ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS E DESEMPENHO ESTRUTURAL ENTRE VINCULAÇÕES ENGASTADAS E SEMIRRÍGIDAS EM EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE PEQUENO PORTE COM USO DE TECNOLOGIA BIM

José Maria de Moura Junior[1], Daniel Thomaz Farina[2], Maria Eduarda da Silva Dembogurski[3], João Paulo Preczevski[4], Hitomi Mukai[5], José Maria de Moura[6]

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (jmmj@poli.br)
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (danielfarina31@gmail.com)
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS (mariae.dembogurski@gmail.com)
4 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR (joaopauloprecz@gmail.com)
5 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR (hitomimukai@hotmail.com)
6 Universidade Norte do Paraná, Picos/PI (zemariasertaogas@hotmail.com

Resumo: Este estudo avalia custos e desempenho de vinculações engastadas e semirrígidas em um sobrado por meio de dimensionamento estrutural e orçamentação comparativa via tecnologia BIM (IFC). Os resultados provam que as fôrmas dominam os custos (~50%), limitando a economia do modelo semirrígido a 3,1%. Ademais, esta estrutura apresentou 10 lajes com flechas excessivas, exigindo reforços que anulariam a vantagem. Conclui-se que o modelo engastado é a escolha normativa viável e segura.

Palavras-chave: BIM**;** Concreto armado; Estado Limite de Serviço; Interoperabilidade IFC; Orçamento.

INTRODUÇÃO

A busca contínua pela viabilidade econômica em projetos de estruturas de concreto armado frequentemente impulsiona a flexibilização das vinculações entre os elementos estruturais. Em concepções tradicionais, o uso de ligações totalmente engastadas entre vigas e pilares garante elevada rigidez global ao pórtico e menores deformações, porém concentra elevados momentos fletores negativos nos apoios, o que exige uma elevada taxa de armadura de aço nestas regiões (Longo, 2019).

Como alternativa de projeto, a adoção de vinculações semirrígidas reduz a transferência desses momentos negativos, diminuindo teoricamente o consumo de aço nas ligações, mas acarretando o aumento imediato dos momentos positivos nos vãos e, consequentemente, dos deslocamentos globais da estrutura (Longo, 2019). Dessa forma, a manipulação do grau de engastamento apresenta-se como uma estratégia comum para tentar otimizar o uso de materiais, embora exija uma rigorosa verificação analítica para evitar problemas de instabilidade.

Além das questões de estabilidade, a viabilidade de um empreendimento depende de uma orçamentação rigorosa e detalhada desde a sua fase de concepção. De acordo com Mattos (2006) e Coêlho (2016), a alta competitividade no mercado da construção civil exige que as tomadas de decisão sejam fundamentadas no levantamento preciso dos custos unitários dos insumos, visto que variações na concepção estrutural geram impactos financeiros significativos nas edificações.

Nesse sentido, a utilização de bases de dados padronizadas, como o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), atua como um instrumento balizador confiável para a orçamentação comparativa entre diferentes tipologias de projeto (Barzellay e Longo, 2011).

Para viabilizar a análise ágil e precisa destas variadas concepções estruturais e de seus respectivos custos, a tecnologia de Modelagem da Informação da Construção (BIM) consolidou-se como uma ferramenta importante. De acordo com Tarrafa (2012), o compartilhamento de informações físicas e funcionais no modelo paramétrico fundamenta modificações rápidas e seguras no projeto. Diferente

dos modelos bidimensionais convencionais (CAD), a plataforma BIM baseia-se na parametrização de modelos tridimensionais que integram dados geométricos, propriedades dos materiais e quantitativos aplicáveis a toda a edificação (Lino *et al.*, 2012).

A efetividade dessa integração é garantida pelo formato Industry Foundation Classes (IFC), uma linguagem de dados aberta e neutra que viabiliza a interoperabilidade entre hardwares e softwares de diferentes áreas, como a arquitetura e o cálculo estrutural (Ferraz e Morais, 2012). Desta forma, o uso do BIM aliado ao formato IFC reduz o retrabalho manual, acelerando a extração de quantitativos exatos para as planilhas orçamentárias.

Apesar da aparente vantagem financeira obtida com a redução da armadura estrutural por meio de nós semirrígidos, a prática da engenharia carece de análises que confrontem a economia orçamentária inicial com as perdas reais de desempenho mecânico. A diminuição do enrijecimento afeta o comportamento estático da edificação e pode ocasionar flechas excessivas que ultrapassam os limites de serviço estabelecidos por norma, demandando intervenções construtivas que invalidam a economia de aço preliminar (Longo, 2019).

