

Mendonça, J. V. S.¹; Grave, G. R.²

Graduandos, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil Oliveira

Júnior, L. A.³

Professor Dr., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

jv_mendonca@outlook.com¹ eng.gustavograve@gmail.com² alvarojunior@pucgoias.edu.br³

RESUMO: Esse estudo teve como intuito a análise numérica não linear pelo método dos elementos finitos da influência de aberturas em painéis tilt-up. Foram avaliados três modelos de painéis de concreto armado de classe C30: (1) um painel maciço, (2), um painel com abertura de porta e (3) um painel com abertura de janela, nos quais foi inserida uma armadura em malha composta de barras de aço de 16 mm com espaçamento horizontal de 24 cm e vertical de 30 cm. Os resultados das análises mostraram que a presença de aberturas reduz a rigidez do painel, fazendo com que as tensões aumentem de valor no modelo 3 e diminuam no modelo 2 em função das dimensões da abertura, relativamente ao modelo 1, bem como a fissuração se distribua de maneiras distintas, inclusive com presença de regiões íntegras, a depender da tipologia de painel.

Palavras-chaves: painéis de concreto tilt-up, análise numérica, método dos elementos finitos, não linearidade física.

Área de Concentração: 02 – Estruturas

1 INTRODUÇÃO

Com evolução tecnológica na construção civil e a busca de sistemas construtivos que propiciassem maior agilidade na execução das obras, foram criados processos construtivos que buscam facilitar a execução de elementos estruturais como pilares, vigas e lajes, entre outros. Um desses avanços é a tecnologia de pré-fabricação, que promoveu grande evolução na construção civil, diminuindo desperdícios de materiais e aumentando a produtividade das equipes de trabalho nas obras em comparação à execução de estruturas em concreto moldado no local. A pré-fabricação é, via de regra, a produção dos elementos estruturais fora de seu local definitivo de utilização.

Elementos de concreto pré-moldado são fabricados por meio da colocação de concreto em uma fôrma normalmente metálica, com a mesma geometria e dimensões da peça que se deseja produzir, com a armadura adequadamente posicionada em seu interior e, uma vez executados os procedimentos de adensamento e regularização da superfície da peça, tais fôrmas são levadas para cura em ambiente controlado com a finalidade de garantir a qualidade da peça em termos de sua resistência. O resultado do processo são elementos

produzidos com controle tecnológico mais rigoroso garantindo às peças qualidade superior.

Diante desse cenário evolutivo surge uma crescente demanda por mão de obra e por peças com características (dimensões, formato, etc.) específicas que, apesar de terem rápida produção (as peças normalmente são produzidas em série, pois as fôrmas metálicas têm alto índice de reutilização), controle de qualidade, entre outras vantagens, tem-se certas limitações que podem comprometer o atendimento e realização da obra. Entre essas limitações, pode-se citar a falta de disponibilidade de fábricas e de fornecedores de equipamentos em locais mais distantes, o que se torna um problema uma vez que aumentará o custo de transporte; custo de fabricação, pois as peças pré-fabricadas tem controle de qualidade melhor, o que encarece o preço final; poucas empresas especializadas no segmento, a maioria das empresas estão localizadas em grandes cidades, entre outras.

As vantagens trazidas pela pré-fabricação, sobretudo a racionalização e a agilização da obra são tão interessantes do ponto de vista gerencial que acabaram por despertar ideias que contribuíssem para evoluir ainda mais o sistema. Como exemplos dessas evoluções, cita-se a pré-fabricação em canteiro, que consiste

basicamente na aplicação das técnicas de pré-fabricação no canteiro de obras, otimizando-se o uso dos espaços e a logística do canteiro para produzir as peças. Esse sistema é executado no canteiro de obras e emprega a mão de obra local. Com isso, não há custos envolvidos com transporte e fabricação industrial, bem como suas tributações. Entre os elementos estruturais que mais se destacaram na evolução da pré-fabricação de canteiro são os painéis tilt-up, painéis estruturais construídos sobre lajes de concreto niveladas a laser cuja superfície serve de fôrma para os painéis, que após a cura e o endurecimento, são içados e conectados aos painéis adjacentes para montagem da estrutura.

Com a própria evolução dos sistemas pré-moldados e pré-fabricados pode-se remeter ao pensamento de Levinson (1976): *“De uma forma genérica, o desenvolvimento propicia o permanente aperfeiçoamento de técnicas tradicionais, fazendo-as evoluir ou substituindo-as pela criação de outras totalmente inovadoras”*. O método de construção de elementos pré-fabricados que ficou conhecido como Tilt-up, consiste na produção de grandes painéis de concreto, os quais necessitam de fôrmas desenvolvidas exclusivamente para sua produção, as quais podem ser feitas no próprio canteiro, montadas sobre um piso previamente nivelado a laser cuja superfície serve como fôrma aos painéis que, após concluídos, são içados por guindastes e conectados aos painéis adjacentes para formar paredes estruturais.

A escolha por painéis Tilt-up se dá a partir de condições que visam atender características de projetos, como grandes áreas em planta, grandes extensões de paredes no perímetro da construção, sendo mais favorável seu uso em obras de galpões, centros de distribuição, estacionamentos, hospitais, escolas, entre outros, não se limitando a estes. Esse processo oferece inúmeras vantagens, como economia, velocidade de construção, durabilidade, resistência ao fogo, baixos custos de manutenção, atratividade arquitetônica com a possibilidade de detalhamentos nos painéis e baixos custos de isolamento e expansibilidade, além da possibilidade de desmonte da estrutura e remontagem em outro local, com reutilização dos painéis.

Conforme Iglesia (2006) *“O aspecto mais importante do projeto de uma edificação em sistema Tilt-Up é o painel. Por mais simples que um painel seja, seu projeto e análise são altamente complexos. Por diversas vezes, o painel trabalha como uma placa, coluna ou mesmo, muro de arrimo, em muitas vezes todas estas funções, simultaneamente”*. Todavia, há certas dificuldades no projeto dos painéis tilt-up que fazem com que esta etapa requiera um planejamento prévio de modo a estabelecer uma sequência produtiva eficiente, obedecendo, desde o início, à filosofia do processo construtivo.

De acordo com o American Concrete Institute (ACI) a fase mais importante durante a construção da edificação é o levantamento dos painéis, visto que insertos de içamento dos painéis e escoramento devem ser bem analisados, evitando a necessidade de rasgos ou furos nos painéis. Deve ser elaborado um plano de içamento para o levantamento e manuseio dos painéis nas fases de transporte e montagem, recorrendo-se a equipamentos de transporte pesados, como as gruas e os guindastes, levando em consideração a quantidade de insertos e as dimensões do painel, o que reduzirá imprevistos, aumentará a segurança no uso dos equipamentos, das peças e das vidas envolvidas na execução do processo.

