

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL
DE PAINÉIS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO**

Bruno Pereira dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

SÃO CARLOS

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL
DE PAINÉIS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO**

Bruno Pereira dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

SÃO CARLOS

2016

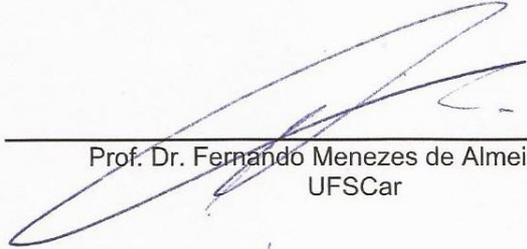


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

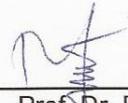
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Bruno Pereira dos Santos, realizada em 12/09/2016:



Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
UFSCar



Prof. Dr. Ricardo Carrazedo
EESC/USP



Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho
UFSCar

RESUMO

SANTOS, B. P. **Contribuição ao estudo sobre o projeto estrutural de painéis em concreto pré-moldado**. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

A utilização de tecnologias construtivas como os painéis pré-fabricados de concreto tem se configurado como uma prática cada vez mais frequente no mercado brasileiro. Um aspecto do uso destes painéis nos edifícios, ainda pouco explorado no nosso país, reside na possibilidade da consideração destes elementos contribuindo ativamente na capacidade de resposta às ações e solicitações de forma global em um edifício, interagindo com os outros elementos como pilares, lajes e vigas. Assim, uma vez que a bibliografia existente no Brasil sobre o tema é escassa, e em face ao projeto de norma em consulta pública ABNT NBR 16475 (2016), este trabalho tem por objetivo revisar conceitos de projeto e dimensionamento dos painéis de parede de concreto pré-moldado estruturais para edifícios. Através da revisão da bibliografia consagrada e estudos anteriores realizados, bem como da análise da normatização existente, abordando os parâmetros recomendados para projeto e dimensionamento existentes no Brasil e no exterior, são mostrados os principais avanços relacionados ao tema de estudo, assim como dos parâmetros e critérios de norma utilizados atualmente. Por fim, exemplifica-se através de modelos matemáticos, adotando-se os parâmetros previstos nestas normas, bem como as informações obtidas dos estudos acadêmicos anteriores, sendo possível assim fomentar discussões e análises através de paralelos e comparações, fornecendo informações para subsidio de conclusões importantes para meio técnico e acadêmico da indústria de pré-fabricados, promovendo assim um avanço na discussão de um tema atual e bastante importante para o setor.

Palavras-chave: Painéis pré-moldados, concreto pré-moldado, análise estrutural, dimensionamento, cálculo de estruturas.

ABSTRACT

SANTOS, B. P. **Contribution to the study about the structural design of precast concrete wall panels.** 2016. 91 f. Dissertation (Master's Degree in Structures and Civil Construction) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

The use of building technologies as prefabricated concrete wall panels has been increasing as a common practice in the Brazilian market. An aspect in the use of panels in buildings, barely explored in Brazil, is the possibility of considering it actively contributing in responsiveness to loads imposed, interacting with other elements such as pillars, slabs and beams. Since it is known that the literature about the theme is very limited, and facing a new specific standard coming soon, ABNT NBR 16475 (2016), this study has as objective to review the concepts of design and dimensioning of precast wall panels. With a review of the most recognized literatures and previous research already made, as well as analysis of the current standards, is shown the major advances related to the research theme, as well the standards parameters and criteria used nowadays. Finally, it is exemplified in a mathematical model design, adopting the parameters and criteria mentioned on the standards studied, and the information obtained in the previous academic studies, making possible to bring discussions and analysis using parallels and comparisons, providing information that are subsides for important conclusions for technical, academic and industrial segment of precast concrete, promoting an advance in the discussion of a very significant and actual theme.

Palavras-chave: Precast concrete wall panels, precast concrete, structural analysis, structural design.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Materiais e métodos	14
1.4 Estruturação do trabalho	14
2. PAINÉIS DE PAREDE PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.....	16
2.1 Classificação dos Painéis de Parede Pré-moldados de Concreto	18
2.1.1 Comportamento estrutural.....	19
2.1.1.1 Painéis de parede não estruturais	19
2.1.2 Seção transversal.....	21
2.1.3 Uso.....	26
2.1.4 Acabamento.....	26
2.2 Sistemas estruturais de painéis de parede pré-moldados estruturais.....	26
2.2.1 Paredes Portantes de Periferia	27
2.2.2 Contraventamento de Sistemas Estruturais em Esqueleto.....	28
2.2.3 Grandes Painéis de Fachada	28
2.2.4 Painéis da Altura do Andar	29
2.2.5 Elementos Tridimensionais	30
2.3 Exemplos de sistemas estruturais para edifícios em painéis pré-moldados	31
2.3.1 Koncz: grandes painéis maciços de concreto	31
2.3.2 Rossi: painéis maciços de concreto	33
2.3.3 Impar: painéis maciços de concreto	33
2.4 Produção de Painéis Parede de Concreto Pré-moldado Estruturais.....	34
2.5 Projeto de Painéis Parede de Concreto Pré-moldado Estruturais	35
2.5.1 Ações.....	36
2.5.2 Ligações	37
3. ESTUDOS ANTERIORES	38
3.1 Castilho (1998)	38
3.2 De Paula (2007)	40
3.3 Freitas (2012).....	44
3.4 Considerações Finais.....	46
4. (NORMAS – PROJETO) DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS	47
4.1 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.....	47

4.2	ACI – American Concrete Institute	54
4.2.1	Determinação da capacidade resistente	57
4.3	Considerações Finais	63
5.	MODELOS E ANÁLISE	64
5.1	Considerações Iniciais	64
5.2	Modelo Estrutural	65
5.3	Modelo de referência: Edifício sem painéis	66
5.4	Modelo de Referência: cálculo segundo ABNT NBR 6120 (1980)	66
5.5	Modelo de Controle: cálculo segundo ACI-318R-14.....	67
5.6	Modelo com painéis rotulados: painéis que não contraventam a estrutura..	67
5.7	Modelo com painéis rotulados: cálculo segundo NBR 6120 (1980).....	68
5.8	Modelo com painéis rotulados: cálculo segundo ACI 318R-14.....	70
5.9	Modelo com painéis engastados: painéis que contraventam a estrutura.....	72
5.10	Modelo com painéis engastados: cálculo segundo ABNT NBR 6120 (1980).	72
5.11	Modelo com painéis engastados: cálculo segundo ACI 318R-14	74
5.12	Considerações sobre os resultados obtidos	76
5.13	Projeto de Pannel: Modelo Engastado (contraventado).....	78
5.13.1	ACI 318R-14.....	78
5.13.2	ABNT NBR 16475 (2016).....	82
5.14	Considerações Finais	87
6.	CONCLUSÕES	88
6.1	Propostas de trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de cobertura metálica apoiando-se sobre painéis pré-moldados.....	17
Figura 2 - Pórtico atirantado em esqueleto, com fechamento em painéis pré-moldados.....	17
Figura 3 - Içamento e montagem de painéis pré-moldados.	18
Figura 4 - Montagem e escoramento de painéis pré-moldados tipo tilt-up.....	18
Figura 5 - Usos de painéis pré-moldados de concreto arquitetônicos em edificações.....	20
Figura 6 - Uso de painéis de parede estruturais.....	20
Figura 7 - Classificações dos painéis segundo sua seção transversal (OLIVEIRA, 2002).	21
Figura 8 - Uso de painéis maciços de fachada em estrutura esqueleto.....	22
Figura 10 – Produção mecanizada de painéis alveolares.	22
Figura 9 – Painel nervurado em edificação.....	23
Figura 11 – Painéis pré-moldados de concreto tipo sanduíche.....	24
Figura 11 – Painel de parede dupla.....	25
Figura 11 – Painel de parede reticulado.	25
Figura 12 – Sistema estrutural em paredes portantes de periferia.....	27
Figura 13 – Sistema estrutural com paredes portantes de contraventamento (a), e com núcleo central (b).....	28
Figura 14 – Sistema estrutural com grandes painéis de fachada. Ligações com as lajes podem ser articuladas ou engastadas.	29
Figura 15 – Sistema estrutural com paredes portantes com painéis de dimensão da altura do andar: (a) painéis dispostos na direção da fachada (b) painéis dispostos na direção perpendicular a fachada (c) painéis dispostos nas duas direções.....	30
Figura 16 – Sistema estrutural com elementos tridimensionais.	31
Figura 17 – Sistema estrutural em grandes painéis maciços de concreto armado.....	32
Figura 18 – Sistema estrutural em painéis de concreto maciço Rossi Residencial.....	33
Figura 19 – Sistema estrutural em painéis de concreto maciço Impar.....	34
Figura 26 – Deslocamentos em função do tipo de painel. Fonte: (CASTILHO, 1998).....	39
Figura 20 – Planta baixa do edifício modelo. Fonte: (DE PAULA, 2007).	41
Figura 21 – Ligações dos elementos (DE PAULA, 2007).....	41
Figura 22 – Deslocamentos estrutura 1 sem painéis (DE PAULA, 2007).	42
Figura 23 – Segundo modelo de análises (DE PAULA, 2007).	43
Figura 24 – Deslocamentos no segundo modelo de análises.	43
Figura 25 – Disposição dos elementos do modelo 3 (FREITAS, 2012).	45
Figura 27 – Altura equivalente dos painéis segundo sua vinculação na estrutura. (extraído da Figura 23 do projeto de norma NBR 16.475:2016).....	49
Figura 28 – Ângulo de espraçamento de cargas. (extraído da Figura 9 do projeto de norma NBR 16.475:2016).....	50
Figura 29 – Esforços atuantes no plano e fora do plano dos painéis. (extraído da Figura R11.4.1.3, do ACI 533R-11).....	56

