

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PAINÉIS PRÉ-MOLDADOS DE FECHAMENTO E SUAS LIGAÇÕES EM EDIFICAÇÕES DE PEQUENA ALTURA: ESTUDO DE CASO

NUMERICAL ANALYSIS OF PRECAST CONCRETE PANEL AND CONNECTIONS IN SMALL HEIGHT BUILDINGS: CASE STUDY

Harisson Silva Freitas¹, Maria Cristina Vidigal de Lima², Vanessa Cristina de Castilho³

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

Avenida João Naves de Ávila, 2121 Campus Santa Mônica, 38400-902 Uberlândia, MG

¹Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, E-mail: hsfengcivil@gmail.com

²Professora Doutora, E-mail: macris@ufu.br

³Professora Doutora, E-mail: castilho@feciv.ufu.br

RESUMO

A construção civil tem intensificado esforços na busca e implantação de estratégias de modernização do setor, em que a racionalização dos processos construtivos tem um papel fundamental. As tendências mais notáveis relacionam-se ao emprego de sistemas, totalmente ou parcialmente pré-fabricados, capazes de maximizar o potencial de racionalização dos processos de execução. Neste contexto, este trabalho visa analisar alguns problemas importantes decorrentes do uso de painéis pré-moldados de fechamento em edificações de pequena altura ou até 3 pavimentos, muito usual no país. Os elementos de análise são os tipos de ligação painel-estrutura tanto para as ligações de gravidade quanto de contraventamento, efeitos térmicos nos painéis e nas ligações. São desenvolvidas análises numéricas utilizando o programa computacional ANSYS para modelagem do problema. O comportamento não linear físico dos materiais envolvidos é considerado nas simulações. As análises mostram que a presença de variação térmica é crítica no comportamento dos painéis e das ligações estudadas. A presença de temperatura variável resulta em deslocamentos fora do plano da estrutura e é responsável pelo aumento das tensões nos dentes de concreto dos painéis, especialmente, no caso de ligações soldadas.

Palavras-chave: painel pré-moldado, edificação, análise numérica.

ABSTRACT

The civil construction has intensified efforts in the search and implementation of strategies for the modernization of the sector, in which the rationalization of constructive processes has a crucial role. The most notable trends are related to employment of systems, wholly or partly pre-fabricated, able to maximize the potential of rationalization of enforcement proceedings. In this context, this study aims to analyze some important problems arising from the use of precast panels of closing in small height buildings or until 3 floors, application that has becoming very common in the country. The elements of analysis are panel-structure connections for gravity and bracing, vertical and lateral load, and thermal effects. Numerical analyzes are developed using the ANSYS computer program for the modeling of the problem. The physical nonlinear behavior of materials involved is considered in the simulations. The analyses show that thermal effects are critical at panels and connections considered. The presence of variable temperature results in out of plane displacements as well as increasing stress in the connections of concrete panels, particularly in the case of welded joints.

Keywords: precast panel, building, numerical analysis.

1 – INTRODUÇÃO

A construção civil encontra-se em um momento de dedicação à busca e implantação de estratégias de modernização do setor, em que a racionalização construtiva tem um papel fundamental. As tendências mais notáveis relacionam-se ao emprego de sistemas, totalmente ou parcialmente pré-fabricados, capazes de maximizar o potencial de racionalização nos processos construtivos. Perdas, atraso tecnológico, prazos, despreparo da mão de obra, não compatibilidade entre projeto e execução são problemas rotineiros que devem ser eliminados com a implantação de alternativas de racionalização da produção.

Culturalmente, as empresas de construção brasileiras caracterizam-se, no entanto, pela utilização da alvenaria tradicional como solução de fechamento, que pode apresentar maior índice de desperdício. O interesse por

alternativas de vedação aumentou depois da introdução de procedimentos para a certificação de qualidade nos processos construtivos. Há uma busca constante pela redução de perdas e do ciclo de construção, que reacenderam o interesse para a racionalização de todos os subsistemas da edificação.

Os painéis pré-fabricados são frequentemente utilizados pela construção civil na Europa, Estados Unidos e Canadá, como solução para aliar racionalização à velocidade de produção do subsistema vedação.

No Brasil, os painéis de fechamento em concreto pré-moldado também estão atualmente sendo empregados em maior escala, tanto na construção de edificações residenciais, como indústrias, escolas, edificações governamentais como fóruns e outros, sendo uma das principais vantagens a redução no tempo de montagem da estrutura, racionalização no canteiro de obra, com menor

produção de resíduos como acontece no fechamento com alvenaria.

O uso de painéis pré-moldados de fechamento tem sido estudado de forma sistemática, uma vez que o dimensionamento estrutural é altamente influenciado pelo tipo de ligação painel-estrutura, sendo esta última também passível de maior enrijecimento e capacidade de absorver efeitos de segunda ordem.

No entanto, a norma brasileira NBR 9062:2006 (ABNT, 2006) intitulada Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado é muito limitada quanto aos aspectos relativos ao uso de painéis pré-moldados de fechamento, especificamente com relação ao dimensionamento das ligações. Atualmente, uma das principais referências internacionais referente ao projeto de estruturas pré-moldadas é o PCI Design Handbook (2004). Nota-se, entretanto, uma grande carência nacional de regulamentação para projeto, sendo hoje resumida ao Manual Munte (MELO, 2004).

Trabalhos anteriores ressaltam a importância de se considerar a interação do painel de fechamento com a estrutura principal, considerando as deformabilidades das ligações e painéis (GAIOTTI, 1990; CASTILHO, 1998).

Krüger (2002) desenvolveu análises comparativas de painéis de vedação em estruturas metálicas, onde comparou o desempenho global dos painéis mais utilizados no mercado brasileiro. Os critérios de desempenho utilizados para comparação foram: desempenho estrutural, segurança ao fogo, estanqueidade à água, conforto acústico, desempenho térmico e durabilidade.

Oliveira (2002) desenvolveu um estudo sobre os diversos tipos de painéis e apresentou considerações relativas ao cálculo de juntas, ao desempenho estrutural, à segurança das estruturas, à proteção contra o fogo nas ligações, além de analisar o nível de eficiência convencionalmente utilizado na montagem dos painéis.