Já para o levantamento dos painéis, cuidados devem ser tomados na fase de montagem para que não sejam gerados esforços e tensões não previstos, mas que devam ser suportados estruturalmente até que os painéis atinjam sua posição final.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A construção *tilt-up*, segundo o American Concrete Institute (ACI) é *“a técnica de moldagem no local de paredes em concreto em uma superfície horizontal, em seguida levantando-as ou inclinando-as para posição final”* (ACI, 2003).

A boa execução de construções com painéis *tilt-up* requer um bom planejamento prévio, o que permite a racionalização do processo construtivo, conferindo agilidade e boa relação custo-benefício em comparação ao processo executivo tradicional, no qual as peças são produzidas fora do canteiro, em fábricas, e transportadas até o local da obra. A construção fica mais rápida e enxuta, e a reorganização das etapas construtivas altera completamente o fluxo de caixa da obra. Com isso, pode-se gerar economia pela superposição de etapas e aumento das despesas em certas etapas (como o transporte e a montagem), e ainda que no final o custo total da obra possa se tornar mais elevado em comparação ao de uma obra em pré-moldados no sistema convencional, a antecipação da entrega propiciada pela superposição de etapas pode ser particularmente interessante em certos contextos.

O sistema construtivo *tilt-up* possui uma sequência construtiva composta das seguintes etapas: implantação do canteiro de obras, com a tomada de todas as providências legais necessárias; preparação da área do canteiro; realização das instalações hidráulicas e elétricas, execuções de fundações; concretagem do piso; adensamento, regularização da superfície e cura; colocação das fôrmas sobre o piso; içamento e escoramento dos painéis; construção e montagem da cobertura; grauteamento da ligação entre painéis e laje de piso; remoção de escoras; acabamentos finais. A

Figura 1 apresenta algumas etapas do processo construtivo.

Devido às particularidades do sistema, tem-se uma grande flexibilidade do ponto de vista estético. Podem ser produzidos painéis com os mais variados formatos, cores e tipos de acabamento, permitindo que o sistema

seja interessante em aplicações diversas que abrangem obras comerciais (supermercados, galerias, shoppings, etc.), galpões industriais e centros de distribuição de produtos, clínicas e hospitais, estacionamento, escolas, repartições públicas, bibliotecas, obras residenciais (de pavimento único ou múltiplo), laboratórios, igrejas, museus, hangares, etc.

Figura 1 – Etapas do processo construtivo dos painéis tilt-up.



Locação



Fundação executada



Montagem das fôrmas dos painéis



Distribuição de armaduras



Içamento e levantamento dos painéis



Escoramento e montagem da cobertura

Fonte:

2.1 Preparação da área

Com o canteiro de obras implantado, inicia-se a “*locação da edificação, que deverá ser tal que permita o acesso de equipamentos pesados necessários aos serviços de terraplenagem, à escavação das fundações, caminhões para concretagem, guindastes e/ou guias para içamento dos painéis, bem como montagem da estrutura de cobertura*” (ACI, 2003). Com um bom planejamento de obra e para ganhar maior tempo, andamento e praticidade, o terreno de acesso aos painéis deverá estar nivelado para que não haja atrasos nem problemas no levantamento dos mesmos e nem problemas para a passagem das guias e guindastes.

Outro quesito interessante é a avaliação do terreno. Um estudo do local deve ser feito visando analisar o armazenamento do material, movimentação de equipamentos, fase de concretagem e sequência de içamento dos painéis. Esse estudo requer um planejamento logístico da construção. Neste planejamento, mapeia-se todo o canteiro de obras, analisando e escolhendo os melhores locais de acesso (entrada e saída) de equipamentos pesados e áreas de recebimento e estocagem de materiais. O local de

produção dos painéis também deve ser de fácil acesso a esses equipamentos e deve propiciar segurança às pessoas e à estrutura em execução durante o manuseio dos painéis.

2.2 Execução das fundações

Para execução desta etapa, é necessário o estudo do solo através de sondagens, o qual visa definir o tipo de fundação e, a partir dessa escolha, realizar o dimensionamento e o projeto das fundações. O estudo do solo pela sondagem deve fornecer da melhor maneira possível a variação das camadas do subsolo do terreno, devendo ser realizado conforme as recomendações normativas vigentes.

2.3 Concretagem e cura do piso.

A etapa de construção e concretagem do piso e do seu acabamento é de extrema importância, pois ele servirá de nível para a construção dos painéis e de apoio para diversos tipos de equipamentos pesados, como guindastes e guias, devido ao fato de ser feita com nivelamento a laser, com acabamento final liso, aquelas

que forem servir de fôrma para outros painéis deverão ter acabamento polido. “Ao mesmo tempo em que são executadas as lajes, as fundações dos painéis devem ser construídas. Os painéis podem ser apoiados sobre sapatas, sapatas contínuas ou diretamente sobre blocos, o que resulta em diferentes situações de apoio e exige verificações distintas” (TCA, 2016).

No momento da concretagem, o concreto deve ser sarrafeado com o auxílio de nível a laser e em seguida vibrado com a régua vibratória de modo a garantir a superfície mais plana e um bom adensamento do concreto. Uma alternativa ao uso do nível a laser juntamente com o procedimento de adensamento por régua vibratória é o uso de concreto autoadensável, que dispensará os serviços de nivelamento e adensamento e promoverá uma superfície lisa e com a planicidade requerida.

Já na fase da cura do concreto, a laje deve receber a devida hidratação para que a superfície das peças permaneça com a umidade necessária por no mínimo três dias consecutivos. Nesta fase, são aplicáveis os procedimentos de cura úmida e cura química. No primeiro, realiza-se a molhagem periódica da superfície do concreto, protegendo-a da incidência direta de radiação solar para evitar a evaporação da água de amassamento. No segundo, utiliza-se de produtos químicos específicos para gerar sobre o concreto uma película protetora que impede a evaporação da água. Essas medidas são importantes para se evitem as fissuras de retração, muito comuns em grandes superfícies, pois elas comprometerão a durabilidade da estrutura, podendo, inclusive, expor à corrosão, elementos metálicos conectados nas juntas entre piso e piso, entre piso e parede, ou entre parede e estrutura da cobertura.

2.4 Fabricação e colocação das placas sobre o piso

Os painéis podem ser moldados sobre lajes, sobre pisos e também sobre outros painéis. Geralmente o procedimento mais utilizado é a produção dos painéis sobre a própria laje, pois os mesmos serão içados, manuseados e posteriormente conectados aos demais elementos no mesmo local, reduzindo riscos durante o içamento, o manuseio e a montagem. Por outro lado, quando os painéis são produzidos sobre outros painéis ou sobre o piso, acrescentam-se aos riscos já existentes, aqueles associados à altura de levantamento do painel relativamente à cota na qual será instalado. O próximo passo é o posicionamento das fôrmas para executar os recortes das portas e janelas, escorando previamente o interior das aberturas para evitar qualquer movimento.

Detalhes arquitetônicos como relevo e textura, são inseridos também nesta etapa.