Figura 31 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise NBR 6120 (1980).	66
Figura 32 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise do ACI 318R-14.....	67
Figura 33 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).....	68
Figura 34 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).....	69
Figura 35 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY , de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.	69
Figura 36 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo ACI 318R-14.	70
Figura 37 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ACI 318R-14.	71
Figura 38 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY , de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.	71
Figura 39 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).....	72
Figura 40 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).....	73
Figura 41 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY , de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.	73
Figura 42 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo ACI 318R-14.	74
Figura 43 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ACI 318R-14.	75
Figura 44 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY , de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.	75
Figura 30 – Modelo estrutural adotado para a análise.	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Deslocamento no topo dos pilares considerando carregamento lateral, peso próprio e força de protensão. (DE PAULA, 2007).	42
Tabela 2 – Resultados da análise linear do primeiro modelo de análises (FREITAS, 2012).	44
Tabela 3 – Resultados da análise linear do segundo modelo de análises (FREITAS, 2012).	45
Tabela 4 – Resultados análise linear do modelo 3 (FREITAS, 2012).	45
Tabela 5 – Dimensões mínimas de espessura de painéis. (extraído de tabela 11.3.1.1, do ACI 533R-11).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 – Combinações de carregamentos. (extraído de tabela 5.3. 1, do ACI 318R-14).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7 – Momento de inércia e área de seção transversal permitida para análise elástica por combinações. (extraído de tabela 6.6.3.1.1(a), do ACI 318R-14).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8 – Fator de redução de resistência para momento, forças axiais, ou ambas combinadas simultaneamente . (extraído de tabela 21.2.2, do ACI 318R-14).....	58
Tabela 9 – Fatores de redução da resistência (extraído de tabela 21.2.1, do ACI 318R-14).	59
Tabela 10 – Valores de k (ACI 318-R14).	60
Tabela 11 – Valores admitidos para o cálculo de V_c (ACI 318-R14).	61
Tabela 12 – Taxa de armadura mínima (ACI 318-R14).....	62
Tabela 13 – Esforços do modelo de referência (ABNT NBR 6120, 1980).	66
Tabela 14 – Esforços do modelo de referência (ACI 318-R14).	67
Tabela 15 – Esforços do modelo com painéis rotulados (ABNT NBR 6120, 1980).	68
Tabela 16 – Esforços do modelo com painéis rotulados(ACI 318R-14).....	70
Tabela 17 – Esforços do modelo com painéis engastados (ABNT NBR 6120, 1980).	72
Tabela 18 – Esforços do modelo com painéis engastados (ACI 318R-14).....	74
Tabela 19 – Resumo dos esforços do modelo sem painéis.	76
Tabela 20 – Resumo dos esforços do modelo com painéis rotulados.	76
Tabela 21 – Resumo dos esforços do modelo com painéis engastados.	76

1 ■ INTRODUÇÃO

A história da industrialização está diretamente associada à história da mecanização e evolução da ferramentaria existente para produção de bens. A construção civil passa por esse processo evolutivo, onde as atividades outrora exercidas pelo homem passaram a ser realizadas por mecanismos, aprimorando qualidade, custos e prazos.

O setor da construção civil também vem passando por modificações, assim, as empresas construtoras vêm buscando diminuir seus custos e, simultaneamente, aumentar a eficiência de seus processos de produção e a qualidade do seu produto final.

A industrialização da construção civil é de grande importância, pois engloba a melhoria exatamente dos aspectos citados, que não importando o cenário econômico, são primordiais. Dessa forma, o concreto pré-moldado se insere de modo cada vez mais importante nessa conjuntura, atingindo fatores como qualidade, produtividade, custos e prazos, além de aumentar, significativamente, a qualidade de vida do operário da construção.

Neste cenário estão inseridos os painéis pré-fabricados de concreto, que dentro deste subsetor, vem tendo seu uso cada vez mais empregado nas construções brasileiras. Os painéis são utilizados para fechamentos internos e externos, caixas de elevadores, núcleos centrais etc.

Esta modalidade de pré-fabricação é considerada como uma importante alternativa para substituição de paredes moldadas no local, como tijolos convencionais e alvenaria. Possuem a vantagem de estarem prontos para receber acabamentos em pintura, papel de parede entre outros. Proporcionam ainda rapidez

na construção, isolamento acústico e resistência ao fogo, entre outros (FERREIRA, 2003).

Comumente na bibliografia existente, as construções com painéis pré-moldados são classificadas em duas categorias básicas, sendo: painéis de vedação, ou seja, são os painéis que tem exclusiva função de vedação/separação dos ambientes (externo/interno) sem desempenhar função estrutural, a não ser a de suportar seu peso próprio e ações transitórias; já o segundo tipo, apresenta função na estrutura da edificação, podendo trabalhar como elemento de contraventamento ou como a própria estrutura.

Assim, este trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica e de normatização profunda sobre os painéis pré-moldados, suas aplicações e características, para posteriormente fornecer uma análise de seu uso em projetos e dimensionamento de edifícios.

1.1 Objetivos

Tem-se como objetivo central nesta pesquisa avançar nos estudos sobre o projeto estrutural de edifícios que se utilizam de painéis de parede maciços horizontais estruturais de concreto pré-moldado, partindo de:

- Pesquisas anteriores sobre o tema já publicadas no Brasil;
- Normas referência brasileiras: Projeto de Norma ABNT NBR 16475 (2016); Projeto de Norma ABNT NBR 9062 (2016), e ABNT NBR 6118 (2014);
- Normas referência americanas: ACI 318R-14; ACI 533R-11 e PCI Design Handbook. 7ª Edição;

Desta forma, a pesquisa faz uma revisão do que há de mais atual sendo discutido sobre o tema, podendo fomentar discussões para a análise e por fim contribuir com o meio científico, acadêmico e profissional.

Juntamente ao exposto, este trabalho propõe-se ainda a discutir os seguintes objetivos de forma secundária:

- Discutir os avanços já obtidos nos estudos anteriores realizados no país tendo como tema painéis pré-moldados;
- Estabelecer relacionamentos entre os critérios e parâmetros exigidos para o dimensionamento através de normatização brasileira, americana, e europeia;

- Fornecer sugestões para avanços de estudos neste tema, contribuindo para o crescimento de bibliografia e ao uso crescente deste elemento estrutural;
- Contribuir para o projeto e dimensionamento de painéis pré-moldados, de forma a melhorar a compreensão dos mesmos, e conseqüentemente na sua eficiência como elemento estrutural;
- Divulgar o conhecimento e melhorar o entendimento sobre o presente assunto, que é de grande importância para o mercado da construção.

1.2 Justificativa

A demanda do mercado por prazos cada vez menores e controle de qualidade vem fazendo com que a construção civil busque com mais afinco soluções para esses desafios. O sistema de painéis pré-moldados associa o fato de ser um sistema estrutural com durabilidade, facilidade e rapidez de execução, tornando-os cada vez mais uma opção para sistemas de edificações comerciais, industriais e residenciais. Para isso, é de suma importância entender e aprimorar o conhecimento técnico a respeito do sistema citado e divulgar sua eficiência.

Segundo Oliveira (2002), a busca por processos construtivos inovadores, que contribuam para a melhoria da qualidade e eficiência no processo de produção do edifício, é um desafio de grande proporção, pois impacta diretamente nas políticas de mercado. Outro fato que aumenta o impacto desta pesquisa tem a ver com o fato do Brasil ter uma cultura na utilização de painéis de fechamento para edificações comerciais e industriais e, além disso, está em andamento o estabelecimento de especificações e procedimentos, com o projeto de norma NBR 16.475 (2016): Painéis de parede de concreto pré-moldado – requisitos e procedimentos.