De acordo com o Melo (2004) em função da pequena espessura dos painéis de fachada arquitetônicos, o peso por metro quadrado pode ser comparado com a alvenaria comum. Sua utilização não provoca grandes alterações no projeto estrutural, portanto, os painéis pré-moldados podem ser utilizados em qualquer edificação. A escolha da utilização de painéis pré-moldados ainda na fase preliminar do projeto e a adoção da ligação pilar-painel pode resultar em vigas menos solicitadas, gerando assim, uma maior economia global.

Uehara e Ferreira (2005) observam em seu trabalho que as ligações por gravidade painel-viga com consolos de concreto ou consolos metálicos nos painéis são as mais indicadas para painéis de fachada em edifícios de múltiplos pavimentos. Recomendam ainda que, para painéis comerciais e industriais, o mais indicado são as ligações painel-pilar por gravidade com consolo metálico no pilar e recesso no painel. Segundo Uehara (2009) as ligações de contraventamento em barra são opções interessantes tanto do ponto de vista econômico, como em relação ao desempenho estrutural.

Lima *et al.* (2005) desenvolveram análises numéricas de painéis pré-moldados de concreto interagindo com a estrutura principal, tendo como variáveis a excentricidade

entre os painéis e os pilares, a espessura das chapas de ligação e o número de ligações entre os painéis e os pilares.

Paula (2007) fez uma análise de painéis pré-moldados com a estrutura principal, tendo como variáveis o número de pontos de ligação e a espessura das chapas de ligação, sob ação térmica.

Assim, considerando o crescente número de edificações construídas utilizando painéis pré-moldados de fechamento, especialmente em estruturas de pequeno porte, e levando-se em conta a importância de um melhor entendimento do comportamento destes sistemas estruturais sensíveis ao efeito térmico, este trabalho visa estudar o comportamento de alguns tipos de ligações usuais no Brasil (FREITAS, 2012).

Para este fim, este trabalho apresenta uma análise numérica do comportamento estrutural de fachadas de edificações de 3 pavimentos, por representarem atualmente um sistema que vem sendo muito utilizado atualmente. O sistema estrutural é formado por vigas, pilares e painéis pré-moldados de concreto, devendo ser considerada a influência dos tipos de ligações, por meio de análise linear e não linear física dos materiais envolvidos, sob a ação de carregamento vertical, vento e efeito térmico.

Para o desenvolvimento das simulações numéricas, utilizou-se o programa computacional ANSYS, baseado no Método dos Elementos Finitos.

2 – PAINÉIS PRÉ-MOLDADOS ARQUITETÔNICOS

A utilização de painéis pré-moldados de fechamento é apresentada no PCI (2004) nos tópicos relativos aos elementos arquitetônicos pré-moldados de concreto, sendo considerados como parte de uma edificação sujeitos à ação da gravidade, vento, efeitos sísmicos e outras forças. Assim como para qualquer elemento pré-moldado, o sucesso do projeto de elementos arquitetônicos exige o conhecimento de todo o processo produtivo.

Os painéis pré-moldados arquitetônicos são classificados no PCI (2004) como paredes estruturais ou não estruturais. Os painéis estruturais podem suportar tanto o carregamento da estrutura da cobertura como de pisos, podendo ser horizontais ou verticais. Os painéis não estruturais correspondem àqueles que transferem cargas desprezíveis de outros elementos da estrutura, sendo projetados para resistir a ação do vento, forças sísmicas decorrentes do peso-próprio e forças decorrentes da transferência de peso do painel para os apoios

Os painéis pré-moldados de fechamento são, portanto, de acordo com a nomenclatura usual do PCI (2004), painéis não estruturais para revestimento externo ou painéis estruturais que podem ser usados como paredes de contraventamento, compondo a estrutura destinada a resistir ações laterais.

Em painéis de fechamento, as tensões no plano do painel raramente são críticas, uma vez que a relação altura e espessura do painel e a magnitude e excentricidade do carregamento serem menores comparados aos painéis estruturais, que recebem o carregamento de lajes e coberturas. Por estas razões, a seção transversal de um

painel de fechamento é normalmente escolhida para atender razões estéticas e estruturais. No entanto, painéis com pequena espessura podem apresentar deformações excessivas, gerando problemas nas ligações decorrentes de sua curvatura, bem como patologias na fachada da edificação.

Vale ressaltar que, independente do painel ser estrutural ou não, conforme classificação do PCI (2004), o projeto das ligações é crítico e devem ser tomados cuidados no levantamento dos carregamentos decorrentes de forças laterais, excentricidade do painel, curvaturas devido à ação térmica e variações volumétricas. Todos os painéis não estruturais devem ser projetados para acomodar os movimentos livres e, se possível, sem apoios em excesso. Mais informações em Melo (2004), Uehara (2009) e Freitas (2012).

3 – MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica desenvolvida utilizando o programa ANSYS constitui-se de análise linear e não linear física de um sistema estrutural composto por vigas, pilares e painéis pré-moldados de fechamento aplicados usualmente em edificações de pequeno porte (até 3 pavimentos).

O modelo físico descrito neste artigo é designado por Modelo 1, sendo composto por uma estrutura de pórtico formada por elementos pré-moldados com 3 vãos, com pilares engastados na fundação, vigas solidarizadas aos pilares e painéis pré-moldados dispostos horizontalmente ao longo da altura da edificação, com ligações soldadas e encaixadas (Figura 1).

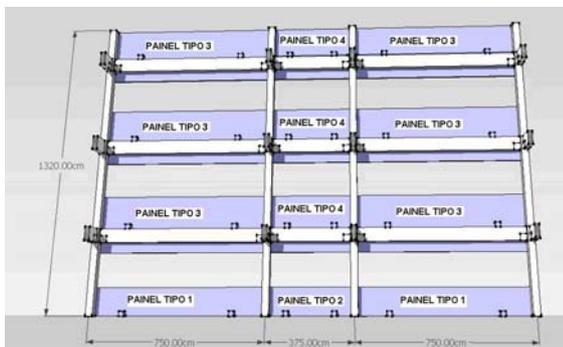


Figura 1 – Sistema estrutural do Modelo 1.

No Modelo 1, os pilares são engastados na fundação, têm dimensões 30 cm x 30 cm. As vigas estão apoiadas nos consolos dos pilares, com dimensões 20 cm x 60 cm, sendo as dimensões do dente gerber na ligação de 20 cm x 30 cm. As vigas são ligadas aos pilares por meio de ligação soldada e ligação na parte superior por barra de aço.