Vale salientar a necessidade do uso de desmoldantes por toda a laje antes da concretagem para a fabricação de painéis de boa qualidade, isto porque a aplicação do material facilita a separação entre o painel e a laje na ocasião do içamento e afeta diretamente a aparência da superfície do painel. Logo em seguida, a fôrma dos painéis recebe as suas armações que devem ser colocadas com a devida cautela, pois os insertos metálicos de ligação serão conectados às armaduras para assegurar o travamento das mesmas e a adequada transferência de esforços entre os elementos constituintes da estrutura. Além disso, nas armaduras também são acoplados os insertos metálicos destinados a auxiliar o içamento dos painéis e o escoramento posterior, com isso inicia-se a concretagem dos painéis.

2.5 Içamento, escoramento e acabamento final

Após a concretagem dos painéis, tendo sido alcançada a resistência mínima para o içamento definida pelo projetista, os mesmos já estão prontos para serem içados e instalados em suas posições finais. Os insertos usados para o içamento são utilizados para passagem de dispositivos de içamento, como fitas e cabos de aço, os quais são acoplados às gruas e/ou guindastes por meio de sistemas de travas que podem ser abertas através do movimento da alavanca na direção oposta, evitando a necessidade de escalar para desconectá-las, já as escoras são conectadas antes do içamento e devem ser posicionadas adequadamente ao piso para dar estabilidade ao painel, bem travadas para evitar qualquer tipo de movimentação.

É importante verificar a simetria dos insertos para que o painel se levante uniformemente em ambos os lados, de tal forma que o número de pontos de içamento permita que o painel tenha condições isostáticas ou hiperestáticas de apoio que não gerem momento fletor em quaisquer seções do painel que ultrapassem o momento de fissuração. “Para facilitar a rotação do mesmo, a localização final dos insertos deve posicionar o centro de içamento distante do centro de gravidade do painel, aproximando-se do topo do mesmo” (ACI, 2003). Também é importante evitar esquemas de içamento que apresentem balanços de grandes vãos pelas razões já expostas.

Com os painéis levantados, os espaços entre eles devem ser pequenos para facilitar o alinhamento entre eles e para não haver contato um com o outro, proporcionando a estabilidade da edificação. Com todos os painéis posicionados, executam-se as ligações entre painéis, entre painéis e fundação, entre painéis e lajes acima do piso e entre painéis e estrutura de cobertura. Especificamente nas conexões entre painéis e fundações, é recomendado aplicar um material selante entre os painéis para garantir a impermeabilização das

juntas e acomodar movimentos de expansão e contração das paredes.

Com todas as conexões prontas, painéis levantados, escoras posicionadas e travadas, executa-se o acabamento final de acordo com as recomendações do projeto. Na sequência, instala-se a cobertura, que normalmente é executada em concreto pré-moldado ou estrutura metálicas.

2.6 Considerações sobre o comportamento estrutural dos painéis

Os painéis pré-moldados para fechamento da edificação são apresentados no Prestressed Concrete Institute (PCI) como elementos arquitetônicos pré-moldados de concreto. Os mesmos são considerados como parte do edifício que estão sujeitas a ação do peso próprio, dos ventos, efeitos sísmicos, efeitos térmicos e é necessário salientar a importância de se ter um conhecimento prévio de todo o processo produtivo e do comportamento que o painel irá exercer na fase de concepção de projeto.

Os painéis são classificados pela PCI como paredes estruturais e não estruturais, de tal forma que os estruturais podem suportar o carregamento da estrutura de cobertura, como pisos, enquanto os painéis não estruturais são aqueles que transferem cargas desprezíveis de outro elemento estrutural, tendo como principais funções a vedação e a estética. A partir disso, as considerações estruturais de um painel *tilt-up* são compostas por forças em três direções:

1. Forças verticais gravitacionais: as cargas impostas pela estrutura do telhado, piso e o peso próprio do painel tendem a causar flexão ou causar sobrecarga na compressão (quanto mais fino o painel maior a chance de ocorrer a flexão, acompanhada ou não de flambagem a depender da altura e da esbeltez do painel).
2. Forças laterais: podem ser incluídas as ações dos ventos e as sísmicas e também tendem a flexionar o painel, que para resistir à flexão se estende como uma laje plana entre os pontos de apoio.
3. Forças de torção: essas forças atuam no plano do painel, paralelamente a ele, e tendem a fazer com que o painel se torça ou deslize sobre sua fundação. Nesse caso o painel atua como uma parede de cisalhamento.

A resistência a essas três forças é fornecida pelas características do painel, tais como: espessura, armação interna e a resistência dos materiais envolvidos. O comportamento estrutural dos painéis pode ser dividido em diversos subtópicos, como:

2.6.1 Efeitos de sismos

Yuniarsyah *et al* (2017) realizaram estudo sobre paredes de concreto armado com baixa taxa de armadura sujeitas a ações sísmicas com o intuito de analisar a influência das aberturas na resistência das paredes em edifícios residenciais. Para isto, realizaram um estudo experimental com três amostras de paredes aprimoradas para apresentar menor cisalhamento causado pela atividade sísmica nas paredes de concreto armado. Os experimentos conduzidos por Yuniarsyah *et al* (2017) incluíram quatro amostras de parede: modelo NSW2 com ruptura por cisalhamento, modelos NSW2A, NSW2B e NSW5, que apresentavam maior capacidade de cisalhamento e o modelo NSW5 havia teve aumento de ductilidade à flexão. A espessura da parede de todas as amostras era de 120 mm, comprimento da parede de 1050 mm, altura da parede de 2100 mm. Nos modelos NSW2A e NSW2B a espessura de parede foi acrescida de respectivamente 80 mm e 60 mm. Yuniarsyah *et al* (2017) concluíram que todas as amostras cujos projetos foram aprimorados apresentaram menos danos em comparação com a amostra do protótipo (NSW2, referência). Para os modelos NSW2A e NSW2B fissuras apareciam apenas nas porções superiores e inferiores do painel de parede, enquanto no modelo NSW5 as fissuras se espalhavam pela altura da parede. A adição de fibras ao concreto dos painéis melhorou o comportamento mecânico das paredes e o controle do processo de fissuração, pois impediu a formação de fissuras na parte central do painel.

2.6.2 Colapso progressivo

De acordo com um estudo realizado por Borges (2018) colapso progressivo é um tipo de ruína que se propaga por grande parte da estrutura a partir de um dano localizado, gerando danos de proporção muito maior do que a esperada inicialmente. Esse evento está associado a ações excepcionais, como explosões, ações provocadas por práticas impróprias como erros de construção ou manutenção.

Os sistemas de paredes estruturais com painéis pré-moldados possuem significativa sensibilidade ao colapso progressivo, visto que, caso haja danos na estrutura dos painéis, o mesmo pode ser desestruturado, sofrendo ruptura local, que gerará acréscimo de cargas nos painéis subjacentes e consequentemente poderá causar a ruptura dos mesmos.