Este trabalho, quando se propõe a realizar um estudo profundo sobre pesquisas anteriores, bem como a normatização existente, busca fornecer um maior e atualizado entendimento a respeito do projeto destes elementos estruturais, permitindo aos profissionais da área de Engenharia Civil a utilização mais eficiente, segura, racional e econômica dos materiais aço e concreto no sistema pré-moldado em edifícios.

Por fim, as discussões trazidas após as análises de trabalhos anteriores e normas recentes; bem como o posterior dimensionamento de um painel através destas análises, contribui ao projeto destes elementos estruturais. Desta forma, o

trabalho traz um avanço nos métodos de cálculo e dimensionamento, e assim, conduzir ao uso mais racional dos recursos de materiais e mão-de-obra disponíveis.

1.3 Materiais e métodos

De modo a atingir os objetivos propostos para a pesquisa, que se baseia em um estudo teórico-numérico, esta será dividida em quatro partes: revisão bibliográfica geral, análise de estudos anteriores relacionados com o tema, análise da normatização existente, e dimensionamento numérico.

A primeira parte da pesquisa, é composta de uma revisão bibliográfica abrangendo, principalmente, os temas referentes: as tipologias de painéis existentes, o processo de produção destes elementos, as ligações destes com as estruturas adjacentes, sistemas estruturais possíveis com estes elementos e por fim exemplos práticos do uso dos painéis no Brasil e no exterior.

A segunda parte deste trabalho apresenta uma revisão dos parâmetros de cálculo e dimensionamento de painéis parede pré-moldados presentes em literatura consagrada, bem como tece um panorama geral da normatização existente, trazendo para o leitor os parâmetros já estabelecidos no Brasil e no exterior para cálculo e dimensionamento deste tipo de painéis.

Posteriormente, apresenta-se uma abrangente análise dos estudos anteriores, objetivando trazer ao leitor dados atuais e relevantes de pesquisa relacionados sobre o tema, fomentando discussões e análises que serão retomadas posteriormente ao longo desta dissertação.

Por fim, através do material levantado, e dos exemplos realizados, haverá material suficiente para o levantamento de discussões e análises, através de paralelos de comparação entre os parâmetros e critérios das normas, aspectos abrangidos, assim como discutir análises apresentadas nos estudos anteriores.

Estas questões estarão todas estruturadas através de modelagem, através de análise não linear utilizando o software STRAP. Desta forma, será possível a contribuição ao conhecimento já difundido em painéis pré-moldados.

1.4 Estruturação do trabalho

A estrutura do trabalho está dividida em capítulos convenientemente separados conforme a temática e conteúdo dos assuntos a serem tratados, conforme mostrados no item de materiais e métodos. Vale destacar que ao final de cada capítulo,

apresenta-se uma análise crítica a respeito dos assuntos tratados em cada parte do trabalho.

Assim, neste primeiro capítulo, mostram-se uma introdução ao tema, abordando os aspectos da pesquisa, objetivos, metodologia, justificativa e as conclusões as quais o trabalho pretende apresentar.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos gerais dos painéis pré-fabricados, tipologias, classificações, aspectos de produção e ligações, bem como a aplicação dos painéis em sistemas de estruturas pré-moldadas.

Posteriormente, no capítulo 3, são apresentados aspectos de projeto de painéis, através de revisão da bibliografia existente já consagrada, bem como um estudo das normas vigentes no Brasil e no exterior e suas determinações para a concepção e cálculo de obras com painéis pré-fabricados.

De maneira a compreender o atual estágio do estudo de painéis, no capítulo 4 apresentam-se estudos anteriores relacionados ao tema, levantando questões para discussão no trabalho.

No capítulo 5, apresenta-se um modelo numérico, que utiliza-se dos estudos anteriores analisados, bem como dos parâmetros e critérios da normatização apresentada.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, comparações entre os resultados obtidos, bem como sugestões para o projeto de painéis, opinião a respeito das normas vigentes e por fim, sugestões de pesquisa para o tema abordado.

2. PAINÉIS DE PAREDE PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO

Desde a estabilização econômica brasileira ocorrida em meados dos anos 90, a construção civil readquiriu um papel de destaque no cenário industrial brasileiro. O desenvolvimento de novas técnicas e padrões construtivos acompanhou o despertar desta indústria, soluções tecnológicas são cada vez mais indispensáveis para uma melhoria de custos e para acréscimo na qualidade do produto final.

Neste contexto a pré-moldagem que, segundo El Debs (2000), atua no sentido de reduzir o custo dos materiais como concreto e aço, além da parcela relativa às formas e ao cimbramento, impactando diretamente no custo final da obra, pelo uso de equipamentos sofisticados, produção em série, valorização da mão-de-obra e requisitos de qualidade, traz desenvolvimento para o país.

El Debs (2000) define a pré-moldagem como processo de construção no qual a obra, ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização definitivo. Cita ainda a industrialização na construção, relacionada ao uso de mecanização, materiais, meios de transporte e técnicas construtivas voltadas à produtividade. Fica então claro que a pré-moldagem exerce papel fundamental economicamente e socialmente, usando da modernização como seu principal aliado nesta função.

Elliot (2002) define ainda, que o elemento pré-moldado possui uma dimensão finita, necessitando ser posteriormente unido a outros elementos a fim de formar uma estrutura completa.

Assim, dentro do contexto da pré-moldagem, podemos encontrar infinitas tipologias de sistemas que utilizam como um de seus elementos os painéis pré-moldados.

Este capítulo tem por objetivo abordar de forma geral os painéis pré-moldados de concreto, trazendo de forma sumária e sucinta aspectos básicos, oferecendo ao

leitor um entendimento básico necessário para as análises que sucederão neste trabalho.

São apresentadas as tipologias mais comuns destes elementos, as ações as quais eles estão submetidos em uma estrutura, o desempenho na edificação, aspectos de produção, transporte, montagem e ligações com os elementos estruturais adjacentes.

Os painéis apresentam-se com diferentes características, gerando classificações segundo formato de seção transversal, segundo o seu uso estrutural, entre outras, aumentando a versatilidade deste elemento nas construções.

Estes elementos podem ter seção vazada, ser maciços, possuir acabamento superficial, isolamento térmico entre outros. Ainda, são utilizados de forma a substituir elementos de vedação de fachadas e divisórias internas como paredes de alvenaria, ou ainda, podem contribuir com os elementos estruturais, ajudando os outros elementos nas respostas às solicitações impostas na edificação.

As Figuras de 1 a 4 a seguir, mostram exemplos de construções com a utilização de painéis pré-moldados de concreto.

Figura 1 - Estrutura de cobertura metálica apoiando-se sobre painéis pré-moldados.



Figura 2 - Pórtico atirantado em esqueleto, com fechamento em painéis pré-moldados.



Figura 3 - Içamento e montagem de painéis pré-moldados.



Figura 4 - Montagem e escoramento de painéis pré-moldados tipo tilt-up.



Sobre sistemas estruturais pré-moldados, Elliot (2002) define que são uma união de elementos pré-moldados que, quando ligados ordenadamente, formam uma disposição capaz de resistir às solicitações da gravidade, do vento ou mesmo de efeitos de sismos. Estes sistemas estruturais são concebidos especificamente para o seu uso final, como escritórios, lojas comerciais, estacionamentos, escolas, fábricas, e qualquer outro tipo de edificação que principalmente necessite de uma mínima obstrução de espaços, e multifuncionalidade de uso.

Assim, os painéis pré-fabricados possuem diversas tipologias, tanto com relação ao elemento em si, como em termos de sistemas estruturais possíveis com o mesmo. Podendo variar de acordo com diversas variáveis como uso da edificação, desempenho, durabilidade, manutenção, entre outras.

2.1 Classificação dos Painéis de Parede Pré-moldados de Concreto

Conforme já mencionado, os painéis pré-moldados possuem diversas tipologias de apresentação, e por consequência possuem classificações usuais empregadas na indústria, no meio acadêmico e nas normatizações existentes.

Estas classificações de painéis costumam apresentar pequenas variações de acordo com a fonte apresentada, desta forma, apresenta-se a seguir a classificação presente no projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016), sendo complementada com outras bibliografias quando necessário.

No presente projeto de norma, os painéis são classificados segundo:

- Classificação de painéis de parede quanto ao comportamento estrutural
- Classificação de painéis de parede quanto à seção transversal

- Classificação de painéis de parede quanto ao uso
- Classificação de painéis de parede quanto ao acabamento

2.1.1 Comportamento estrutural

Nas estruturas, os painéis apresentam sua versatilidade e eficiência no fechamento de grandes áreas, sendo eles bastante utilizados em substituição a elementos verticais de vedação, como alvenarias de blocos convencionais, paredes de concreto, entre outros.

Com esta característica, os painéis podem ter função somente de fechamento, sendo assim chamados de painéis não estruturais. Mas, os painéis podem ser concebidos de forma a participar, em conjunto com a estrutura, na capacidade de suporte às solicitações da edificação, sendo neste caso denominados painéis estruturais.