Os painéis são dispostos na direção horizontal, tem 9 cm de espessura, estão apoiados em sua parte inferior sobre as vigas de concreto, constituindo o apoio por gravidade de dimensões 20cm x 20cm x 20cm e chumbador metálico. A distância entre painéis considerada nas análises deste artigo é de 1 cm.

Além das ligações por gravidade, os painéis possuem ligações de contraventamento que podem ser de encaixe ou

solda.

3.1 Elementos Finitos, Critérios de Ruptura e Relações Constitutivas dos Materiais

Quanto ao desenvolvimento do modelo numérico, o concreto representado nas vigas, pilares e painéis foi discretizado utilizando o elemento finito tridimensional SOLID65, de 8 nós e graus de liberdade à translação nas 3 direções ortogonais. Uma das principais características deste elemento refere-se ao tratamento dado à não linearidade física do material. O concreto pode sofrer fissuração e esmagamento, apresentar deformações plásticas e fluência.

Foram utilizadas as taxas de armadura na matriz do concreto nas devidas direções nos elementos estruturais pilares, vigas e painéis. A inclusão das taxas de armadura destina-se a absorção de esforços axiais (tração e compressão), permitindo, também, assumir deformações plásticas devido à fluência. As taxas de armaduras utilizadas nas análises numéricas deste capítulo foram: 0,044 para os pilares na direção longitudinal (ordenada do sistema global de coordenadas), 0,01 para as vigas na direção longitudinal, 0,008 na direção longitudinal dos painéis e 0,007 para os dentes dos painéis, na direção z do sistema global de coordenadas.

Quanto às características físicas dos materiais, para o desenvolvimento da análise linear foram consideradas as seguintes propriedades do concreto $f_{ck} = 35\text{MPa}$, $E_c = 3313\text{ kN/cm}^2$ e $\nu = 0,2$ e para o aço $E_s = 20.500\text{ kN/cm}^2$ e $\nu = 0,3$.

3.2. Ligações entre os Elementos Estruturais

São descritas as seguir as considerações numéricas utilizadas para a modelagem das ligações viga-pilar, painel-pilar de contraventamento e painel-viga de gravidade.

3.2.1 Ligação Viga-Pilar

A ligação viga-pilar considerada no Modelo 1 constitui-se de uma ligação com consolo e dente gerber, por meio de solda e chumbadores (Figura 2). A ligação foi modelada numericamente utilizando o recurso de unir os nós dos elementos ligados entre si (merge) para representar as ligações soldadas. Os pontos cujos nós foram ligados estão nas laterais da viga com o consolo do pilar, na face inferior do dente Gerber, e os dois nós superiores laterais da viga junto ao pilar, representando a ligação com chumbador.

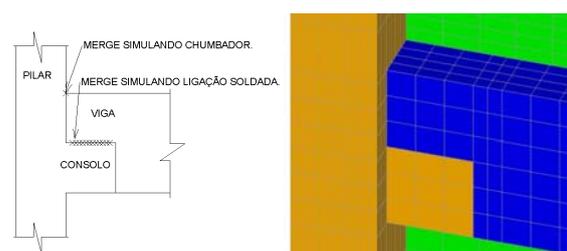


Figura 2 – Detalhe da ligação viga-pilar (consolo).

3.2.2 Ligação de Contraventamento Painel-Pilar

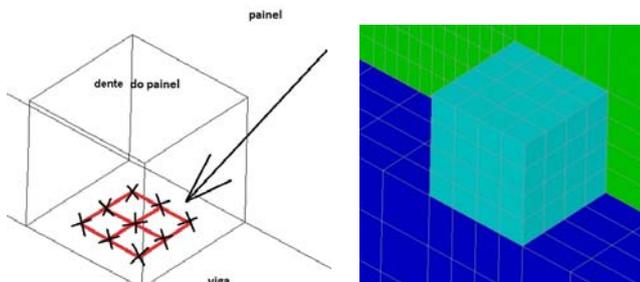
Para as ligações de contraventamento painel-pilar duas situações foram analisadas, a aplicação de ligações soldadas e ligações por encaixe. Para a modelagem, foram utilizados os recursos de unir os nós dos elementos ligados entre si (merge) para representar as ligações do tipo soldadas (Figura 3a) e o recurso de associar os deslocamentos na direção definida (*couple*), para os nós selecionados, para restringir o movimento, neste caso, na direção z, perpendicular ao plano da fachada estrutural, e representar as ligações por encaixe (Figura 3b).



(a) Soldada (b) Encaixada
 Figura 3 – Tipos de ligações de contraventamento analisadas.

3.2.3 Ligação de Gravidade Painel-Viga

A ligação de gravidade painel-viga representada pelo dente de concreto no painel foi modelada unindo os nós centrais coincidentes com os respectivos nós na viga, conforme mostra a Figura 4.



(a) Nós da ligação (b) Discretização
 Figura 4 – Ligação de gravidade painel-viga.

3.3 Carregamento

O carregamento considerado nas análises do Modelo 1 refere-se ao peso próprio da estrutura e devido ao vento (Figura 5), além de ação térmica, por meio da consideração de temperatura uniforme no valor de 30° C e, posteriormente, ação variável, sendo 20°C na parte interior da estrutura e 60°C na parte externa da estrutura. Nas análises térmicas desenvolvidas neste trabalho atuam simultaneamente o carregamento vertical, devido ao peso-próprio, e a ação do vento, conforme NBR 6123:1988 (categoria A e classe B) (ABNT, 1988). Vale ressaltar que, o carregamento foi aplicado em 10 incrementos de carga.

3.4 Condições de Contorno

A discretização do Modelo 1 baseou-se na necessidade de coincidir nós a fim de viabilizar a aplicação de recursos como, por exemplo, o de união de nós.

Todos os pilares estão impedidos de se deslocarem nas 3 direções ortogonais em sua base, bem como os dentes dos painéis do pavimento térreo estão impedidos em x, y e z. Os pilares, no ponto de encontro com as vigas transversais estão impedidos de se deslocarem na direção z do sistema global de coordenadas (direção perpendicular ao plano da fachada estrutural), o que visa considerar a presença de vigas perpendiculares ao plano em análise.