Atualmente, as normas técnicas já exigem para os edifícios compostos de elementos pré-fabricados a análise e dimensionamento para a situação de colapso progressivo e, na existência de probabilidade considerável de ela ocorrer, a previsão de armaduras específicas para combatê-lo e outras decisões de projeto

que contribuam para minimizar os riscos de colapso total, como a adoção de elementos robustos no contraventamento da estrutura, a previsão de caminhos alternativos para a transferência de cargas, análises mais precisas utilizando as tecnologias em constante aperfeiçoamento, etc.

2.6.3 Fissuração

Popescu *et al* (2015) realizaram uma revisão sistemática dos avanços obtidos nos métodos de projeto de paredes de concreto armado monolíticas e em pré-fabricadas, com e sem aberturas, submetidos a aplicação de cargas axiais em suas extremidades. A partir de resultados de estudos anteriores, Popescu *et al* (2015) elaboraram um banco de dados para possibilitar a avaliação estatística da confiabilidade dos modelos de painéis existentes. Várias características do projeto foram destacadas, tais como a posição das aberturas, incluindo o tamanho delas, suas características geométricas entre outros. Também foi analisado o desempenho de polímeros reforçados com fibra no reforço das aberturas das paredes.

Através da análise estatística desses estudos experimentais já existentes, Popescu *et al* (2015) mostraram a existência de lacunas de conhecimento para as quais mais testes são necessários para consolidar o conhecimento já existente e aumentar a confiabilidade dos projetos atuais, por exemplo o conhecimento que já se tem sobre o comportamento estrutural de painéis com aberturas e excentricidades diferentes. Porém o banco de dados atual se faz útil porque destaca áreas em que os estudos atuais não são focados, para os quais estudos sistemáticos podem fornecer informações importantes sobre o comportamento típico de paredes com poucos estudos, como exemplo, painéis com excentricidade acima de um sexto da espessura de paredes sólidas com elevada esbelteza.

Outra lacuna que Popescu *et al* (2015) encontraram não é muito abordada pelas disposições de projetos existentes são os painéis com presença de abertura tais como portas e janelas, e a influência que as armaduras terão nas aberturas. Portanto a realização de programas experimentais e de estudos numéricos pelo método dos elementos finitos ou outros métodos são importantes para obter respostas para as dúvidas da comunidade técnica.

A aplicação de polímero reforçado com fibra, conhecidos como “*fiber reinforced polymer*” (FRP) foi reconhecida como uma alternativa viável para o reforço de estruturas de concreto e de paredes que foram “enfraquecidas” pela presença de aberturas. Todos os estudos presentes na literatura usaram painéis projetados já com tais aberturas, e não aberturas criadas em painéis maciços. Desta forma, são necessários

procedimentos de projeto e planejamento claros e seguros para reforçar as paredes que adquirirem aberturas após terem sido construídas.

Como complemento, outro estudo relacionado a esse assunto foi feito por Fragomeni *et al* (2011), no qual quarenta e sete painéis de concreto armado com as mais variadas configurações de aberturas foram testados sob ação de carregamento unidirecional e bidirecional, cujos painéis de teste possuíam esbelteza de 30, 35 ou 40. Esses painéis foram submetidos a uma carga axial uniformemente distribuída com excentricidade de um sexto da espessura da parede ($t/6$).

Após destacar a configuração inicial, também foram relatados os padrões típicos de fissuração, como ocorreram as falhas e o comportamento de deflexão sob carga nos painéis testados. O experimento resultou na conclusão de que os padrões de fissuração dependem da configuração da abertura e das condições de apoio. Os painéis com cargas bidirecionais possuem a fissuração cerca de duas a quatro vezes mais intensa do que nos painéis similares, porém com cargas unidirecionais.

2.6.4 Estudos sobre modelagem de painéis de concreto com aberturas

Guan (2010) utilizou análise não linear pelo método dos elementos finitos em camadas para realizar um estudo comparativo de sete paredes de concreto, com e sem janelas e abertura de portas. A pesquisa de Guan (2010) incluía também três análises paramétricas para investigar a influência do tamanho, do comprimento e da altura da abertura na deflexão final de vinte painéis de parede de alta resistência, com vinculação definida de duas formas distintas: parede suportada na parte inferior e superior e paredes apoiadas nos quatro lados. Os estudos e testes em paredes com aberturas indicaram que em razão da suscetibilidade à flambagem e aos severos quadros de fissuração normalmente observados, sobretudo na vizinhança das aberturas, as características da falha são imprevisíveis.

Os resultados encontrados por Guan (2010) demonstram que o aumento nas dimensões da abertura diminui a força axial máxima que eles são capazes de suportar de diferentes formas para as paredes apoiadas em dois lados ou quatro lados: aumentar o comprimento da abertura diminui a força axial; aumentar apenas a altura da abertura tem pequeno impacto na capacidade da carga final. As paredes analisadas submetidas a estados biaxiais de tensão tem uma força aumentada em comparação com aquelas sujeitas a estados de tensão uniaxiais devido a restrição lateral, no entanto, o acréscimo de força se torna pequeno para aberturas de grandes dimensões. Os resultados confirmaram ainda que a situação mais crítica é aquela na qual se aumentam simultaneamente a altura e largura da abertura no painel.

Saheb e Desayi (1990), utilizaram o método de elementos finitos em camadas com análise não linear para avaliar seis configurações diferentes de painéis com aberturas de portas e janelas, e com todas as características geométricas semelhantes. Esses autores comprovaram a eficácia do modelo computacional através da comparação com os dados experimentais, observando as deformações, os padrões de fissuração bem como forças máximas dos modelos avaliados. Saheb e Desayi (1990) mostraram que os painéis testados exibiram fissuras que se propagaram dos cantos das aberturas para os cantos dos painéis, dividindo os em seções triangulares. É importante ressaltar que no modelo numérico foram previstos apenas as direções da fissura e não o comprimento e largura. Com todos os modelos analisados pelo MEF, Saheb e Desayi (1990) observaram que as fissuras se propagam de uma maneira similar e que um maior número de fissuras é encontrado nas regiões tracionadas do modelo, o que já era esperado.

As observações experimentais de Saheb e Desayi (1990) também mostram a deflexão lateral dos painéis.

Contudo, existem discrepâncias que se dão pelo fato de que o modelo computacional é uma idealização de um

modelo físico. Os resultados do estudo de Saheb e Desayi (1990) validaram o modelo computacional criado com auxílio do MEF e, de forma geral, apresentaram estreita correlação com os resultados experimentais dos modelos testados experimentalmente.