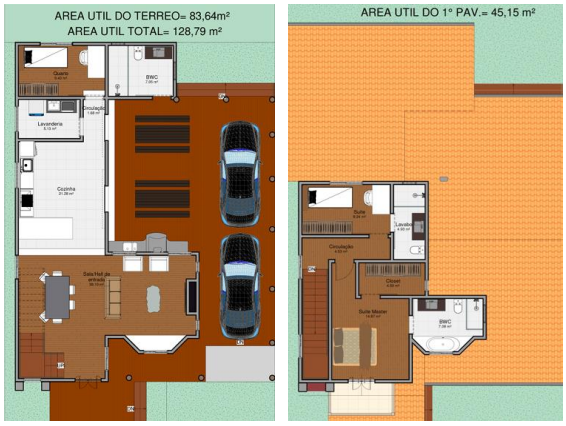
Diante deste cenário, o objetivo central deste trabalho é analisar comparativamente os custos de execução e o desempenho físico (estabilidade e deformações) de um pórtico tridimensional sob duas concepções distintas, vinculações engastadas e semirrígidas, em uma edificação residencial de pequeno porte. Em acréscimo, busca-se demonstrar a aplicabilidade da interoperabilidade BIM, via exportação IFC, para a geração de orçamentos estruturais comparativos.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do objeto de estudo

A presente pesquisa adotou a metodologia de estudo de caso, tendo como objeto de análise uma edificação residencial unifamiliar (sobrado) com área útil aproximada de 128 m², localizada no município de Cascavel, Paraná. Inicialmente, o projeto arquitetônico foi modelado tridimensionalmente no *software Autodesk Revit*.

O projeto arquitetônico, composto por um pavimento térreo e um pavimento superior, foi concebido e modelado tridimensionalmente também no *software Autodesk Revit*. A configuração espacial, a distribuição dos ambientes e a volumetria da edificação, que fundamentaram o lançamento da estrutura do pavimento térreo e superior, estão representadas respectivamente nas Figura 1a e 1b.



(a) (b)

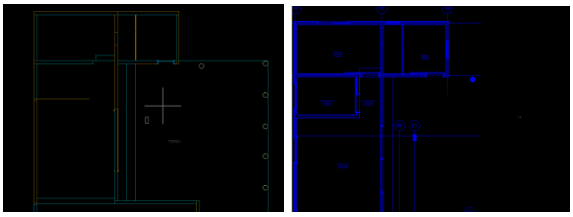
Figura 1. Plantas arquitetônicas do pavimento: (a) Térreo; (b) Superior.

Interoperabilidade BIM e importação de dados

Para viabilizar a integração entre as disciplinas, o modelo arquitetônico passou por uma limpeza de elementos gráficos secundários e foi exportado no formato IFC. O arquivo IFC foi posteriormente importado no *software* de cálculo estrutural AltoQi Eberick.

Durante esta etapa, constatou-se que o formato IFC transferiu com precisão a volumetria tridimensional e as elevações dos pavimentos, no entanto, ocorreu a perda de informações bidimensionais de referência, como as linhas de locação e as espessuras exatas de parede em planta.

Essa limitação exigiu a inserção manual de linhas de apoio no ambiente de cálculo para garantir o posicionamento exato dos eixos estruturais. O contraste na extração visual de dados entre o modelo IFC e uma planta convencional segue na Figura 2.



(a) (b)

Figura 2. Comparativo de interoperabilidade: (a) Formato IFC; (b) Formato DWG.

Concepção dos modelos estruturais

No ambiente de cálculo, a superestrutura foi concebida utilizando elementos moldados *in loco* (pilares e vigas) e lajes com vigotas pré-moldadas. Para o dimensionamento dos elementos em concreto armado, adotou-se a classe de resistência mecânica C25 (f_{ck} = 25 MPa) para o concreto usinado e a utilização de aço nas classes CA-50 para as

armaduras longitudinais e CA-60 para as armaduras transversais. Os carregamentos atuantes, compreendendo peso próprio, alvenarias e sobrecargas de utilização, foram atribuídos em conformidade com a ABNT NBR 6120:2019. Para a análise comparativa, o modelo estrutural original foi duplicado, originando dois cenários de simulação submetidos à mesma geometria e carregamento:

- Cenário 1 (estrutura engastada): considerou ligações perfeitamente rígidas nas intersecções entre vigas e pilares, bem como a continuidade dos momentos fletores negativos entre as lajes adjacentes;

- Cenário 2 (estrutura semirrígida): configurou-se pela redução da rigidez nos nós, adotando ligações semirrígidas nas intersecções viga-pilar e rotulando os encontros entre as lajes, o que impede a transferência de momentos fletores entre os painéis.