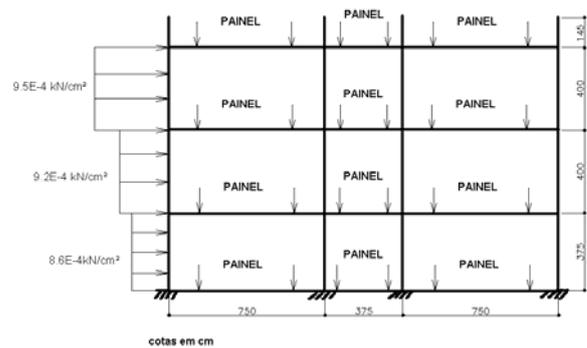


Figura 5 – Carregamento vertical e lateral.

4 – ANÁLISE LINEAR

O Modelo 1 foi analisado sob ação do peso-próprio, ação lateral do vento e efeitos térmicos, considerando 3 possibilidades de ligação de contraventamento, sendo: ambas as ligações de um painel soldadas aos pilares, a ligação de uma extremidade do painel ao pilar soldada e a outra com acoplamento e, por fim, ambas as ligações de acoplamento. A Tabela 1 apresenta um resumo das análises desenvolvidas, para análise linear dos modelos.

Nas análises térmicas desenvolvidas são considerados também a ação do vento e do peso-próprio dos elementos estruturais.

Tabela 1 – Análises desenvolvidas no Modelo 1 e nomenclatura.

	Ligação soldada/ soldada	Ligação soldada/ acoplada	Ligação acoplada/ acoplada
Peso-próprio/vento	M1-SS-PPV	M1-SA-PPV	M1-AA-PPV
Temp.constante(30°C)	M1-SS-TC	M1-SA-TC	M1-AA-TC
Temp.var. (20-60°C)	M1-SS-TV	M1-SA-TV	M1-AA-TV

4.1 Resultados da Análise Linear

Os resultados da análise linear apresentados na Figura 6 referem-se aos máximos deslocamentos nas direções x e z obtidos nas situações de ligações soldadas, acopladas e mistas. Os valores máximos das tensões de Von Mises nos pilares, vigas e painéis para as situações de análise citadas podem ser observados na Figura 7.

Com relação aos deslocamentos na direção x (abscissa) observa-se que, em geral, os deslocamentos são

maiores nas análises com ligações acopladas em ambas as extremidades dos painéis. Para análises com carregamento vertical e lateral (PPV) sem consideração de temperatura, as ligações soldadas têm menores deslocamentos na direção x (longitudinal). As ligações mistas apresentam menores deslocamentos na direção x, quando comparado com ligações soldadas e acopladas.

Nas análises térmicas sob temperatura variável e deslocamento na direção z (fora do plano da estrutura), observa-se que praticamente os valores são os mesmos para as situações das ligações consideradas, assumindo valores altos, como era de se esperar. Nas análises sob temperatura constante, as ligações soldadas resultam em maiores deslocamentos na direção z. Os menores valores acontecem nas ligações acopladas e valores intermediários nas ligações mistas. Este comportamento decorre da condição de maior rigidez da estrutura no caso de ligações

soldadas, gerando, portanto, flexão nos painéis em virtude do impedimento de deslocamento longitudinal.

Quanto às tensões de Von Mises, as análises lineares mostram que, as tensões são críticas nos dentes dos painéis, posteriormente no sistema estrutural formado pelas vigas e pilares, e menores nos painéis. É esperado que o elemento de ligação painel-estrutura seja o elemento crítico, uma vez que concentra altas tensões que serão transmitidas ao conjunto viga-pilar.

Com relação às ligações, a situação soldada tem maiores tensões, no geral. Sem ação térmica, ou seja, sob ação do peso-próprio e vento as tensões maiores concentram-se nas vigas e pilares. O mesmo comportamento observa-se para o efeito de temperatura variável. Porém, sob temperatura constante, os dentes dos painéis apresentam valores extremos, ainda mais críticos na situação de ligações soldadas.

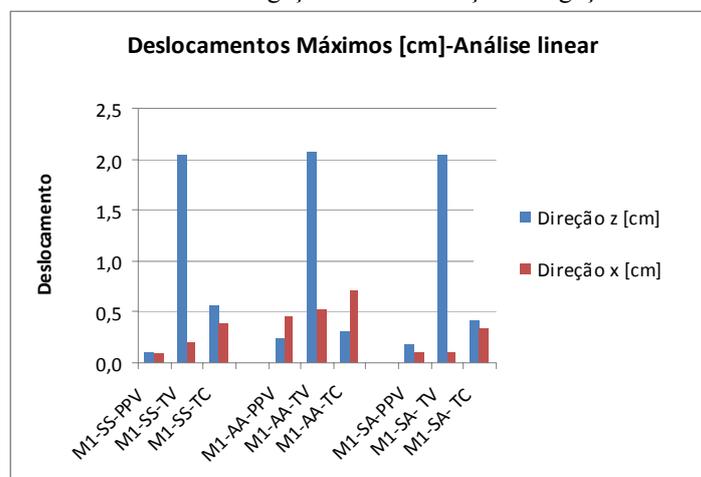


Figura 6 – Deslocamentos nas direções x e z dos modelos M1(cm).

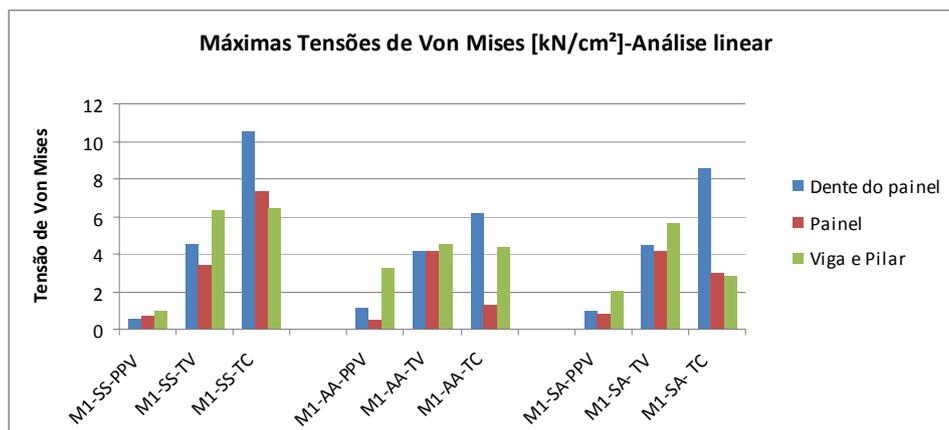


Figura 7 – Tensões de Von Mises dos modelos M1(kN/cm²).