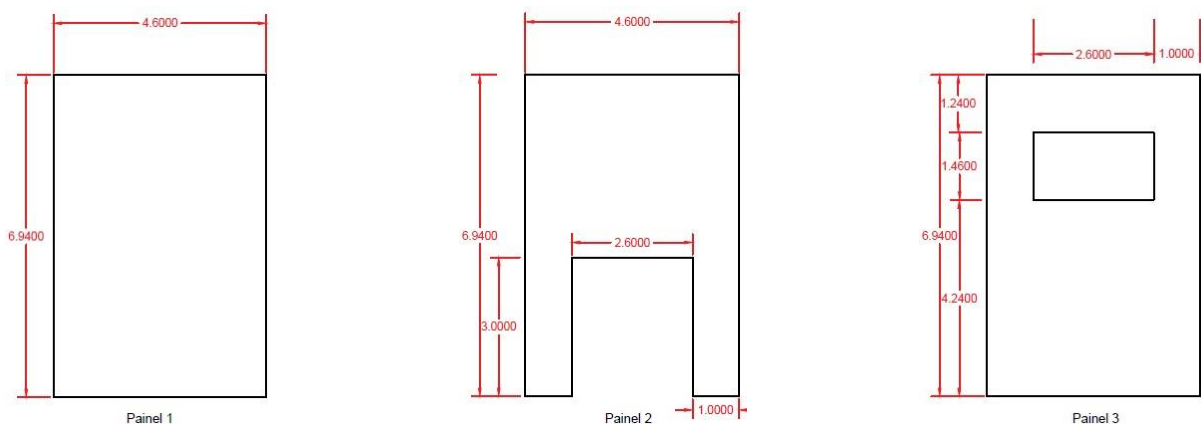
3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na modelagem computacional de painéis tilt-up de concreto armado com um painel sem aberturas, um painel com abertura de porta e outro com abertura de janela. A análise numérica considerou as não-linearidades física (NLF) e geométrica (NLG). A modelagem foi realizada na versão educacional 9.3 do programa Diana®, no modelador bidimensional. Os itens a seguir explicam melhor as etapas da modelagem deste trabalho.

3.1 Geometria e variáveis do estudo

A figura 2 ilustra as dimensões e configurações dos painéis analisados neste trabalho, mostrando as posições das aberturas e suas respectivas dimensões.

Figura 2 – Dimensões e configurações dos painéis analisados.



3.2 Propriedades dos materiais

O concreto foi considerado como material isotrópico cujo comportamento em regime elástico linear fica definido pelo seu módulo de elasticidade de 26,7 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2. Em regime não-linear, o concreto foi tratado como material frágil, com lei de amolecimento linear na tração e amolecimento parabólico na compressão, tendo como parâmetros do regime não linear a resistência à tração de 2,96 MPa, energia de fraturamento elástico linear de 54 N/m (Calculado a partir do CEB-FIP, 1990, supondo agregados de dimensão máxima característica de 8mm) e resistência à compressão de 30,45 MPa. A análise

considerou o modelo de fissuras fixas baseado em deformações totais (“*Total Strain Fixed Crack*”), um dos modelos de fissuração distribuída existentes no programa. Por sua vez, o aço foi considerado como material isotrópico cujo comportamento em regime elástico linear foi definido pelo seu módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

Em regime não-linear, o aço foi tratado como metal cuja superfície de ruptura era governada pelo critério de von Mises, admitindo comportamento elastoplástico perfeito.

As armaduras foram representadas com auxílio do reforço, os quais não são elementos finitos, mas

permitem modificar a rigidez dos elementos finitos atravessados pelo reforço de tal forma a simular a presença de armadura no local. A armadura era composta de barras de 16 mm de diâmetro, com espaçamento horizontal de 24 cm e vertical de 30 cm.

3.3 Malha e condições de contorno

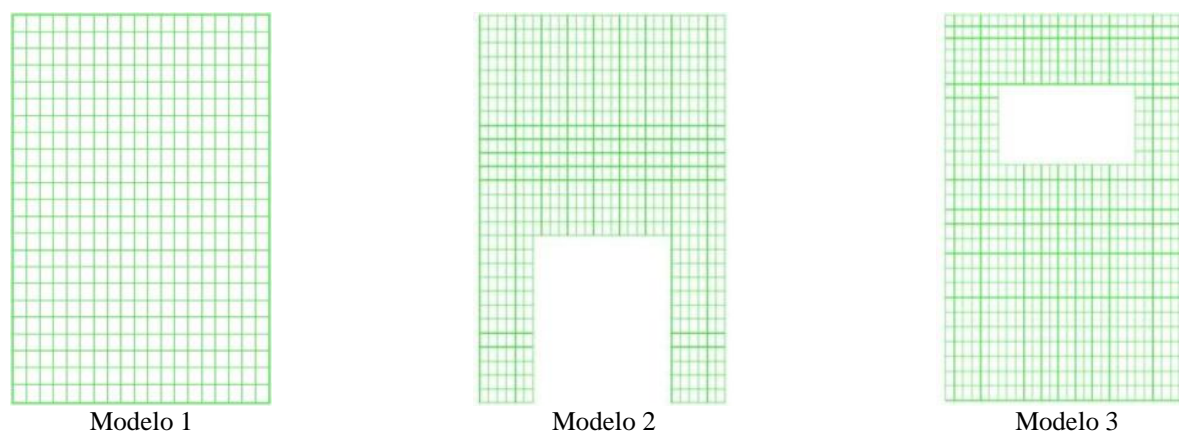
O modelo contempla dois materiais: concreto e aço. Para representar esses materiais foram empregados elementos finitos de membrana Q8MEM, que possuem 4 nós, cada um com 2 graus de liberdade nodais representativos das translações em X e Y (TNO Diana, 2010).

O número de elementos finitos foi definido de forma a obter a malha mais refinada possível dentro do limite estabelecido pela versão educacional do programa, que é de 1000 elementos.

Os painéis foram considerados engastados na borda inferior e livres nas bordas laterais a fim de permitir a avaliação da capacidade resistente de cada painel de forma isolada, desconsiderando eventuais forças horizontais que pudessem ser induzidas por painéis adjacentes. O carregamento, por sua vez, foi aplicado uniformemente distribuído na borda superior do painel.

A figura 3 apresenta a malha dos modelos analisados.

Figura 3 – Malha de elementos finitos dos painéis analisados.



3.4 Análise numérica

Análises não lineares geram sistemas de equações não lineares. Desta forma, para a solução numérica do problema, foi empregado o método de Newton-Raphson convencional (com atualização da matriz de rigidez), considerando carregamento aplicado em 400 passos de carga, 250 iterações por passo de carga e 500 buscas lineares para acelerar a convergência das iterações, já que a análise realizada precisa ser do tipo incremental iterativa. Adicionalmente, para contornar eventuais problemas de *snap-back* e *snap-through*, muito comuns em simulações de estruturas que manifestam algum mecanismo de instabilidade estrutural (caso da flambagem), foi empregado o método do comprimento de arco, com 100 iterações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Deslocamentos

A figura 4 apresenta os deslocamentos observados para os modelos 1, 2 e 3. Observa-se que no modelo 1, que se refere ao painel maciço, ocorreu concentração de deslocamentos na parte superior do painel onde está aplicado o carregamento, percebe-se também, que esses

deslocamentos vão diminuindo com a proximidade à da base do painel, que está com seus deslocamentos restritos.

