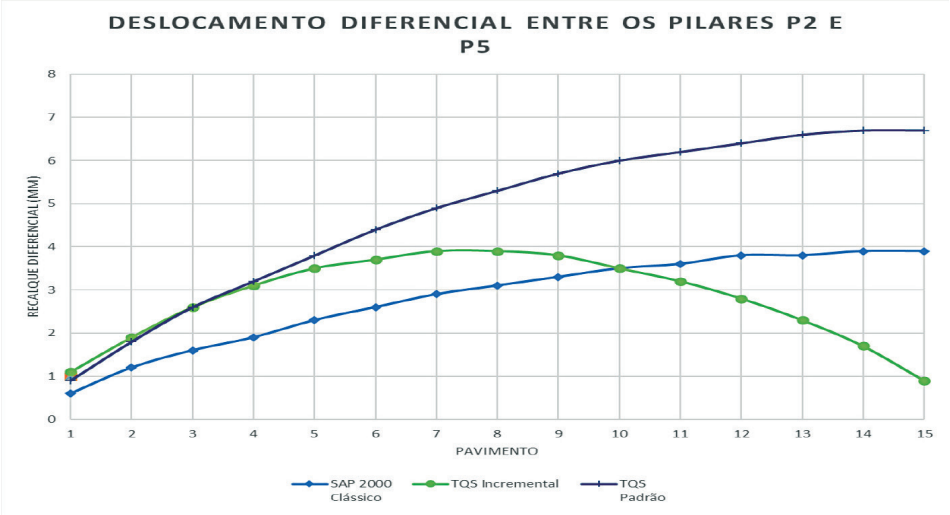

Figura 5 *– Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 15.*

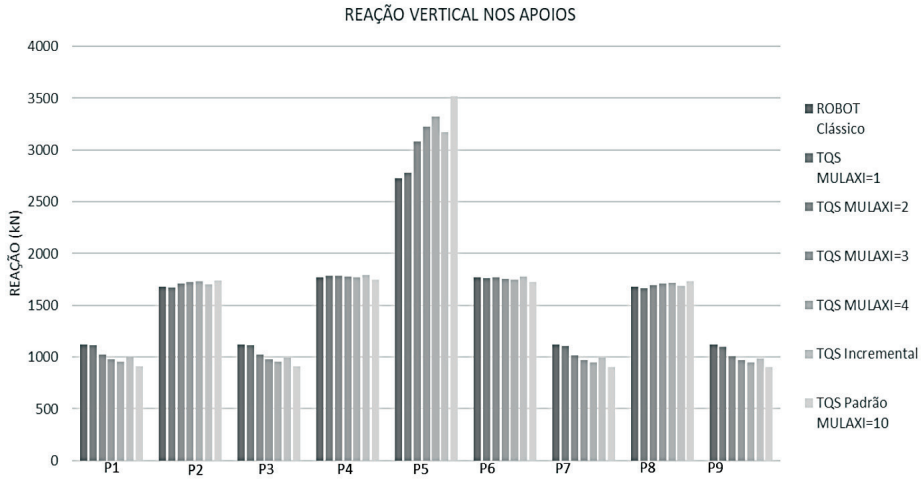

Figura 6 *– Reações verticais nos apoios do EDIF 15.*

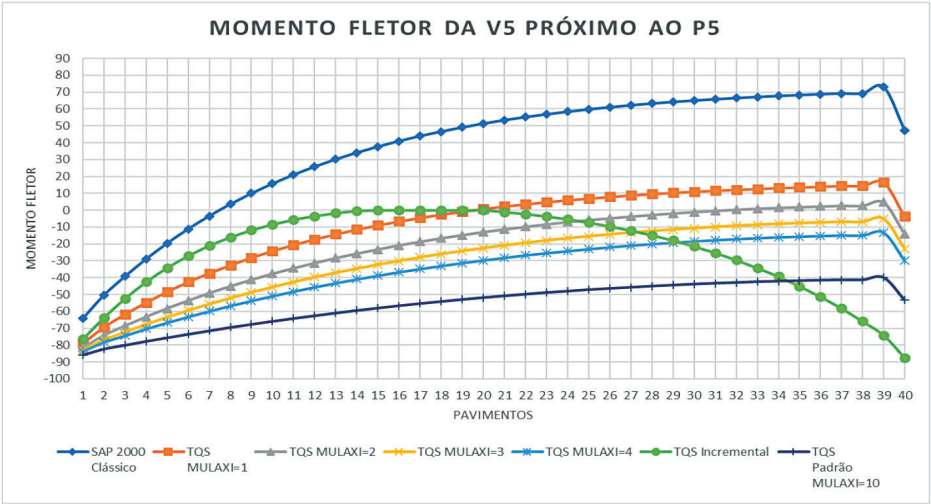

Figura 7 *– Momento fletor em kN.m da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 40.*

A Figura 6 apresentam as reações verticais nos apoios para as diversas configurações de rigidez axial dos pilares.