5 – ANÁLISE NÃO LINEAR

Na análise não linear desenvolvida para o Modelo 1 o carregamento aplicado foi dividido em 10 incrementos de carga.

O critério de resistência para consideração da tração utilizado neste trabalho para o concreto foi o critério *Concrete*, baseado no critério de *William-Warnke*. Os

parâmetros necessários para considerar o critério *Concrete* são as tensões de ruptura uniaxiais de tração. Este critério prevê a ruptura de materiais frágeis, considerando os modos de ruptura devido ao esmagamento e à fissuração, por meio da consideração de estado de tensões multiaxiais.

O modelo não linear adotado para o concreto na compressão foi do tipo multilinear com encruamento isótropo (KOTINDA, 2006).

O comportamento do concreto na compressão segue a relação apresentada na Equação 1:

$$\sigma = f_{cm} \frac{k \eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \text{ para } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{c1} \quad (1)$$

sendo

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon_{c1} \quad \varepsilon_{c1} (\%) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8 \quad k = 1,1 E_{cm} |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

onde:

f_{cm} – valor médio de resistência à compressão do concreto para corpo de prova cilíndrico;

ε_{c1} – deformação correspondente à tensão máxima de compressão;

ε_{cu1} – a deformação última à compressão;

E_{cm} – módulo secante de elasticidade do concreto.

No trecho entre ε_{c1} e ε_{cu1} foi considerada uma pequena inclinação de $E_{cm}/1000$ conforme adotado por Kotinda (2006). A relação constitutiva utilizada para o aço nas análises desenvolvidas refere-se ao modelo elasto-plástico perfeito. Conforme adotado anteriormente para o concreto em Kotinda (2006), considerou-se uma pequena inclinação ($E/1000$) para o segundo trecho da curva.

A tensão de escoamento do aço adotada nas análises foi de 50 kN/cm² e a tensão última igual a 55 kN/cm².

Assim como desenvolvido na análise linear, o Modelo 1 foi analisado sob ação do peso-próprio, ação lateral do vento e efeitos térmicos, considerando 3 possibilidades de ligação de contraventamento, sendo: ambas as ligações de um painel soldadas aos pilares, a ligação de uma extremidade do painel ao pilar soldada e a outra com acoplamento (mista) e, por fim, ambas as ligações de acoplamento.

A Tabela 2 apresenta um resumo das análises desenvolvidas, para análise não linear dos modelos. Nas análises não lineares obteve-se convergência para os incrementos de carga considerados conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 2 – Resumo das análises não lineares desenvolvidas no Modelo 1 e nomenclatura.

	Ligação soldada/ Ligação soldada	Ligação soldada/ Ligação acoplada	Ligação acoplada/ Ligação acoplada
Peso-próprio e vento	M1-SS-PPV-NL	M1-SA-PPV-NL	M1-AA-PPV-NL
Temp. variável (20°-60°C)	M1-SS-TV-NL	M1-SA-TV-NL	M1-AA-TV-NL

Tabela 3 – Convergência na análise não linear do Modelo 1.

Tipo de ligação	Tipo de análise	Porcentagem carreg.convergência numérica (%)
Soldada/ Soldada	M1-SS-PPV-NL	90
	M1-SS-TV-NL	30
Acoplada/ Acoplada	M1-AA-PPV-NL	100
	M1-AA-TV-NL	60
Soldada/ Acoplada	M1-SA-PPV-NL	100
	M1-SA-TV-NL	40

6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE AS ANÁLISES LINEARES E NÃO LINEARES

Nos gráficos apresentados nas Figuras 8 a 13 considerou-se o ponto para o qual se obteve máximo valor com convergência na análise não linear e comparou-se com os resultados no mesmo ponto na análise linear.

6.1 Deslocamentos fora do plano – Direção z

Para a ação do carregamento devido ao peso-próprio e vento (PPV), pode-se observar na Figura 8, quanto aos deslocamentos na direção perpendicular ao plano do painel, decorrente de sua flexão, que o uso de ligações de contraventamento acopladas (AA) resultam em valores maiores, comparado ao uso de ligações soldadas (SS), como era esperado. Os deslocamentos em z, para o caso de ligações apenas acopladas, chegam a ser praticamente o dobro dos obtidos para as ligações rígidas.

O efeito da consideração da não linearidade física do concreto e da armadura para as análises sob temperatura variável (TV) é bastante crítico, uma vez que o incremento de carga com convergência varia entre o terceiro e o sexto valor. Neste contexto, observa-se uma tendência de comportamento semelhante, independente do tipo de ligação de contraventamento, embora a ligação acoplada AA resulte ainda em maiores deslocamentos (Figura 9).

6.2 Tensões nos dentes de concreto dos painéis pré-moldados

Nos dentes dos painéis (apoio por gravidade), as tensões resultantes foram maiores no caso de ligações mistas (AS), sob ação de peso-próprio e vento (Figura 10). Com a consideração do efeito térmico (Figura 11), observa-se que o uso de ligações soldadas resulta em tensões superiores, embora a análise tenha atingido convergência para 30% do carregamento considerado.

6.3 Tensões nos painéis de concreto

As tensões críticas nos painéis estão apresentadas na Figura 12, para o carregamento devido ao peso-próprio e vento. Incluindo o efeito térmico de variação de temperatura, as tensões variam substancialmente. Vale observar que a convergência não foi alcançada para todos os incrementos de carga, tendo sido de 30% para o modelo M1-SS-TV-NL, 60% para o modelo M1-AA-TV-NL e 40% para o modelo M1-SA-TV-NL (Figura 13). A distribuição das tensões de Von Mises para o caso do modelo M1-SS-TV-NL pode ser observada na Figura 14.

6.4 Fissuração nos modelos não lineares

A Figura 15 permite comparar o quadro de fissuração obtido nas análises não lineares do Modelo 1, para os dois primeiros painéis junto ao apoio inferior, no caso de ligações SS, SA e AA, na situação crítica das análises (caso da temperatura variável – TV).