2.1.1.1 Painéis de parede não estruturais

Segundo o projeto de norma ABNT NBR 16.475 (2016), os painéis não estruturais são painéis que fazem parte da edificação, porém comportam-se somente como elementos de vedação, ou mesmo, divisão entre ambientes, podendo garantir a proteção da edificação à intempéries, servir de posicionamento para instalações hidrossanitárias e outras, bem como possuir funcionalidades como proteção à incêndio quando projetadas com esta finalidade.

O ACI 533R-11 (2011) trata ainda os painéis não estruturais com relação às ações as quais ele está suscetível. Assim, o painel não estrutural não pode receber esforços de outros elementos da estrutura, estando ainda suscetível às ações térmicas, laterais do vento, de terremotos quando aplicável, deformações, peso próprio, e demais ações provenientes do processo de movimentação, transporte, montagem e instalação.

A Figura 5 a seguir mostra exemplo de painel de parede pré-moldado não estrutural durante a fase de montagem.

Figura 5 - Usos de painéis pré-moldados de concreto arquitetônicos em edificações.



2.1.1.2 Painéis estruturais

A Figura 6 mostra exemplo de painel de parede pré-moldado estrutural durante a fase de montagem.

Figura 6 - Uso de painéis de parede estruturais
Fonte: (MENEGOTTO, 2011)



Os painéis de parede pré-moldados estruturais fazem parte da estrutura da edificação, funcionando como elementos que resistem aos esforços locais, ou seja, referentes ao elemento de forma isolada, bem como esforços globais advindos da estrutura através de ligações com outros elementos estruturais adjacentes. (Projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016)).

Desta forma trata ainda o ACI 533R-11 (2011), salientando que os painéis estruturais transmitem esforços a outros elementos estruturais, interagindo com os

outros elementos, suportando as ações globais aos quais a estrutura da edificação está submetida como um todo.

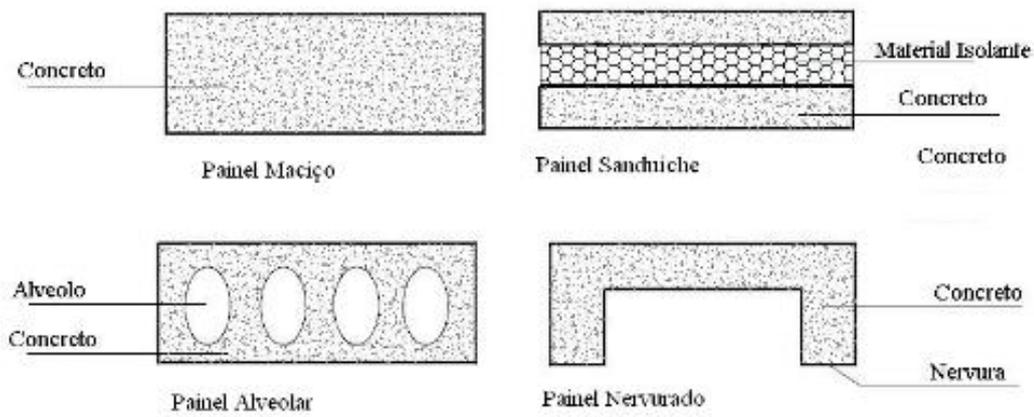
2.1.2 Seção transversal

O projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016) estabelece como um dos critérios de classificação de painéis a variação ou forma de sua seção transversal, abrangendo de forma geral os painéis mais utilizados no mercado brasileiro.

Segundo a geometria e característica de sua seção transversal, os painéis foram assim divididos: maciços, alveolares, reticulados mistos, sanduíche, nervurados, e de parede dupla. Nos itens a seguir, apresenta-se um breve descritivo de cada um, com respectivos diagramas.

O projeto de norma em questão salienta ainda que caso o painel apresente camadas de revestimento, estas não devem ser consideradas para fins estruturais. Ainda, caso o revestimento seja de concreto com propriedades mecânicas compatíveis com a da seção estrutural, existe a possibilidade que sejam descontados da análise somente frisos e ressaltos na mesma.

Figura 7 - Classificações dos painéis segundo sua seção transversal (OLIVEIRA, 2002).



2.1.2.1 Painel Maciço

O referido projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016) trata os painéis maciços como de seção preponderantemente retangular. Segundo Ferreira (2003), o painel maciço consiste naquele que possui apenas uma camada de concreto. São mais usados para fechamento, comumente como revestimento para pilares e painéis tipo “spandrel”.

Castilho (1998) situa ainda variações dentro de tal definição, que consistem em painéis maciços, maciços com aberturas, maciços com nervuras (ou painéis π e ainda maciço com nervuras e aberturas. No caso dos painéis π , estes são tratados separadamente mais adiante neste trabalho.

Figura 8 - Uso de painéis maciços de fachada em estrutura esqueleto.



2.1.2.2 Painel de parede alveolar não estrutural

São painéis que possuem vazios unidirecionais dentro da espessura e em todo o comprimento do mesmo (ACI 533R-11, 2011).

Segundo Oliveira (2002), além de ser mais leve, devido aos seus vazios, também possibilita facilidades construtivas, como passagem de tubulações, por exemplo. Por ter produção altamente mecanizada, têm alta produtividade, e por consequência um custo mais competitivo. Este tipo de painel é bastante utilizado para uso como lajes, mas o emprego como fechamento vertical também é comum e difundido.

Figura 9 – Produção mecanizada de painéis alveolares.



2.1.2.3 Pannel de parede nervurado

São painéis que cuja seção apresentam nervuras visando o aumento da resistência e da rigidez do elemento estrutural. Desta forma, para este tipo de painel, as propriedades da seção transversal, como área e inércia, deve ser feito considerando todo o trecho maciço do painel. (Projeto de Norma ABNT NBR 16.675, 2016)

De Paula (2007) descreve este painel como um tipo que apresenta um sistema de nervuras em uma ou duas direções da peça. Frequentemente usados como laje, devido a este portar cargas relativamente grandes nesta função, com grandes vão inclusive. Como modelos mais conhecidos tem-se os painéis π , podendo perfeitamente servir como fechamento.

Figura 10 – Pannel nervurado em edificação.



Foram largamente usados pela indústria, principalmente devido a sua alta capacidade portante, capaz de superar grandes vãos. Foi gradativamente perdendo espaço para os painéis alveolares principalmente por questões estéticas. Porém apesar da resistência a este formato de peça pré-moldada, mostra-se na Figura 8 um excelente exemplo de integração do desenho da peça na composição do edifício acabado.

2.1.2.4 Pannel de parede sanduíche sem ligação rígida

Para esta classificação, temos que tanto o ACI 533R-11, como o projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016), coincidem em definir que a seção transversal do painel sanduíche é composta por dois elementos de concreto de seção maciça, preenchido entre eles com material inerte e não estrutural.

De acordo com Ferreira (2003), a camada inerte não estrutural normalmente possui outra característica desejável, como por exemplo, isolamento térmico. Possuem ainda em geral uma camada de concreto com função estrutural, justificando usos comuns desse painel, por exemplo, como fechamento em fachadas estruturais.

Estes tipos de painéis são largamente usados em países de clima frio e maiores dependentes de sistema de aquecimento central. Apesar disso, têm-se notado um crescimento do uso deste material no Brasil, que têm com o passar do tempo aumentado o padrão de exigência quanto ao conforto térmico-acústico de suas edificações.

Figura 11 – Painéis pré-moldados de concreto tipo sanduíche.

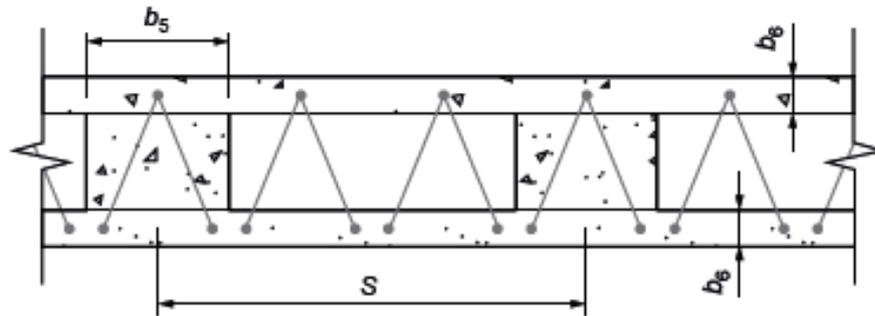


2.1.2.5 Painel de parede dupla

O projeto de norma NBR ABNT 16.675 (2016) prescreve que os painéis de parede dupla são compostos de dois painéis maciços pré-moldados conectados por nervuras e/ou treliças.

Este interior entre os painéis pode ainda ser preenchido por concreto estrutural, apresentando assim comportamento similar à de um painel maciço, e devendo assim atender os requisitos deste tipo de painel. Alternativamente, caso o vazio entre os painéis maciços não seja preenchido de concreto estrutural, a análise da seção pode ser realizada tratando a seção como dois painéis de parede independentes separados pelos vazios.