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 Figura 7 resume os resultados do momento fletor da V5 próximo do pilar P5.

Assim como indicado no caso do EDIF 15, os modelos que enrijecem os pilares não apresentam resultados compatíveis com aqueles obtidos da análise incremental. Essa discrepância destaca um risco potencial para a integridade estrutural.

A Figura 8 apresenta os momentos fletores positivos da viga V5, no vão meio do vão, por pavimento no EDIF 40.

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.

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 utilizando o recurso de aumento da seção

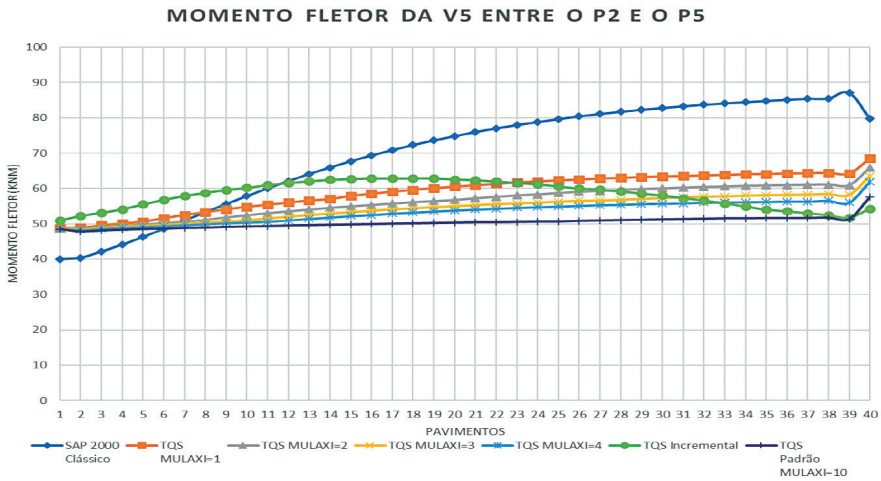

Figura 8 *– Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.*

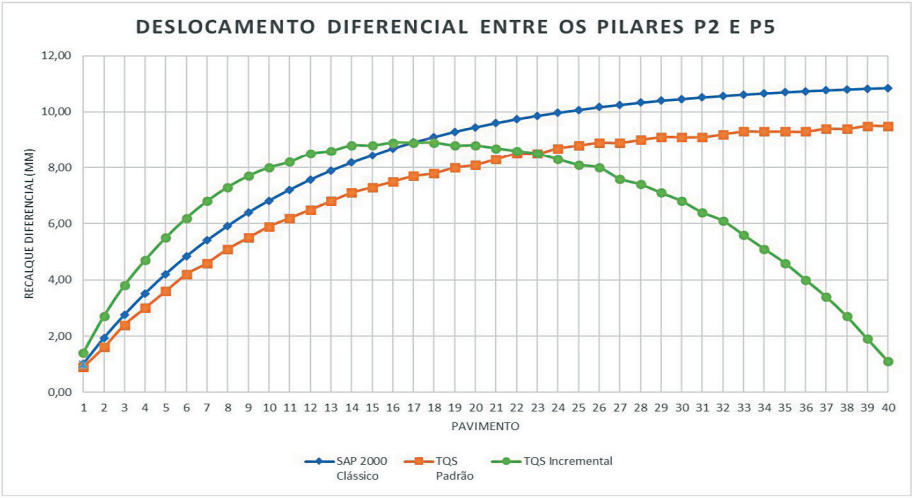

Figura 9 *– Deslocamentos diferenciais entre P2 e P5 do EDIF 40.*

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, conforme exposto na Figura 9.

A análise incremental apresenta 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 Figura 10 mostra as reações verticais calculadas a partir dos diversos modelos de análise.

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.