Observa-se que, no caso de ligação SS (convergência

até o terceiro incremento de carga), o quadro de fissuração é crítico nos painéis inferiores, sendo ainda mais concentrado no painel do meio, por ser menor e apresentar maior rigidez devido às ligações (Figura 15a). A Figura 15b refere-se ao modelo M1-AA-TV-NL e a Figura 15c

refere-se ao modelo M1-SA-TV-NL. Observa-se nos dois casos que o quadro de fissuração é muito similar, atingindo a convergência, respectivamente, até o 6º e 4º incremento de carga, ou seja, 60% e 40% do carregamento aplicado.

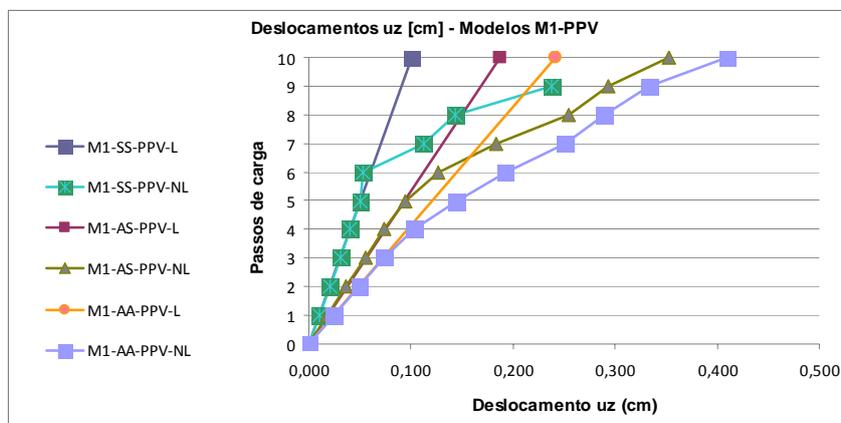


Figura 8 – Deslocamentos na direção z dos modelos M1-PPV (cm).

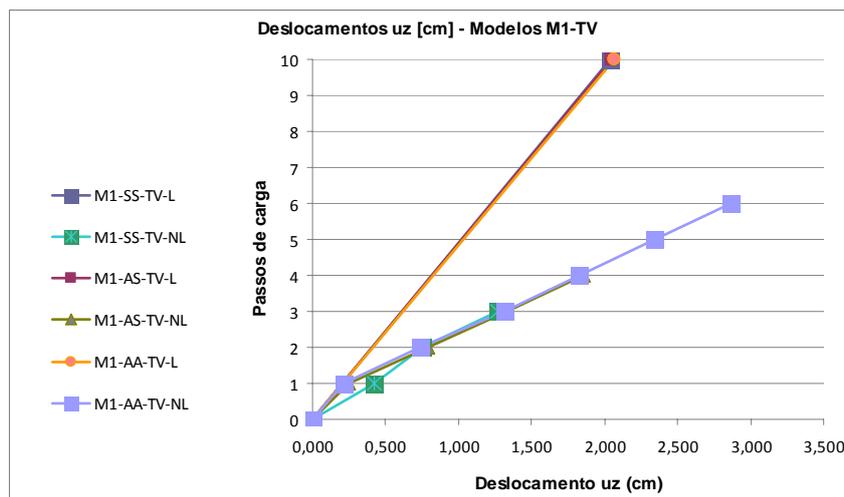


Figura 9 – Deslocamentos na direção z dos modelos M1-TV (cm).

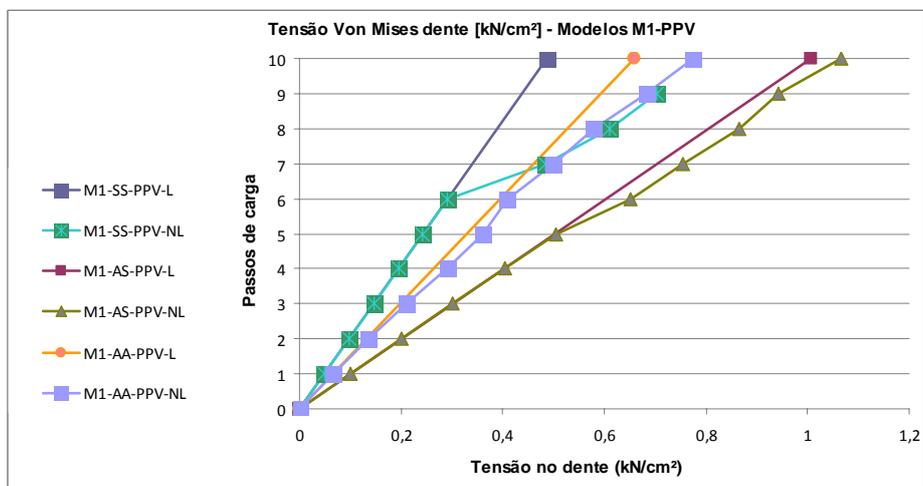


Figura 10 – Tensões de Von Mises nos dentes dos painéis nos modelos M1-PPV (kN/cm²).

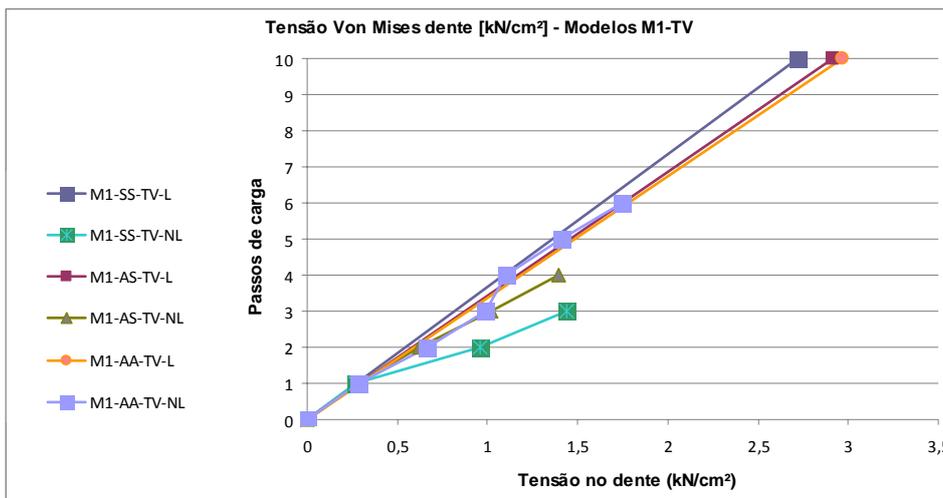


Figura 11 – Tensões de Von Mises nos dentes dos painéis nos modelos M1-TV (kN/cm²).