A representação gráfica desta liberação de esforços no software é detalhada na Figura 3.

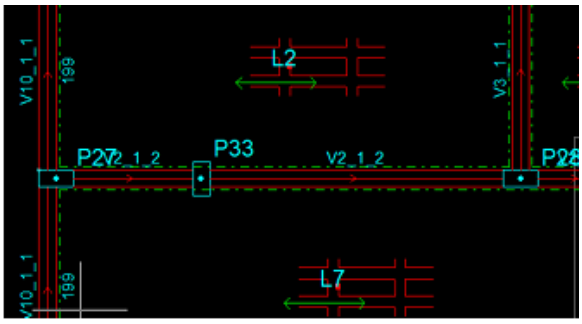


Figura 3. Representação gráfica da vinculação rotulada entre painéis de laje adotada no Cenário 2.

Extração de quantitativos e orçamentação

Após o processamento e o dimensionamento automático dos dois cenários estruturais, extraíram-se os relatórios analíticos de verificação de estabilidade (parâmetro Gama-Z), flechas dos elementos e os quantitativos exatos de materiais. A extração segmentou os volumes de concreto (m^3), as áreas de fôrma (m^2) e a massa de aço (kg), discriminada por bitola (CA-50 e CA-60) e por elemento estrutural. Para a orçamentação, a pesquisa empregou os custos unitários padronizados pela tabela do SINAPI.

Os valores monetários foram atrelados aos quantitativos de cada cenário estrutural por meio de planilhas eletrônicas, viabilizando a apuração e a comparação do custo direto de execução da superestrutura para as duas condições de vinculação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise comparativa de quantitativos e custos

A avaliação do consumo de materiais revelou que a flexibilização das vinculações estruturais produziu impactos nos quantitativos da obra. A estrutura semirrígida apresentou uma redução de aproximadamente 4,98% no consumo de aço CA-50 quando comparado ao modelo engastado, reflexo da diminuição dos momentos negativos nos apoios.

Contudo, essa perda de rigidez global exigiu o aumento da seção transversal de um pilar para garantir a estabilidade do pórtico, resultando em um acréscimo de 1,31% no volume de concreto e de 1,63% na área de fôrmas de madeira. A orçamentação baseada no SINAPI evidenciou que a economia gerada pela redução da taxa de armadura resultou em um custo total direto de R$ 95.816,80 para a estrutura semirrígida, contra R$ 98.873,23 do modelo engastado, gerando uma aparente economia inicial de aproximadamente 3,1%.

Destaca-se, ainda, a constatação de que as fôrmas representaram a maior parcela financeira em ambos os cenários (cerca de 48% a 51% do custo total da superestrutura), superando os gastos com aço (30% a 33%) e concreto (14%). Isso demonstra que otimizações focadas exclusivamente na redução de armaduras tem impacto financeiro global restrito. A Tabela 1, a seguir, compila os dados finais de custo.

Tabela 1. Comparativo de custos totais de execução entre as estruturas engastada e semirrígida.

Cen	Custo forma (R$)	Custo concreto (R$)	Custo aço (R$)	Custo laje (R$)	Custo total (R$)
1	48.069,06	13.574,06	32.387,42	4.842,70	98.873,23
2	48.760,25	13.756,25	28.457,61	4.842,70	95.816,80

Desempenho estrutural e Estado Limite de Serviço

Apesar da viabilidade financeira inicial, a análise do comportamento físico demonstrou perdas de desempenho acentuadas no cenário com nós flexibilizados. Ambos os modelos mantiveram a estabilidade global dentro dos parâmetros normativos para os carregamentos verticais estipulados, apresentando o coeficiente Gama-Z máximo de 1,05, inferior ao limite de tolerância de 1,10.