Figura 12 – Paineis de parede dupla.
 Fonte: Projeto de Norma ABNT NBR 16.675 (2016).

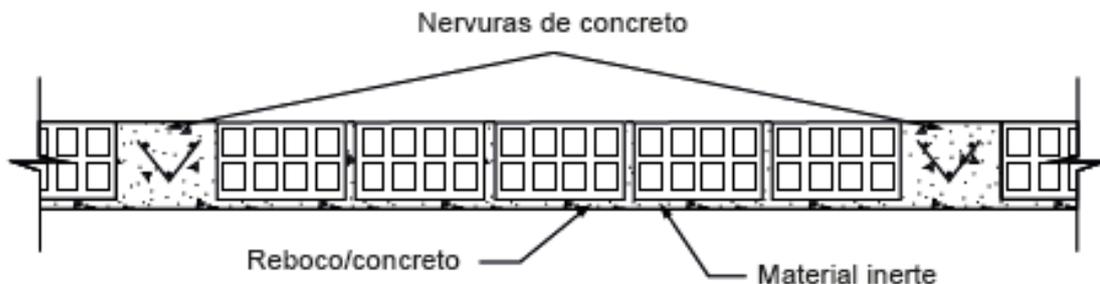


2.1.2.6 Painel de parede reticulado misto

Por fim, a última classificação segundo a seção transversal colocada pelo projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016), trata dos painéis de parede reticulados mistos. Estes painéis são compostos de nervuras de concreto armado, e o preenchimento das nervuras é realizado com material inerte e não estrutural, como blocos cerâmicos.

Estes painéis podem ou não ser estruturais, com características conforme mostrado no item 2.1.1, em qualquer caso, são considerados como seção útil somente as nervuras maciças horizontais e verticais. O referido projeto de norma limita seu uso para edificações de até 5 pavimentos, comprovando-se o desempenho do sistema segundo ensaios previstos no projeto de norma ABNT NBR 9062 (2016), e requisitos previstos na ABNT NBR 15.575-2 (2013).

Figura 13 – Painel de parede reticulado.
 Fonte: Projeto de Norma ABNT NBR 16.675 (2016)



2.1.3 Uso

Os painéis classificam-se ainda segundo o seu uso, de acordo com parâmetros estabelecidos no projeto de norma ABNT NBR 16.675 (2016). Assim, temos: residencial, comercial e industrial.

Especificamente para uso em hotéis, os painéis classificam-se neste caso como uso residencial. Ainda, consideram-se edifícios residenciais simplificados aqueles compostos de painéis parede estruturais de até 5 pavimentos, atendendo as seguintes condições:

- a. Lajes de menor vão livre não superior a 4m, e sobrecarga máxima de 3 kN/m²;
- b. Pé-direito máximo de 3m.

2.1.4 Acabamento

Por fim, os painéis parede classificam-se em: painel de parede bruto, e painel de parede arquitetônico. (ABNT NBR 16.675, 2016).

O painel de parede bruto difere em relação ao arquitetônico por necessitar algum tipo de acabamento, seja pintura, gesso ou argamassa. Já o painel de parede arquitetônico não necessita de tal acabamento em pelo menos uma de suas faces.

2.2 Sistemas estruturais de painéis de parede pré-moldados estruturais

Devido à característica moldável do concreto, aliado ao desenvolvimento tecnológico cada vez maior neste setor, podem ser elaboradas diferentes tipologias com os elementos estruturais, e conseqüentemente, sistemas com estes elementos. Assim, os painéis pré-moldados, quando bem inseridos na concepção dos sistemas estruturais, produzem vantagens bastante interessantes e desejáveis nas edificações.

Muitos são os sistemas estruturais em elementos pré-moldados desenvolvidos, em geral adaptados para o tipo de uso de cada construção, como escolas, fábricas, prédios comerciais e residenciais, shopping centers, habitações populares, entre muitos outros.

Em geral são verificadas na bibliografia diversas nomenclaturas para sistemas estruturais semelhantes em painéis pré-moldados. De acordo com Ferreira (2003), considerando a indústria de pré-moldados, aparentemente existem inúmeros sistemas e soluções técnicas disponíveis. Porém todos estes podem ser resumidos em um

limitado conjunto de sistemas estruturais básicos, os quais os princípios gerais de projetos acabam por ser semelhantes.

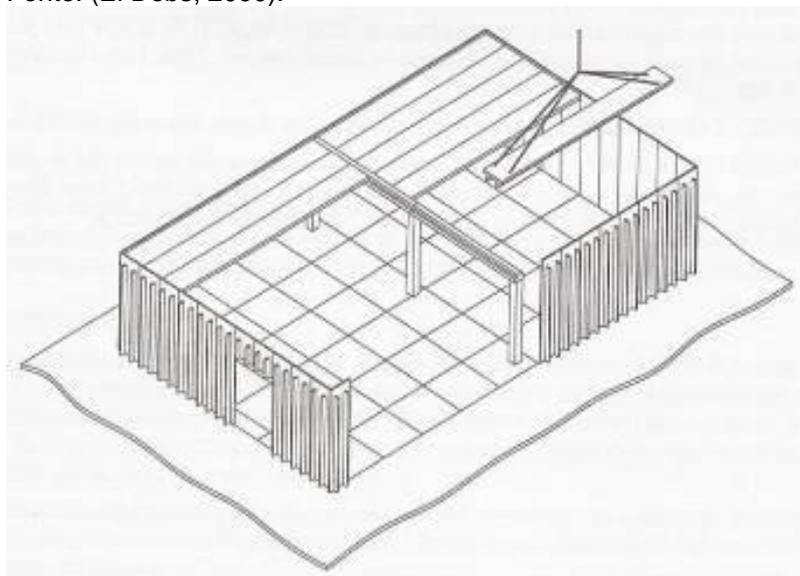
Assim, de forma a tornar o texto mais intuitivo, utilizou-se da nomenclatura verificada a seguir, baseado nas terminologias mais utilizadas pelos autores pesquisados para este trabalho.

2.2.1 Paredes Portantes de Periferia

El Debs (2000) define que o sistema estrutural de paredes portantes de periferia consiste naquele que faz uso de paredes de concreto que, além de promoverem o fechamento externo da estrutura, servem de apoio para a cobertura ou mesmo lajes intermediárias, podendo ou não possuir estruturas internas tipo esqueleto, com vigas e pilares, formando neste caso, um sistema misto.

Assim, as paredes externas são portantes, e havendo necessidade dimensional, é utilizado um sistema esqueleto no interior do edifício.

Figura 14 – Sistema estrutural em paredes portantes de periferia
Fonte: (El Debs, 2000).



Ainda, segundo El Debs (2000), este tipo de estrutura faz um melhor aproveitamento dos materiais, pois a utilização de painéis pré-moldados arquitetônicos em sistemas esqueleto representa uma grande capacidade de suporte que acaba por não ser utilizada. Em contrapartida, para efeitos de ampliação é necessário que seja previsto que as paredes sejam portantes em apenas uma direção.

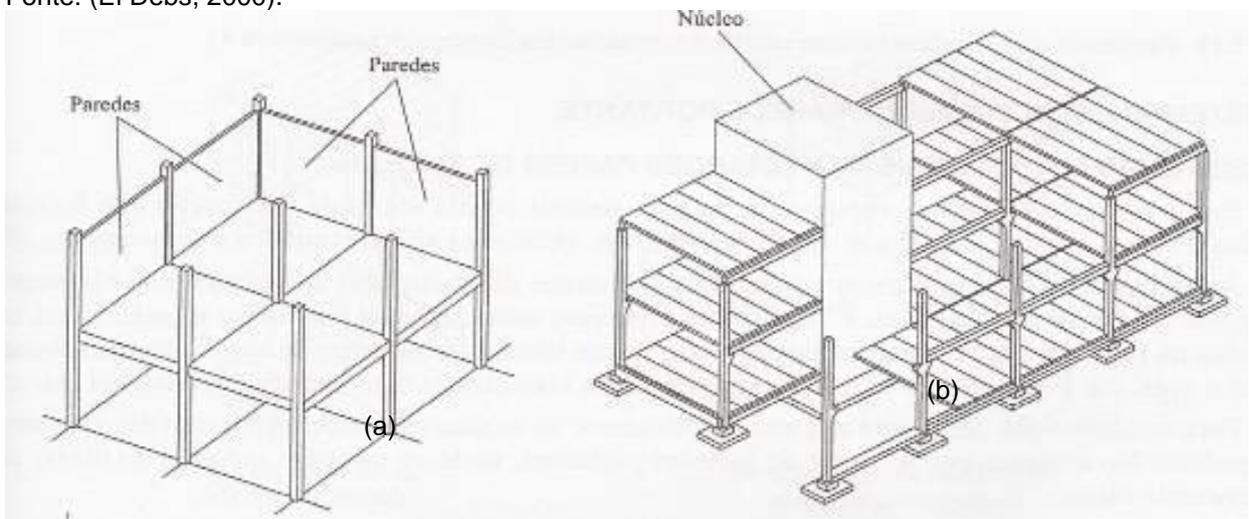
Normalmente neste sistema, as paredes são engastadas na fundação, sendo a cobertura apoiada sobre as mesmas. A utilização de transferência de esforços da cobertura para as paredes também é possível, com a utilização de conceitos de efeito diafragma. Este tipo de arranjo estrutural tem sido bastante utilizado nos EUA, e com menos intensidade na Europa, sendo o elemento mais utilizado o painel Pi.