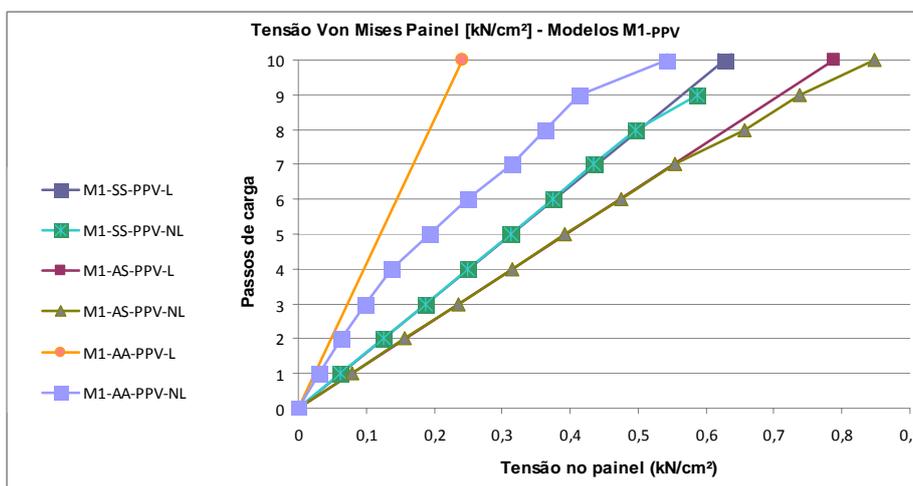


Figura 12 – Tensões de Von Mises nos painéis dos modelos M1-PPV (kN/cm²).

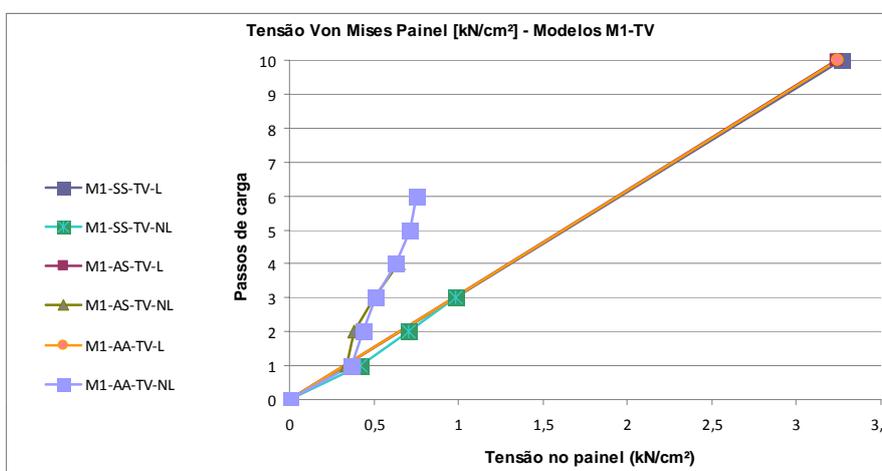
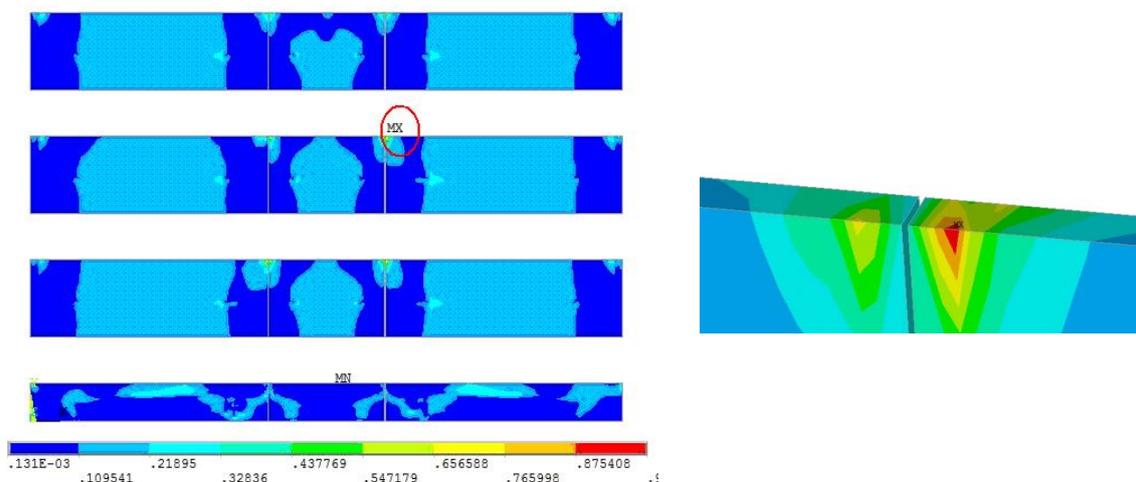
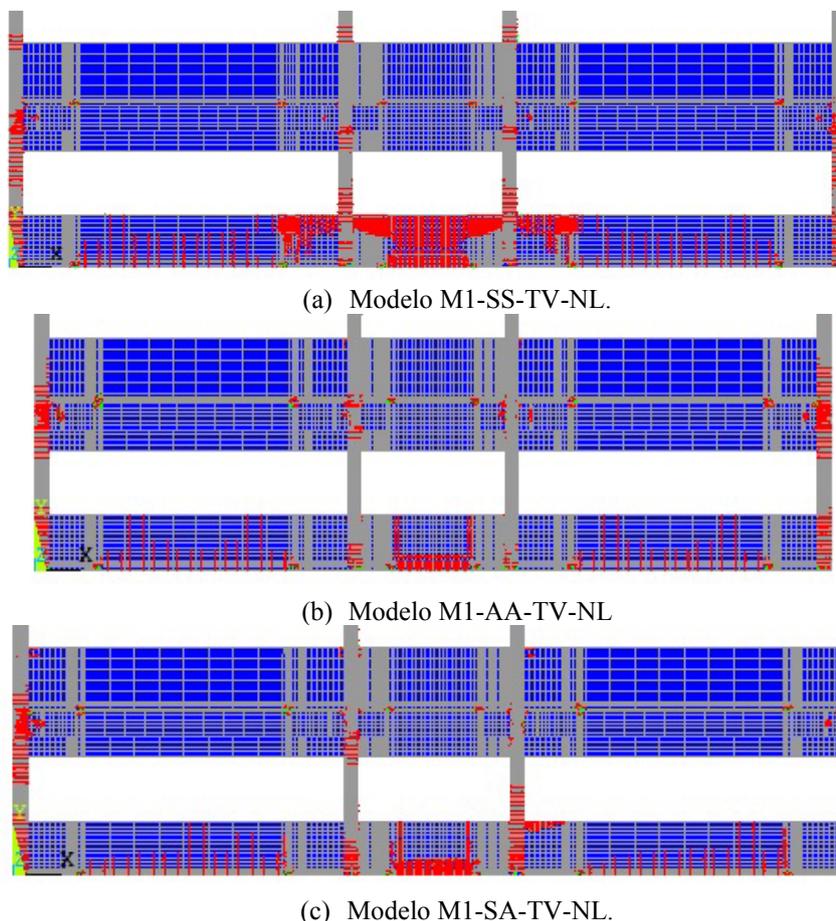