Entretanto, a estrutura semirrígida registrou um deslocamento máximo no pórtico de 1,10 cm, o que representa um acréscimo de 37,27% em relação à flecha máxima de 0,69 cm observada na estrutura engastada. A alta sensibilidade aos deslocamentos globais justifica-se pela predominância de esforços permanentes, onde o peso próprio e as cargas mortas

adicionais (revestimentos e alvenarias) representaram cerca de 95% da matriz de carregamentos verticais ensaiada. O mapeamento gráfico das deformações do pórtico semirrígido, onde se concentram as maiores translações modais, é detalhado na Figura 4.

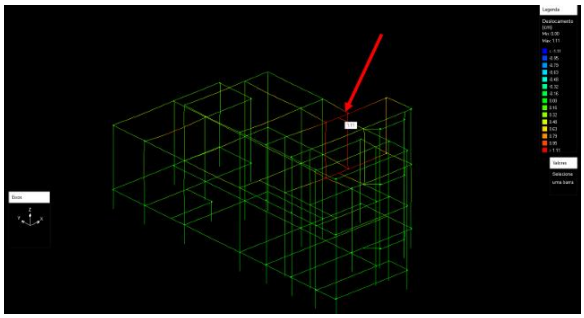


Figura 4. Mapeamento de deslocamentos do pórtico unifilar no cenário de vinculações semirrígidas.

O impacto mais crítico da ausência de engastamentos ocorreu no dimensionamento dos painéis de laje. Enquanto o modelo perfeitamente rígido registrou apenas 3 lajes com deformações excessivas fora do limite de aceitabilidade sensorial visual (relação de L/250 para o ELS), o modelo configurado com lajes rotuladas e ligações semirrígidas apresentou 10 lajes reprovadas por flechas excessivas. O quadro comparativo de peças que excederam os limites de deformabilidade normativa é sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação de painéis de laje com deformações excessivas superiores aos limites de aceitabilidade sensorial visual.

Cen.	Pavt.	Elemento (Direção)	Def.(cm)	Relação	Limite
1	Cob.	L3 (vão X)	1,02	L/154	L/250
	Pavt. 1	L3 (vão X)	1,09	L/230	L/250
	Pavt. 1	L16 (vão X)	0,41	L/208	L/250
2	Cob.	L1 (vão X)	2,63	L/158	L/250
	Cob.	L1 (vão Y)	2,63	L/160	L/250
	Cob.	L3 (vão X)	1,01	L/156	L/250
	Pavt. 1	L2 (vão X)	1,25	L/238	L/250
	Pavt. 1	L3 (vão X)	1,20	L/209	L/250
	Pavt. 1	L7 (vão X)	1,06	L/149	L/250
	Pavt. 1	L7 (vão Y)	1,06	L/185	L/250
	Pavt. 1	L12 (vão Y)	0,92	L/214	L/250
	Pavt. 1	L15 (vão Y)	0,92	L/208	L/250
	Pavt. 1	L16 (vão X)	0,96	L/88	L/250
	Pavt. 1	L16 (vão Y)	0,96	L/198	L/250
	Pavt. 1	L17 (vão X)	1,06	L/185	L/250
	Pavt. 1	L17 (vão Y)	1,06	L/248	L/250
	Pavt. 1	L18 (vão X)	1,05	L/181	L/250

Viabilidade global e análise financeira

A avaliação conjunta do orçamento e da estabilidade estrutural demonstra que a adoção de nós semirrígidos não resulta, necessariamente, em vantagem financeira real para o porte da obra estudada. A análise isolada dos quantitativos físicos revela o motivo da pequena margem econômica entre os modelos: enquanto a liberação das vinculações proporcionou uma economia de 126,29 kg nas armaduras principais (aço CA-50), a perda de rigidez exigiu o aumento da seção de pilares, incrementando 0,6 m³ adicionais de concreto e 8,0 m² extras de fôrmas de madeira no quantitativo final. Como fôrmas e concreto representam juntos mais de 60% do custo total da superestrutura, a pequena economia obtida com o aço foi pouco proveitosa.

Consequentemente, a economia direta de aproximadamente R$ 3.056,43 (3,1%) registrada no cenário semirrígido seria totalmente absorvida pelos custos de intervenção estrutural necessários para corrigir os deslocamentos excessivos das 10 lajes colapsadas em serviço. O reforço mecânico destes elementos não se limitaria à adição de aço, mas também exigiria o incremento da espessura geométrica do concreto para elevar a inércia dos painéis ou a majoração da classe de resistência característica para todo o pavimento. Deste modo, qualquer uma destas medidas inflacionaria os insumos mais onerosos da obra, anulando e invertendo a vantagem econômica inicial.