Observa-se ainda o efeito de arqueamento dos deslocamentos na porção central do painel maciço que se deve à restrição imposta pela vinculação. Ela ocorreu porque essa restrição aos deslocamentos está aplicada somente na base do painel, mas não em suas laterais, de modo que nelas há liberdade para o deslocamento ocorrer. Desta maneira, o modelo apresenta pequenos deslocamentos laterais decorrentes do efeito Poisson, isto é, a compressão vertical gera encurtamento vertical, mas expansão lateral em função da tração horizontal que surge perpendicularmente à direção da compressão.

Observa-se variação de 2,74 mm a 27,4 mm no deslocamento ao longo do modelo maciço, estando a maior porção dele submetida a deslocamentos da ordem de até 5,48 mm. No modelo de painel 2 o efeito de arqueamento dos deslocamentos se tornou mais evidente em razão da presença de uma abertura representativa de porta. Como a base do painel estava com os deslocamentos restritos, a faixa que permitia a uniformização do campo de deslocamentos se arqueou de tal forma a ser maior na lateral externa do painel e menor no interior da borda da abertura. A concentração

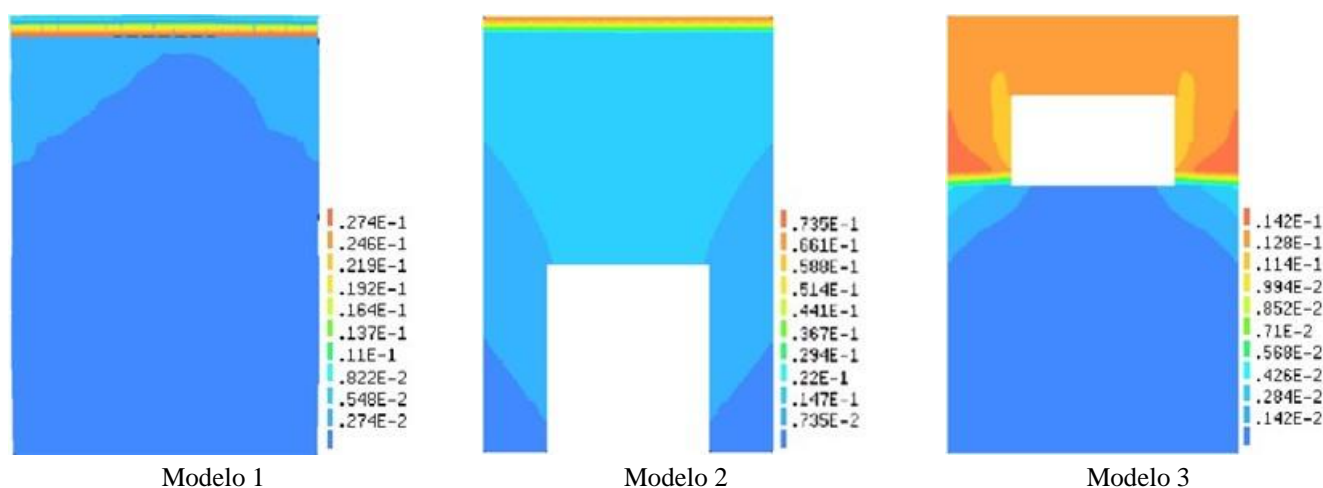
de deslocamentos no topo do painel, assim como no modelo maciço, ocorreu em virtude de ter sido imposto deslocamento na modelagem.

Nota-se também que a intensidade dos deslocamentos no modelo 2 foi maior em razão da abertura, que reduz a rigidez do modelo. No modelo 2, os deslocamentos variaram de 7,35 mm a 14,7 mm, estando a porção acima da abertura sujeita aos maiores deslocamentos. Já no modelo 3 nota-se que a presença de abertura na parte superior interferiu no campo de deslocamentos desse modelo a ponto de evitar a concentração de deslocamentos no topo. Isso provavelmente ocorreu em função das dimensões da abertura, que forçou os deslocamentos a se dividirem de maneira mais homogênea do topo do painel à base da abertura, apresentando também arqueamento em direção às bordas da abertura. Abaixo da abertura, com vão

constante para distribuir os deslocamentos, estes se arqueiam em direção às laterais devido à existência de restrição aos deslocamentos na base e liberdade de movimento nas laterais.

No modelo 3, os deslocamentos variaram de 1,42 mm na porção inferior até 14,2 mm acima da região da abertura, estando a maior parte do modelo sujeita a deslocamentos de 1,42 mm. De forma geral, percebe-se que os deslocamentos tolerados pelos modelos foram tanto maiores quanto maiores as rigidezes desses modelos, tal como era esperado. Entre os dois modelos com aberturas, aquele com abertura de porta apresentou maiores deslocamentos que aquela com abertura de janela em função da região de restrição aos deslocamentos ter sido menor.

Figura 4 – Deslocamentos observados (em m).



4.2 Tensões principais

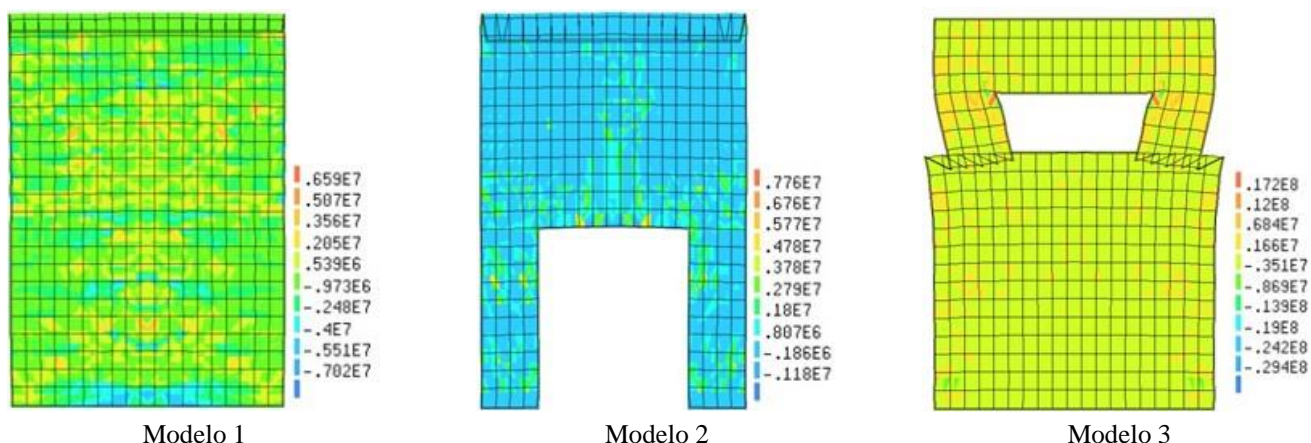
A figura 5 apresenta as tensões principais menores (S1) observadas para os modelos 1, 2 e 3. Observa-se o modelo 1 apresenta uma concentração de tensões na região do apoio que é devida à presença dos movimentos restringidos na base do painel. As tensões se distribuem em trajetórias que surgem da região da base em que ocorre arqueamento moderado das tensões e seguem verticalmente em direção ao topo do painel pela porção central do mesmo. Ao atingir o plano médio do pilar, surgem tensões de tração de baixa intensidade que atingem toda a largura do painel. O tamanho do elemento finito foi um aspecto que dificultou a obtenção de maior clareza no aspecto da distribuição das tensões. Contudo, em função da limitação do número de elementos da malha, esta era uma dificuldade que não foi possível ser superada de forma que os demais modelos tivessem também as mesmas características. No modelo 1, as tensões são prioritariamente de compressão (tensões negativas), variando de