2.2.2 Contraventamento de Sistemas Estruturais em Esqueleto

Edifícios em sistemas estruturais do tipo esqueleto, de acordo com sua tipologia e principalmente número de pavimentos, requerem uma análise quanto a sua estabilidade. De encontro a isso, um sistema de contraventamento pode ser proposto com o uso de painéis pré-moldados, de forma a fornecer a rigidez necessária ao edifício.

Segundo El Debs (2000), estes sistemas podem ser compostos de núcleos rígidos, ou por paredes de contraventamento.

Figura 15 – Sistema estrutural com paredes portantes de contraventamento (a), e com núcleo central (b)
Fonte: (El Debs, 2000).

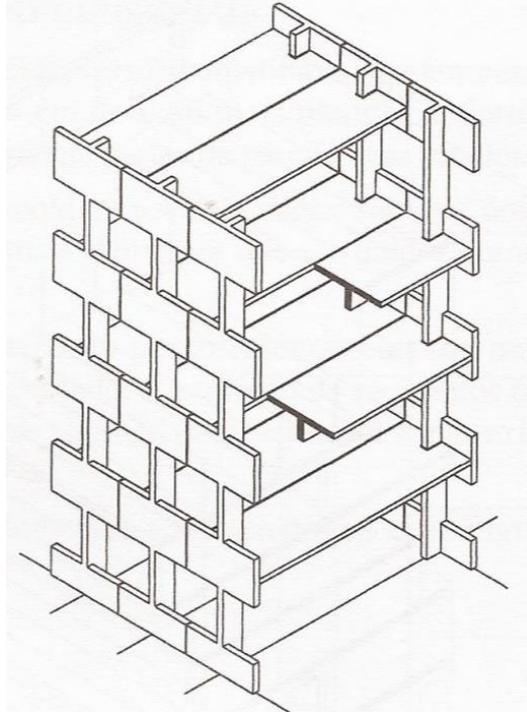


2.2.3 Grandes Painéis de Fachada

Segundo El Debs (2000), este método compreende o uso de grandes painéis, com altura da fachada do edifício, sendo em sua maioria executados através do método *tilt up*.

A forma estrutural mais comum é a dos elementos do pavimento articulados nos elementos de parede, podendo eventualmente ser ligações do tipo rígida. Para estabilização aplicam-se as considerações para o sistema construtivo em esqueleto, ou mesmo podendo-se recorrer ao efeito de caixa.

Figura 16 – Sistema estrutural com grandes painéis de fachada. Ligações com as lajes podem ser articuladas ou engastadas.
Fonte: (El Debs, 2000).

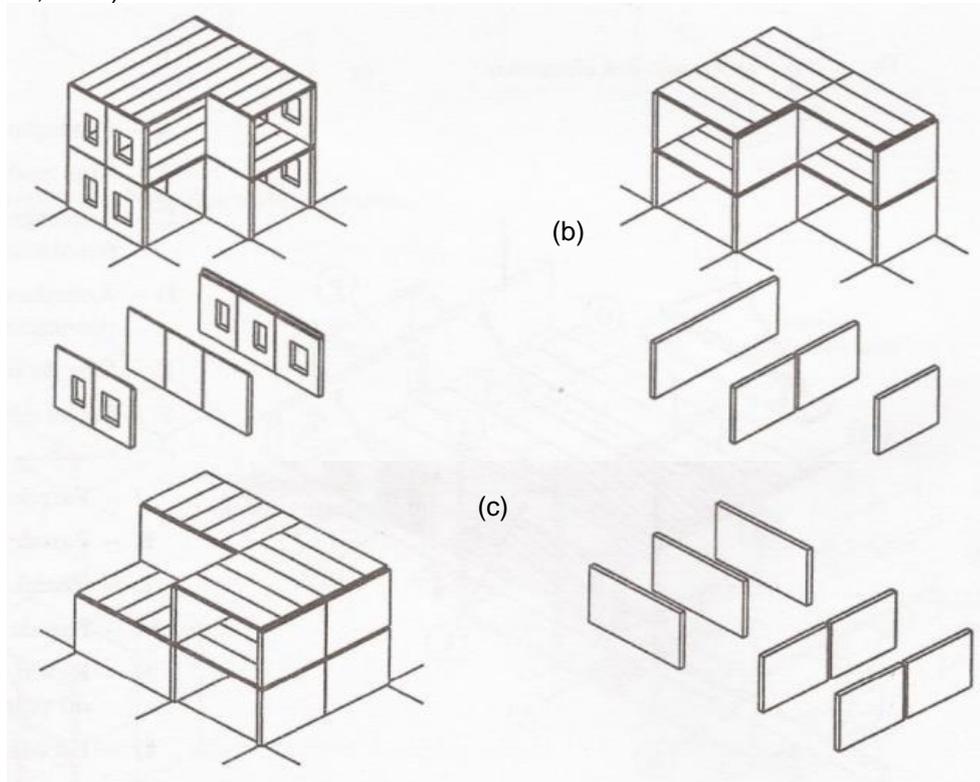


2.2.4 Painéis da Altura do Andar

Estes tipos de sistema utilizam painéis que possuem dimensão vertical igual à distância entre dois pavimentos, conforme El Debs (2000). Caracterizam-se ainda por dividir-se em pequenos e grandes painéis. Os primeiros, com muitas ligações verticais, facilitando o içamento com uso de equipamentos de baixa capacidade de carga, o segundo, com comprimento igual à dimensão da modulação do edifício.

O fato de elementos possuírem grandes dimensões reduz drasticamente o número de ligações. Estes sistemas ainda podem ser dispostos com paredes da direção da fachada, perpendicular a esta, ou nas duas direções.

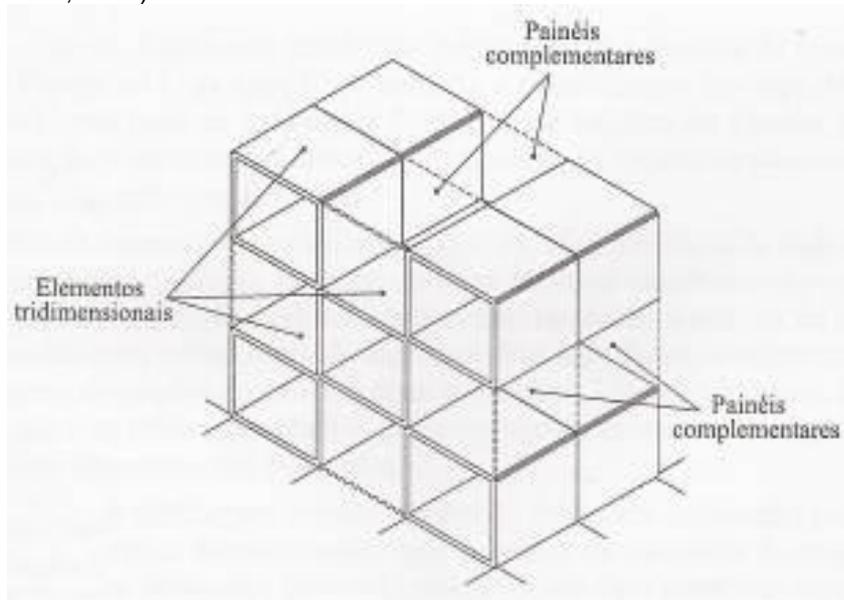
Figura 17 – Sistema estrutural com paredes portantes com painéis de dimensão da altura do andar: (a) painéis dispostos na direção da fachada (b) painéis dispostos na direção perpendicular a fachada (c) painéis dispostos nas duas direções
Fonte: (El Debs, 2000).



2.2.5 Elementos Tridimensionais

Segundo El Debs (2000), este sistema corresponde ao uso de elementos dispostos em dois ou mais planos, de forma que o elemento compreenda partes da parede e partes da laje, ou somente partes da parede, mas em dois planos. Estes elementos podem ainda ser monolíticos, ou ligação de dois ou mais elementos. Estes elementos se caracterizam por seu elevado peso e por incluir, em geral acabamento na fase de execução.

Figura 18 – Sistema estrutural com elementos tridimensionais.
Fonte: (El Debs, 2000).