Por fim, o modelo engastado apresenta a melhor relação custo-benefício, pois atende à estabilidade exigida pelo Estado Limite de Serviço, sendo a

diferença inicial de custo justificada pela mitigação dos riscos de manifestações patológicas e pela ausência de gastos imprevistos com reforços estruturais.

CONCLUSÃO

A investigação evidenciou que a escolha do modelo de vinculação estrutural afeta diretamente o equilíbrio entre a viabilidade econômica e o comportamento físico da edificação. Embora o modelo semirrígido tenha apresentado um custo direto inicial levemente inferior na etapa de orçamentação, a expressiva perda de estabilidade do sistema, caracterizada por deformações excessivas em dez painéis de laje, inviabiliza a sua adoção prática imediata. Assim, o montante financeiro que seria exigido para reforçar estruturalmente esses elementos reprovados normativamente superaria a aparente economia gerada pela redução de armaduras nas ligações. Portanto, conclui-se que a estrutura totalmente engastada se configura como a escolha ótima em custo-benefício para este perfil de residência, pois garante o atendimento aos critérios do Estado Limite de Serviço exigindo um volume mínimo de intervenções corretivas.

A integração em ambiente BIM permitiu avaliar o desempenho e os custos de execução ainda na fase inicial de lançamento da estrutura. A interoperabilidade entre as disciplinas, viabilizada pelo arquivo no formato IFC, automatizou a volumetria e a extração quantitativa, embora a pesquisa tenha atestado a ocorrência de imperfeições práticas na leitura arquitetônica, como a supressão de linhas de locação e espessuras de parede, exigindo complementações manuais.

Contudo, a geração automatizada de detalhamentos estruturais e plantas de locação reduziu o tempo que seria dispendido em tarefas manuais de desenho em plataformas CAD bidimensionais. Apesar das limitações operacionais na transferência de dados, o fluxo de trabalho BIM cumpriu o propósito de integrar o dimensionamento técnico à análise orçamentária dinâmica, compensando a curva de aprendizado da ferramenta.

Por fim, reconhece-se a limitação estatística inerente à metodologia de estudo de caso, uma vez que a simulação foi aplicada a uma única tipologia residencial e não contabilizou os custos da infraestrutura (fundações) por ausência de dados geotécnicos.

Para expandir a compreensão sobre o impacto das vinculações estruturais, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação do comportamento do pórtico variando a resistência característica do concreto, a ampliação da simulação para edifícios multipavimentos e a incorporação da compatibilização espacial geométrica com os projetos elétrico e hidrossanitário. Esta integração multidisciplinar permitiria verificar se os incrementos nas seções de concreto exigidos pelas estruturas semirrígidas não gerariam zonas de conflito físico com as tubulações embutidas, adicionando uma nova variável de custos operacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo indispensável apoio financeiro concedido por meio de bolsa de doutorado. Esse fomento institucional garantiu a dedicação necessária para a execução das etapas metodológicas e para o desenvolvimento integral da investigação científica. Consequentemente, o suporte provido pela agência viabilizou a conclusão do estudo e a consolidação dos resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARZELLAY, B. F. C.; LONGO, O. O SINAPI como instrumento balizador de custos para a contratação de obras e serviços de engenharia realizados com recursos públicos. In: VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Anais... Rio de Janeiro: Inovarse, 2011.

COÊLHO, R. S. de A. Orçamento de obras na construção civil. 2016.

FERRAZ, M.; MORAIS, R. O conceito BIM e a especificação IFC na indústria da construção e em particular na indústria de pré-fabricação em betão. 2012.

LINO, J. C.; AZENHA, M.; LOURENÇO, P. Integração da metodologia BIM na engenharia de estruturas. 2012.

LONGO, L. F. Comparativo entre vinculações de vigas. 2019. Disponível em: https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115001285093-Comparativo-entre-vinculações-de-vigas. Acesso em: 14 dez. 2019.

MATTOS, A. D. Como preparar orçamentos de obras. 1. ed. São Paulo, 2006.

TARRAFA, D. G. P. de. Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas. Dissertação (Mestrado em Mecânica Estrutural) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.