aproximadamente 1 MPa a 7 MPa. No modelo 2, as tensões se distribuem de forma mais homogênea nas faixas de painel à esquerda e à direita da abertura. Surgem tensões na direção horizontal (tração) até aproximadamente 1 m acima da borda superior da abertura, seguindo após essa região, uma trajetória vertical pelo centro do painel em direção ao topo deste, quando nova concentração de tensões é notada em decorrência da região de aplicação dos deslocamentos impostos. As tensões de compressão no modelo 2 variaram de 0,2 MPa a 1,12 MPa. Por outro lado, as tensões de tração foram mais significativas, atingindo valores da ordem de 0,8 MPa a 7,8 MPa. Nota-se que apesar de as tensões de tração terem sido mais significativas, elas estão concentradas em certas regiões do modelo, sobretudo na borda superior da abertura. No modelo 3, as tensões são prioritariamente de compressão, atingindo valores da ordem de 3,5 MPa, ao passo que em pequenas regiões as tensões de tração atingiram valores da ordem de 7 MPa, chegando a 17,2 MPa nos cantos superiores da abertura. Estes valores

não têm sentido físico, pois superam a resistência à tração do material. No entanto, são comumente

observados em cantos, por estes serem regiões de intensa perturbação no campo de tensões.

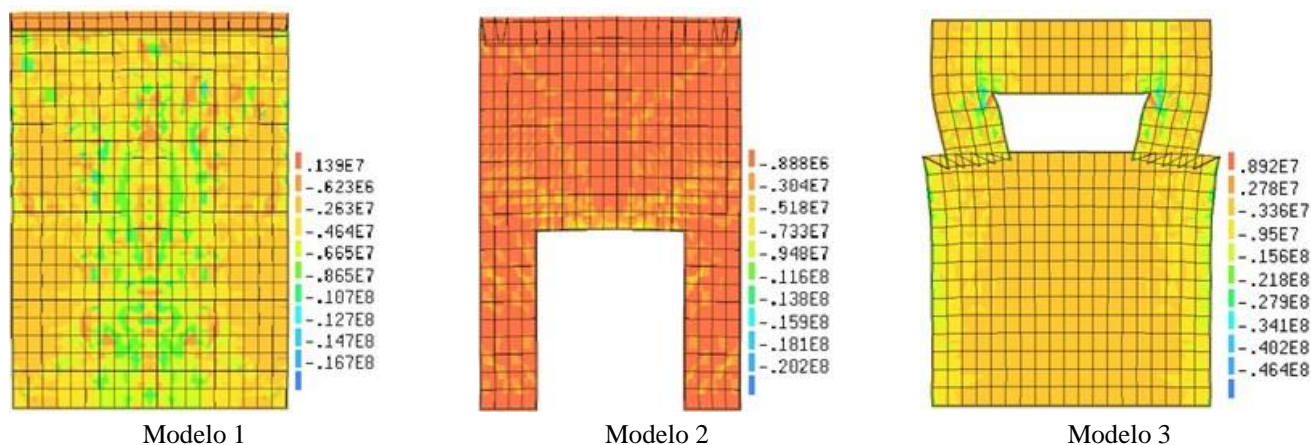
Figura 5 – Tensões principais menores (em Pa).



Por sua vez, a figura 6 apresenta as tensões principais maiores (S2) obtidas para os modelos analisados. Observa-se que no modelo 1 as tensões seguem trajetória aproximadamente vertical do centro do painel na base em direção ao topo, apresentando ramificações dessa trajetória em direção às laterais à meia altura do painel, bem como em direção aos cantos no topo e na base, as quais caracterizam bielas de compressão que, no modelo 1, não estão muito evidentes em razão do tamanho do elemento finito adotado. As tensões neste modelo são prioritariamente de compressão e variam de 0,6 MPa até 16,7 MPa. No modelo 2, a presença da abertura contribuiu para a maior clareza na distribuição das tensões. Notam-se bielas de compressão inclinadas

nas faixas laterais à esquerda e à direita da abertura, bem como na porção superior do painel, surgindo do centro do painel em direção às laterais. Essas bielas são indicadas pelas regiões mais claras no modelo 2. As tensões são todas de compressão e variam de -0,8 MPa até 28,2 MPa. Por sua vez, no modelo 3, as tensões no painel, prioritariamente de compressão, distribuem-se de maneira uniforme na porção central do painel compreendida abaixo da abertura e acima dela. Nas porções laterais, ocorreram diferenciação nos valores das tensões, embora sem uma trajetória definida. Concentrações de tensões continuam sendo notadas nos cantos superiores da abertura.

Figura 6 – Tensões principais maiores (em Pa).



4.3 Panoramas de fissuração

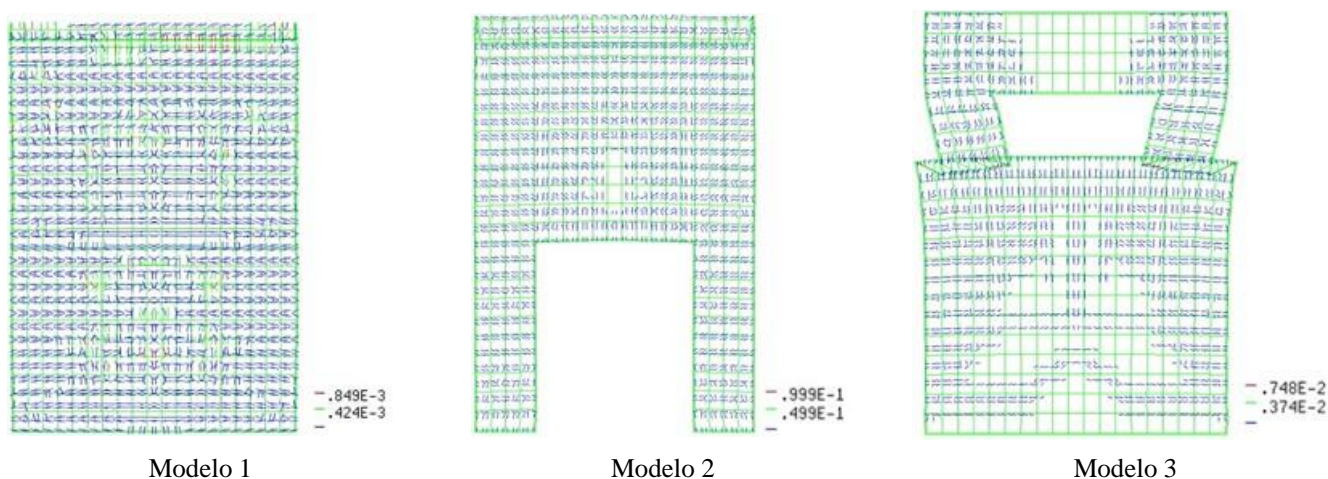
A figura 7 apresenta os panoramas de fissuração obtidos para os modelos 1, 2 e 3. Os panoramas de fissuração são caracterizados por discos alinhados com a direção das tensões de tração que produzem as fissuras. Em