2.3 Exemplos de sistemas estruturais para edifícios em painéis pré-moldados

Diante do exposto acima, mesmo dentro de suas limitações, ficam claras as diversas possibilidades que o sistema de construção pré-fabricada com painéis de concreto pode proporcionar.

Tendo em vista o exemplo numérico a que se propõe este trabalho, analisando o comportamento dos elementos pré-moldados de um edifício construído com painéis de concreto portantes, apresentam-se a seguir alguns exemplos práticos do uso deste elemento em edifícios, abordando-se as soluções mais comumente utilizadas como solução estrutural. Com isso, tem-se maiores subsídios que guiarão a realização dos estudos no capítulo 4.

2.3.1 Koncz: grandes painéis maciços de concreto

Este sistema, descrito por KONCZ em artigo publicado no ano de 1995, inicialmente foi desenvolvido na França na década de 50. Nos últimos 30 anos, milhares de edificações residenciais foram construídas com adaptações deste sistema, especialmente nos países da antiga União Soviética e leste europeu.

Segundo Koncz (1995), o sistema é particularmente bastante adaptado para edifícios residenciais de múltiplos pavimentos, como apartamentos e hotéis. As

soluções estruturais deste sistema baseiam-se na orientação dos painéis portantes e na forma de apoio das lajes, unidirecionais ou bidirecionais.

O outro fator considerado por Koncz (1995) diz respeito às soluções de projeto adotadas nas ligações entre os elementos pré-moldados, sendo estas fundamentais para a segurança e eficiência do sistema. A integridade estrutural está intimamente ligada a esta solução, ou seja, a capacidade de transferência dos esforços entre os elementos sem que haja a sobrecarga localizada, causando a falha nos mesmos.

Por fim, Koncz (1995) destaca que a capacidade estrutural dos painéis pode ser efetivamente utilizada com um bom projeto, mantendo a espessura necessária com ordem de grandeza competitiva. O fator mais importante neste sistema é a integridade estrutural, sendo recomendado neste caso o uso do sistema com todos os painéis portantes e lajes bidirecionais.

Figura 19 – Sistema estrutural em grandes painéis maciços de concreto armado
Fonte: (KONCZ, 1995).



Os painéis são utilizados para fechamentos internos e externos, caixas de elevadores, núcleos centrais etc. Assim, esta modalidade de pré-fabricação é considerada como a solução para substituição de paredes moldadas no local, como tijolos convencionais e alvenaria. Têm ainda a vantagem de serem prontos para receber acabamento em pintura ou papel de parede, rapidez na construção, isolamento acústico e resistência ao fogo entre outros (FIB, 2002).

2.3.2 Rossi: painéis maciços de concreto

Publicado na revista Techne, de março de 2012, este sistema construtivo, utilizado para edifícios habitacionais de até 5 pavimentos, é constituído de painéis maciços de concreto armado. A fabricação dos mesmos é feita por unidade de produção no canteiro de obras, sendo a concretagem realizada na posição vertical. Possuem modulação máxima de 4m, e espessura de 10cm. Os painéis de laje também são pré-fabricados, com espessura de 9 cm.

A ligação entre os painéis é realizada por solda entre armaduras de arranque, com vazios deixados posteriormente preenchidos por graute. Tem-se que o ciclo de montagem por pavimento é de aproximadamente 5 dias.

Estruturalmente, os painéis recebem as cargas verticais diretamente das lajes, transmitindo às fundações, as cargas horizontais são transmitidas às paredes por meio de concepção de diafragma rígido das lajes, tendo a contribuição dos painéis como contraventamento.

Através das informações presentes na publicação, bem como das fotos abaixo, podemos classificar este sistema como de paredes portantes da altura do andar, bidirecionais. Os fatores que levam a concluir são as paredes todas estruturais, e a altura das mesmas.

Figura 20 – Sistema estrutural em painéis de concreto maciço Rossi Residencial
Fonte: TECHNÉ (2012).



2.3.3 Impar: painéis maciços de concreto

A revista Techne também publicou em sua edição de XXXX de 2012, um sistema construtivo utilizado pela empresa Impar, sistema construtivo composto de painéis estruturais maciços de concreto armado, com espessura de 10cm, sendo

utilizados ainda painéis de vedação, com espessura de 8cm. Sobre os painéis são colocadas pré-lajes de 4cm de espessura, que são posteriormente preenchidas in loco por uma capa de concreto de 6cm.

O sistema estrutural funciona em conjunto, painéis portantes e lajes, atuando de forma a suportar as solicitações verticais e horizontais, bem como garantir a estabilidade do edifício. Especificamente quanto a estabilidade, o efeito do contraventamento dos painéis soma-se ao efeito diafragma das lajes, e da ligação entre os painéis, que conferem o aumento da rigidez do sistema.

Com as informações obtidas da publicação, conclui-se que o sistema utilizado se assemelha ao da empresa Rossi, utilizando-se de painéis portantes da altura do andar e bidirecionais.

Figura 21 – Sistema estrutural em painéis de concreto maciço Impar
Fonte: TECHNÉ (2012)..



2.4 Produção de Painéis Parede de Concreto Pré-moldado Estruturais

A obtenção das maiores vantagens deste sistema industrializado, como produtividade e economia no cronograma, mão de obra, etc., só serão realmente obtidas através de trabalho conjunto por parte dos fabricantes, montadores, projetistas e construtores, atuando no desenvolvimento de projetos, e um bom planejamento (OLIVEIRA, 2002).

A nova norma, ainda em consulta pública, Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado ABNT NBR 9062 (2016), estabelece em seu capítulo 9 diretrizes gerais para a execução dos elementos pré-moldados, como relacionados à: documentação técnica; às armaduras, posicionamentos, cuidados, cobrimentos, montagem; ao concreto; às formas; e à cura.

Já o projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016), de Painéis pré-moldados de concreto, em seu capítulo 17 intitulado métodos de produção de painéis pré-moldados, aborda questões mais específicas como de planejamento de produção, tipos de formas, concretagem e cura, e tolerâncias.

Especial atenção é necessária com relação às etapas transitórias, e esforços transitórios os quais estes painéis estão submetidos. Desforma, estocagem, transporte, içamento, montagem. Estas etapas podem trazer solicitações não previstas em projeto, e por fim defeitos e anomalias nos elementos.

2.5 Projeto de Painéis Parede de Concreto Pré-moldado Estruturais

A concepção de um projeto de estrutura pré-moldada com painéis estruturais segue o mesmo segue os mesmos conceitos de uma estrutura em pré-moldados convencional, e conforme El Debs (2000), a construção deve ser projetada desde a sua fase inicial prevendo a pré-moldagem.

El Debs (2000) estabelece ainda, alguns princípios gerais para o projeto de estruturas pré-moldadas:

- a. Resolver as interações da estrutura com outras partes da construção;
- b. Minimizar o número de ligações;
- c. Minimizar o número de tipos de elementos;
- d. Utilizar elementos de mesma faixa de peso.

Uma vez realizada a concepção do sistema estrutural, a próxima etapa a se realizar é do projeto e dimensionamento das estruturas. Conforme aborda Carvalho (2014), o dimensionamento de uma estrutura deve garantir que ela suporte, de forma segura, estável e sem deformações excessivas todas as solicitações a que estará submetida.

Importante ainda salientar que, segundo item 14.2.1 da ABNT NBR 6118 (2014), o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura, com a finalidade de efetuar verificações dos estados-limites últimos e de serviço.

Por fim a referida norma estabelece que a análise estrutural permite estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos, em uma parte ou em toda a estrutura.

Desta forma, tendo em vistas os objetivos deste trabalho, abordaremos questões de projeto relativas às ligações entre os painéis e demais elementos estruturais, bem como as ações as quais os painéis estarão submetidos.

2.5.1 Ações

As ações nas estruturas são definidas, segundo ABNT NBR 8681 (2003), como causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Devem ser consideradas as influências de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e os de serviço, conforme orientações previstas no item 11.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

Desta forma, ao considerar os painéis pré-moldados como elementos no projeto de estruturas, sendo eles estruturais ou não, devem ser profundamente estudadas todas as ações aos quais estes elementos vão estar submetidos, desde a desmoldagem, passando por transporte, içamento e ações em uso.

Brevemente, recorrendo-se a norma referida acima, classificar as ações em: permanentes, variáveis ou excepcionais.

A ações permanentes são aquelas que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação durante praticamente toda a vida útil da construção, enquanto as variáveis, apresentam significativas variações. As ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta, e muito baixa probabilidade de ocorrência, mas que no entanto, devem ser consideradas no projeto de determinadas estruturas.

Uma vez que é inerente da pré-fabricação que a etapa construtiva seja realizada fora do canteiro de obra, os elementos pré-moldados são submetidos a ações desde a etapa de desforma ainda em fábrica, passando por: desforma, transporte, estocagem, içamento e montagem, até finalmente seu uso final. Desta forma, se faz necessária uma análise cuidadosa de todas as ações envolvidas a este elemento estrutural.