Os resultados obtidos por meio das análises do EDIF 15 realizadas no TQS foram incorporados aos estudos originais de Lima e Macedo (2014) com o objetivo de complementá-los, ampliando a comparação entre os dois programas. Dessa forma, apresenta-se a Figura 11, que ilustra os momentos fletores negativos da viga V5, próxima ao pilar central P5.

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, destacando-se, contudo, por resultados mais conservadores.

A Figura 12 ilustra 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

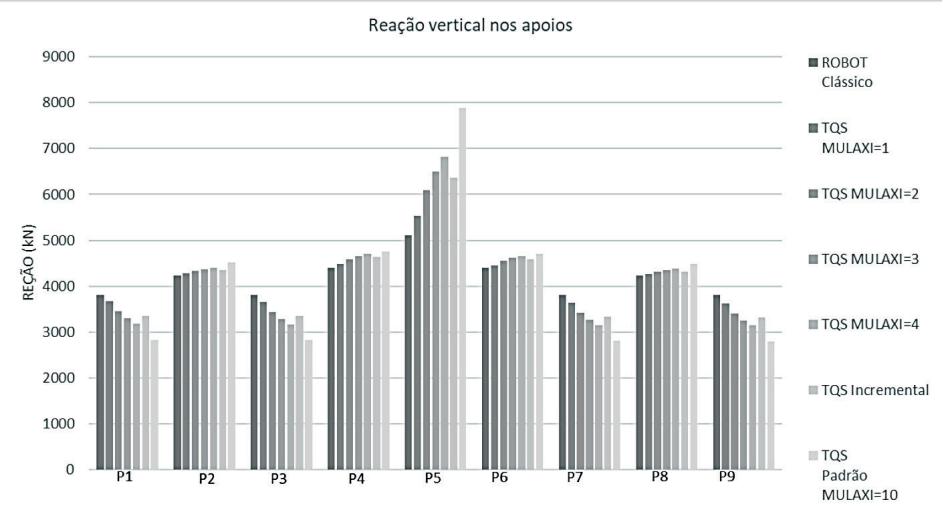

Figura 10 *– Reações verticais nos apoios do EDIF 40.*