razão da abordagem utilizada na modelagem, ao ser adotado um modelo de fissuração distribuída, as fissuras surgirão nos pontos em que a resistência à tração for superada, distribuindo-se dentro da região delimitada por cada elemento finito e não nos lados entre dois elementos adjacentes. Esta consideração implica na

obtenção de uma distribuição de fissuras que apenas se assemelha à trajetória das fissuras. Observa-se que no painel maciço, as fissuras se distribuem seguindo trajetórias horizontais à meia altura do painel, no topo e na base. Observa-se também o desvio das trajetórias na base do painel, das laterais em direção ao centro, que é decorrente da restrição aos deslocamentos nessa região. No modelo 2, as fissuras são prioritariamente verticais na porção central acima da abertura, com região não

fissurada localizada ao centro do painel acima da abertura. Em virtude das tensões de tração que surgiram no modelo com valores mais significativos, as fissuras horizontais apresentaram essa trajetória em praticamente toda a altura do painel. No modelo 3, foram identificadas porções de painel íntegras (não fissuradas) na porção central acima da abertura, e na porção central abaixo dela, sobretudo na base do painel.

Figura 7 – Panoramas de fissuração.



5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados, podem se afirmar o seguinte:

- A presença de aberturas reduz a rigidez do painel, fazendo com que as tensões aumentem de valor no modelo 3 e diminuam no modelo 2 em função das dimensões da abertura, relativamente ao modelo 1.
- As tensões principais de compressão no modelo 1 são menores que nos demais modelos em função da constância na área de distribuição dos esforços, justificando a maior uniformidade na distribuição das tensões normais. Os modelos 2 e 3, que apresentam reduções localizadas da área resistente, têm, naturalmente, maiores tensões que o modelo maciço.
- A fissuração foi menos abrangente nos modelos 3 e 2 respectivamente em comparação ao modelo 1, o que se deve à forma e à dimensão das aberturas, que causaram perturbações distintas no campo de tensões em cada painel, justificando, inclusive, em regiões íntegras (sem fissuração) no modelo 3.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, B.. *Utilização do método contrutivo tilt-up na execução de edificações industriais*. Centro de Tecnologia da UFPB, [S. l.], 2015. Disponível em:

http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/copy_of_2014.2/execucao-de-edificacoes-industriais-com-utilizacaodo-metodo-contrutivo-201ctilt-up201d.pdf. Acesso em: 20 maio 2020.

ACKER, A. *Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto*. Tradução de Marcelo Araújo Ferreira, 2003, 129 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16055 - Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos*, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16475 – Painéis de parede de concreto pré-moldado – requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, 2017.

BORGES, C.. *Dimensionamento de painéis pré-moldados de concreto autoportante*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 2018, 115p.

CASAS pré-moldadas de concreto: Principais vantagens e desvantagens. [S. l.], 27 set. 2016. Disponível em: <https://engenhariaconcreta.com/casas-pre-moldadas-deconcreto-principais-vantagens-e-desvantagens/>. Acesso em: 13 maio 2020.

CEARÁ recebe o mais alto galpão industrial executado em sistema tilt-up. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://www.ibts.org.br/noticias03.asp>. Acesso em: 26 maio 2020.

DAYTON SUPERIOR. *Tilt-up handbook concrete construction products*. Miamisburg, 2018, 115 p.

DUARTE, E.; ELMIR, J.; PITOL, A.. *As principais vantagens e desvantagens da utilização de elementos pré-fabricados de concreto e seus processos de fabricação*. Revista CONSTRUINDO, Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., jan. 2017, p. 29 – 35.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, *CEB/FIP Model Code 2010*, Lausanne, Switzerland, 2010, 317 p.

FRAGOMENI, S.; DOH, J. H.; LEE, D. J.. *Behavior of Axially Loaded Concrete Wall Panels with Openings: An Experimental Study*. Advances in Structural Engineering, 2012, p. 1345-1358.

GUAN, H.; COOPER, C.; LEE, D.-J.. *Ultimate strength analysis of normal and high strength concrete wall panels with varying opening configurations*. Engineering Structures, n. 32, p. 1341-1355.

MÉTODO rápido de construção Tilt-Up - Conceitos e Vantagens. [S. l.], 9 jul. 2012. Disponível em: <https://engciv.wordpress.com/2012/07/09/metodo-rapidode-construcao-tilt-up-conceitos-e-vantagens/>. Acesso em: 22 abr. 2020.

O PROCESSO construtivo Tilt-Up consiste em produzir in loco paredes de concreto que são preparadas utilizando o piso da fábrica como forma a seguir, são inclinadas para cima por guindaste e colocadas em posição. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.diase.com.br/tilt-up>. Acesso em: 8 abr. 2020.

OLIVEIRA, P. *Estudo do sistema construtivo tilt-up: projeto de um pavilhão industrial*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, 2016, 28 p. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/68769540/tcc-tilt-up>. Acesso em: 24 abr. 2020.

PARRA, P. F.; MOEHLE, J. P. *Lateral buckling in reinforced concrete wall*. Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, [S. l.], 2014.

POPESCU, C.; SAS, G.; BLANKSVÄRD, T.; TÄLJSTEN, B.. *Concrete walls weakened by openings as compression members: A review*. Engineering Structures, n. 89, p. 172190.

MELLO, M. *Tilt-up e suas múltiplas vantagens*. [S. l.], 15 jul. 2010. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/tilt-up-e-suas-multiplavantagens/>. Acesso em: 3 abr. 2020.

TAVARES, T.; NOGUEIRA, U.. *Análise de painéis de concreto armado em situação de incêndio*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 2016, 147 p.

YUNIARSYAH, E.; KONO, S.; TANI, M.. *Experimental study of lightly reinforced concrete walls upgraded with various schemes under seismic loading*. Engineering Structures, n. 138, 2017, p. 131-145.

TNO DIANA BV, DIANA-9.4.2 *User's Manual - Element Library*. Disponível em: <https://dianafea.com/manuals/d942/ElmLib/node226.html>. Acesso em: 02 de junho de 2020.