Figura 13 – Tensões de Von Mises nos painéis dos modelos M1-TV (kN/cm²).



(a) Tensões de Von Mises (kN/cm²). (b) Detalhe do ponto de máxima tensão.
Figura 14 – Tensões de Von Mises nos painéis para o caso do Modelo M1-SS-TV-NL.



(a) Modelo M1-SS-TV-NL. (b) Modelo M1-AA-TV-NL. (c) Modelo M1-SA-TV-NL.
Figura 15 – Quadro de fissuração dos painéis do 1º e 2º pavimento dos modelos M1-SS-TV-NL, M1-AA-TV-NL e M1-SA-TV-NL.

7 – CONCLUSÕES

O uso de painéis pré-moldados de fechamento tem sido utilizado de forma sistemática no país. Nestes termos, observa-se a importância de se conhecer melhor o

comportamento estrutural destes sistemas.

Sabe-se que o dimensionamento estrutural é altamente influenciado pelo tipo de ligação painel-estrutura, sendo esta última também passível de maior enrijecimento e capacidade de absorver efeitos de segunda ordem.

Devido ao crescente número de edificações construídas utilizando painéis pré-moldados de fechamento, especialmente em estruturas de pequeno porte (3 pavimentos), este trabalho avaliou o comportamento de alguns tipos de ligações usuais no Brasil, levando-se em conta a ação do vento e efeito térmico, bem como a não linearidade física dos materiais envolvidos.

As principais conclusões obtidas das análises numéricas desenvolvidas neste trabalho podem ser agrupadas como segue:

- Os resultados da análise linear para ação do peso-próprio e vento mostraram que, com relação aos deslocamentos horizontais (direção x), os valores são maiores nas análises com ligações acopladas em ambas as extremidades dos painéis (AA), tem valores intermediários no caso de ligações mistas – soldada/acoplada (SA) e valores inferiores no caso de ligações soldadas (SS);
- Nas análises lineares, observa-se que os deslocamentos na direção z, fora do plano, são críticos sob efeito de temperatura variável, chegando a ser em torno de 4 vezes superiores aos obtidos para PPV e TC;
- Nas análises lineares sob temperatura constante, as ligações soldadas resultam em maiores deslocamentos na direção z. Os menores valores acontecem nas ligações acopladas e valores intermediários nas ligações mistas. Este comportamento decorre do impedimento de deslocamento longitudinal no caso de ligações soldadas, gerando, portanto, flexão nos painéis restringidos na direção de seu comprimento e submetidos a aumento de temperatura;
- Nas análises não lineares, quanto aos deslocamentos na direção perpendicular ao plano do painel, decorrente de sua flexão, o uso de ligações de contraventamento acopladas (AA) resulta em valores críticos, comparado ao uso de ligações soldadas (SS);
- Quanto às tensões de Von Mises, as análises lineares mostram que, as tensões são críticas nos dentes dos painéis, uma vez que concentra altas tensões que são transmitidas ao conjunto viga-pilar;
- As tensões nos painéis obtidas nas análises não lineares são críticas para o caso de ligações mistas, quando submetidas ao carregamento devido ao peso-próprio e vento. Entretanto, incluindo o efeito térmico de variação de temperatura, as tensões são críticas para o caso de ligações soldadas;
- Nos dentes dos painéis, as maiores tensões resultantes foram no caso de ligações soldadas (SS) considerando o efeito da temperatura variável, embora a convergência tenha sido limitada a 30% do carregamento;
- Finalmente, o quadro de fissuração é crítico nos painéis inferiores, sendo ainda mais concentrado no painel do meio, por ser menor e apresentar maior rigidez devido às ligações. Vale ressaltar que os painéis centrais, embora menores, tornam-se limitantes do processo de convergência por apresentarem alto grau de fissuração.

REFERÊNCIAS

- 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 9062**: Projeto e execuções em concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.
- CASTILHO, V. C. **Análise estrutural de painéis de concreto pré-moldado considerando a interação com a estrutura principal**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1998.
- FREITAS, H. S. **Análise numérica de painéis pré-moldados de fechamento em edificações de pequena altura**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, UFU, 2012.
- GAJOTTI, R. **Interactive Effects of non-structural elements on the behaviour of tall building structures**. PhD (Dissertation). University of Canada, Ottawa, 1990.
- KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 114 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- KRÜGER, P. G. V. **Análise de painéis de vedação nas edificações em estrutura metálica**. Ouro Preto. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2002.
- LIMA, M. C. V.; CASTILHO, V. C.; GESUALDO, F. A. R. Efeito de enrijecimento da estrutura principal por meio de painéis pré-moldados de fechamento. In: **45º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**. Recife, Pernambuco, 2005.
- MELO, C. E. E. **Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreto**. Editora Pini: São Paulo, 2004.
- OLIVEIRA, L. A. **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC-EPUSP. São Paulo, 2002.
- PAULA, G. F. **Interação entre painéis pré-moldados de concreto e a estrutura principal por meio de modelos numéricos em elementos finitos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- UEHARA, F. N.; FERREIRA, M. A. Critérios de projeto para ligações entre painéis de fachada e estrutura. In: **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**. São Carlos, 3 e 4 de Novembro, 2005.
- UEHARA, F. N. **Diretrizes para desenvolvimento de projeto para ligações de painéis de fachada horizontais de concreto pré-moldados**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI design handbook: precast and prestressed concrete**. 6 ed., Chicago, PCI, 2004.