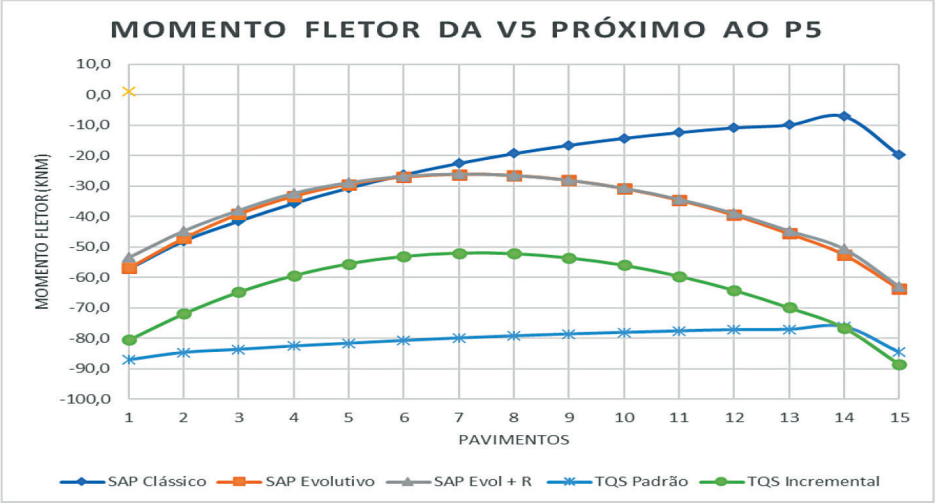

Figura 11 *– Momento fletor da viga V5 próximo ao P5 do EDIF 15.*

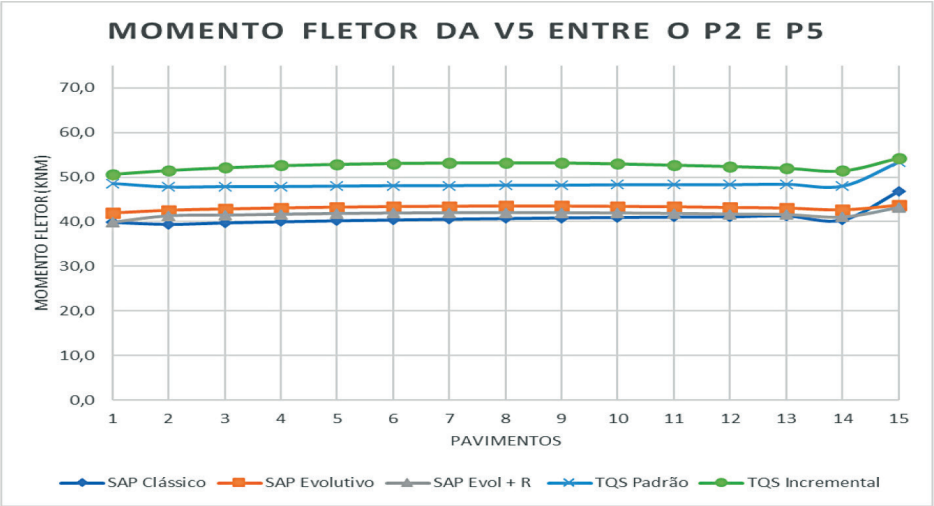

Figura 12– *Momento fletor da viga V5 no meio do vão do EDIF 15.*

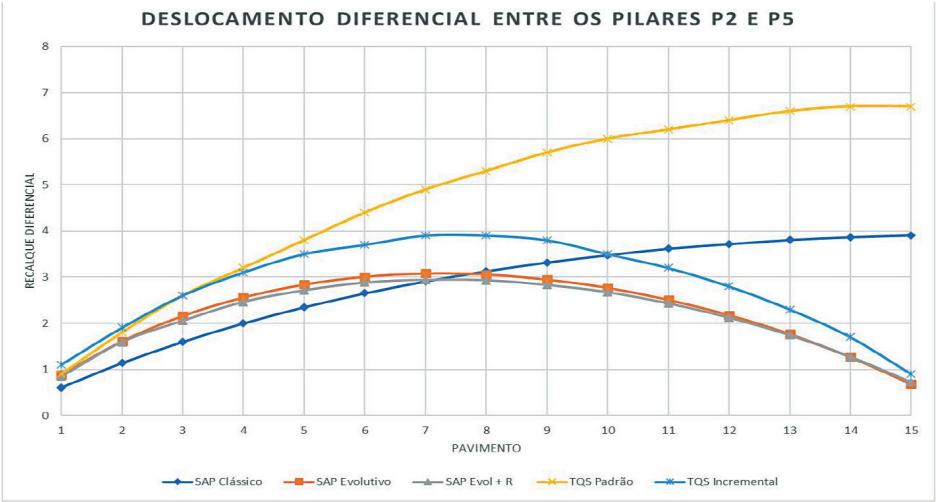

Figura 13 – *Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 15.*

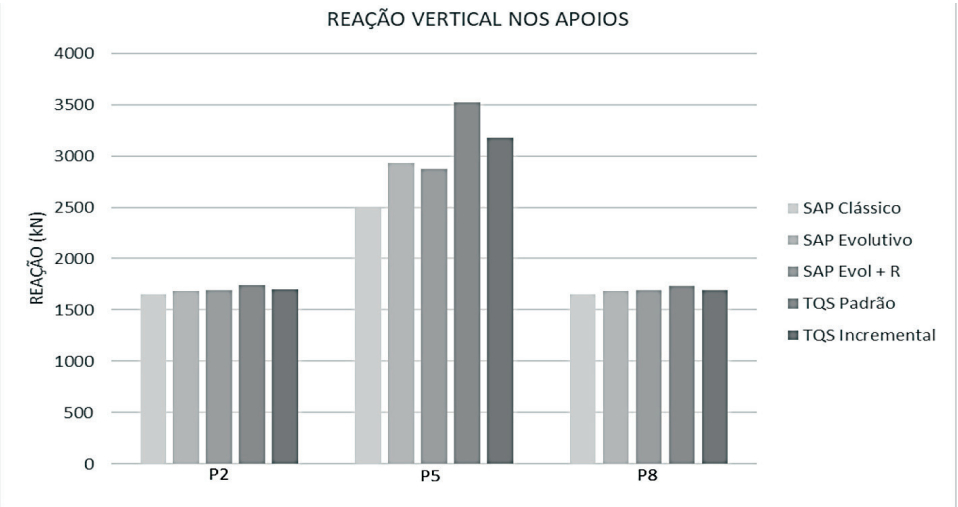

Figura 14 – *Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 15.*

que os momentos fletores calculados pelo TQS são, de maneira geral, mais elevados, indicando uma abordagem mais conservadora na análise estrutural.

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 Figura 13 que ilustra os deslocamentos diferenciais, entre os pilares P2 e P5 do EDIF 15, obtidos a partir dos diversos modelos estruturais.

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 partir dos resultados obtidos, foi gerado o gráfico da Figura 14, demonstrando que o modelo TQS Padrão adota uma abordagem que superestima as cargas sobre o pilar central.

Para ampliar o estudo foi realizado a análise também com o EDIF40, e assim como na análise do EDIF15, foram estudados 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.

A Figura 15 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.

As respostas do modelo TQS Padrão, embora com valores absolutos maiores, apresentam tendência semelhante ao SAP Clássico, com redução dos momentos fletores à 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 passo único, pode ser questionável.

A Figura 16 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.

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 Figura 17 que ilustra os deslocamentos diferenciais, entre os pilares P2 e P5 do EDIF 40, obtidos a partir dos diversos modelos estruturais.

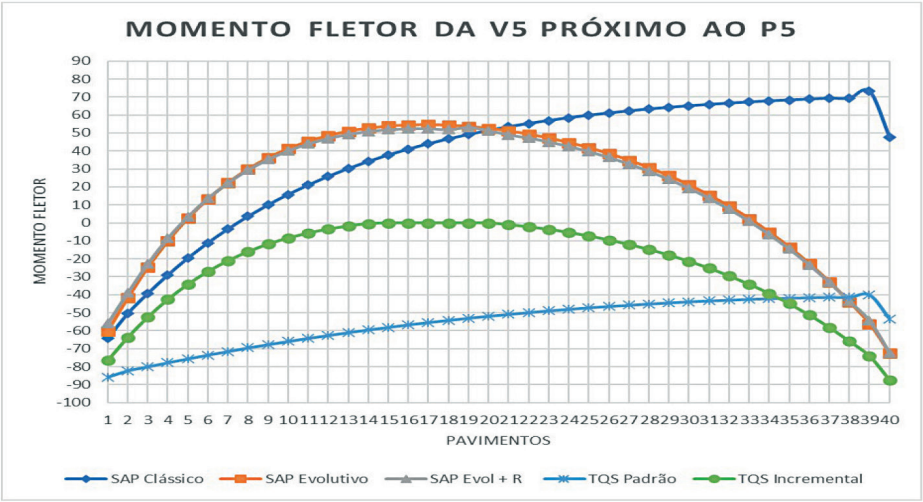

Figura 15 *– Momento fletor da viga em kN.m V5 próximo ao P5 do EDIF 40.*

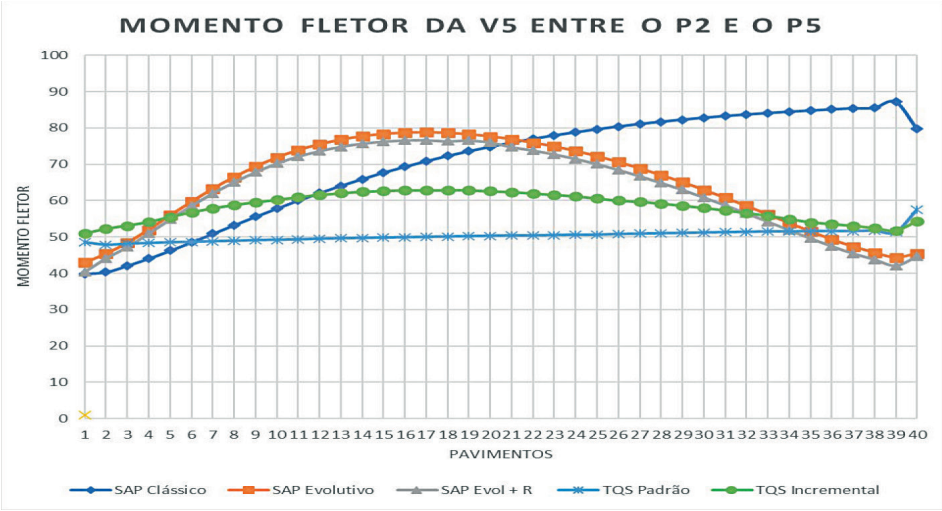

Figura 16 *– Momento fletor em kN.m da viga V5 no meio do vão do EDIF 40.*

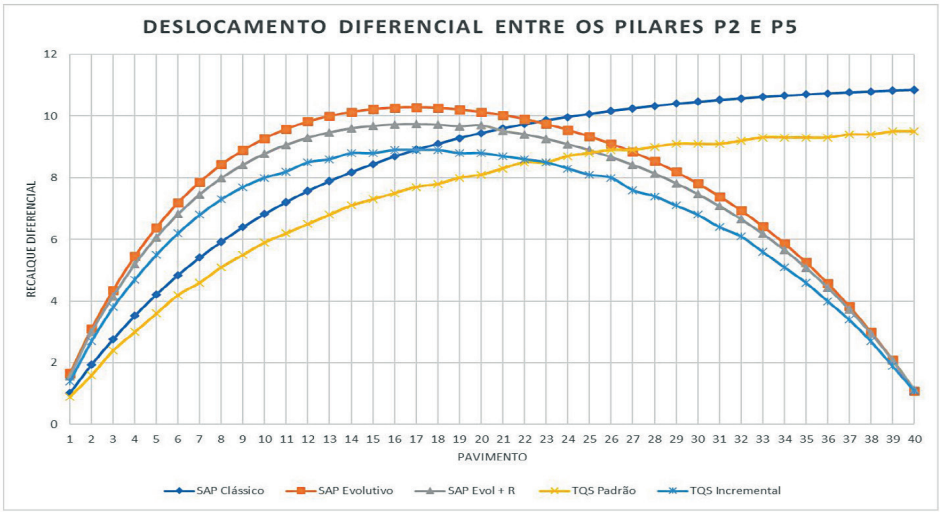

Figura 17 *– Deslocamentos diferenciais em mm entre P2 e P5 do EDIF 40.*

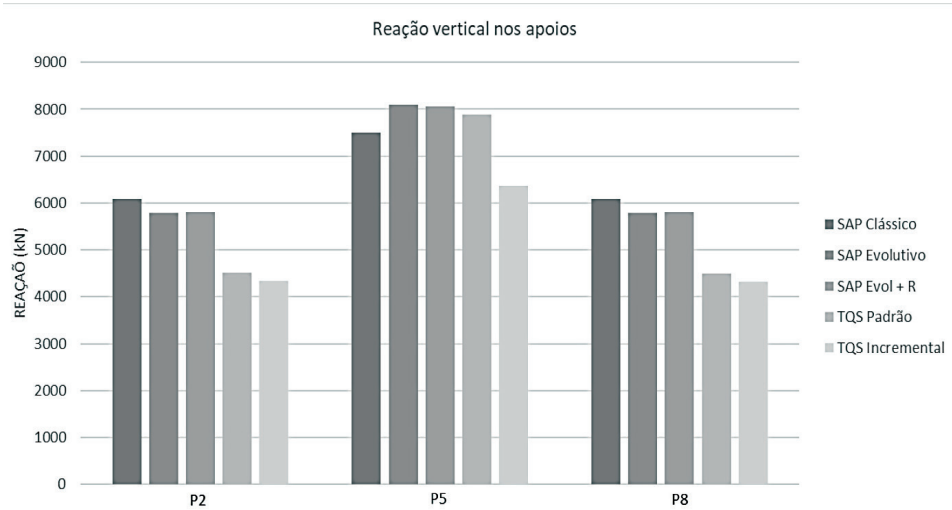

Figura 18 *– Resultante nos apoios P2, P5 e P8 do EDIF 40.*

O TQS Padrão e o SAP Clássico não exibem deslocamentos esperados 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, apresentada na Figura 18.

Contudo, em contraponto aos resultados obtidos com o EDIF15, constatou-se que os 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.

Conclusões

Em conclusão, este estudo 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 10. Assim como, o dimensionamento da armadura à flexão no meio do vão, entre os pilares P2 e P5, ficaria também superior ao necessário conforme indicado na Figura 11, aumento 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 5, 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 e no SAP2000 Evolutivo e Evol + R, os momentos fletores tiveram sinais positivos, conforme demonstrado na Figura 14. Resultado que gera questionamentos na armação à flexão negativa da viga próxima ao apoio. Diferentemente do 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 15, 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 em múltiplos passos realizadas no SAP2000.

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.

Referências

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

ASSOCIÇÃO 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.

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.

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

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.

SANTOS, Alexandre Esteves Gomes dos. Análise da influência do processo construtivo em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado. 2025. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2025.