2.5.2 Ligações

O projeto de ligações de painéis pré-moldados é de fundamental importância, e desempenham um papel preponderante na distribuição dos esforços entre a estrutura e os painéis.

Desta forma, conforme será verificado na sequência deste trabalho, de acordo com o tipo de ligação, existe um comportamento característico da estrutura como um todo.

De acordo com o tipo de painel, existem ligações específicas de modo a contemplar a concepção e funcionamento do sistema estrutural. Em geral, podemos citar ligações aparafusadas, soldadas; e classifica-las quanto à localização no painel, quanto ao preenchimento e formato geométrico, como define Oliveira (2002) em seu trabalho.

Neste sentido, o projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016) apresenta modelos de ligações para painéis estruturais, como:

- Ligações de esforços nas juntas;
- Ligação painel-painel com esforços horizontais;
- Ligação painel-laje-painel.

Nos painéis de vedação, o referido projeto de norma estabelece para os sistemas de ligações para painéis de parede de vedação classificação quanto à sua função em três tipos: ligação de gravidade, ligação de contraventamento e ligação de alinhamento.

3. ESTUDOS ANTERIORES

Durante essa pesquisa procurou-se analisar os trabalhos e pesquisas mais relevantes realizados buscando fontes de informação, bem como proporcionar um maior entendimento com relação às contribuições já realizadas nesta área de estudos.

Trabalhos anteriores no país salientam a eficiência dos painéis nestes sistemas estruturais. Castilho (1998) através de seu trabalho com painéis, analisa o comportamento estrutural, bem como os efeitos de segunda ordem dos edifícios com este tipo estrutural. De Paula (2007), a partir dos dados apresentados conclui que os painéis de fechamento pré-moldados de concreto contribuem de forma significativa para a diminuição dos deslocamentos da estrutura principal frente às ações laterais. Freitas (2012) discorre sobre a importância do tipo de ligação no dimensionamento estrutural, influenciando o enrijecimento e capacidade de absorção de efeitos de segunda ordem.

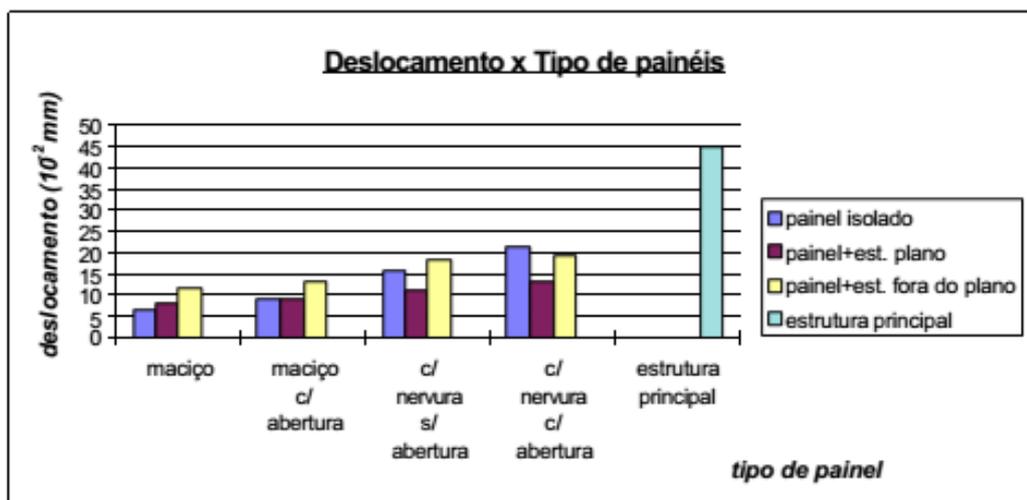
3.1 Castilho (1998)

Castilho (1998) aborda em seu trabalho os sistemas de fechamento com painéis pré-moldados utilizados como elementos de vedação em estruturas esqueleto, procurando entender o efeito de rigidez adicional trazida pelo fechamento, quando é considerada para a estrutura a interação dos painéis com a mesma.

Ela aborda os diversos aspectos que envolvem esta interação como as propriedades do material envolvido e, principalmente, do tipo de sistema de ligação escolhido para conectar os painéis na estrutura principal.

Utilizou 3 modelos para análise da questão. Primeiro, Castilho (1998) analisa o painel isoladamente. Depois o analisa em uma estrutura de único pavimento e por fim em uma estrutura de vários pavimentos. Um resumo de resultados pode ser visto na Figura 26.

Figura 22 – Deslocamentos em função do tipo de painel. Fonte: (CASTILHO, 1998)



No segundo modelo, de edificação de único pavimento, a estrutura é de um galpão composto por pilares pré-moldados de seção transversal quadrada, dispondo de três consolos trapezoidais sobre os quais se apoiam as vigas calhas e as vigas-rolantes. Os painéis, por sua vez, são travados na extremidade superior por tirantes galvanizados, parafusados na viga calha. Na parte inferior, os mesmos são apenas apoiados.

Com relação à interação entre painéis, verificou-se que o painel enrijece a estrutura em aproximadamente 2 vezes, quando a interligação entre eles é considerada. Observou-se, pelos resultados, que a resistência do conjunto completo é 25 vezes maior que a do pórtico sem o painel. A utilização dos painéis de fechamento acarreta uma diminuição dos esforços de segunda ordem, que, em alguns casos, pode até ser desprezada.

No terceiro modelo, para edificação de múltiplos pavimentos, exemplificando outras situação de projeto para análise do efeito dos painéis. Como resultados obtidos por Castilho (1998) mostram que o grau de restrição promovido pelos painéis de fechamento é desprezível, pois o deslocamento horizontal no topo dos pilares praticamente não foi afetado, principalmente em virtude do tipo de ligação escolhida, extremamente deformável.

Assim, Castilho (1998) verifica que normalmente os elementos de fechamentos não são considerados no enrijecimento da estrutura, mas que, no entanto, podem ter efeito considerável quando incorporado ao projeto.

Nas estruturas pré-moldadas, mesmo as de pequena altura, a escolha do tipo de ligação é determinante para perda de rigidez e consequente aumento nos efeitos de segunda ordem.

Considerando a interação dos painéis com a estrutura, fica demonstrado que estes podem exercer papel importante na rigidez e estabilidade do edifício, e ainda, podem diminuir as solicitações na estrutura. A consequência disso pode estar na diminuição e economia no dimensionamento da mesma.

O estudo também mostra uma contrapartida: o aumento do enrijecimento com os painéis implica em um aumento nos esforços nas ligações e nas solicitações dos painéis, sendo que os esforços nas ligações são mais críticos.

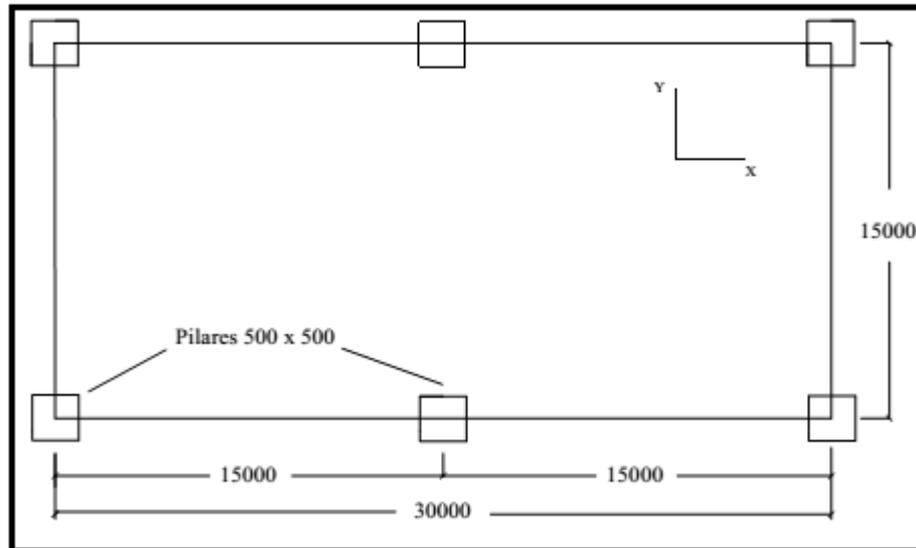
3.2 De Paula (2007)

De Paula (2007) estudou a interação entre os painéis pré-moldados de concreto e a estrutura principal por meio de modelos numéricos pré-definidos em elementos finitos.

Em seu trabalho, simulou numericamente o comportamento da estrutura com os painéis pré-moldados de concreto considerando os mesmos no comportamento global da estrutura. Considerou também os esforços atuantes nos painéis e nas ligações entre o elemento painel e a estrutura principal, analisando o comportamento dos painéis sob o efeito de temperatura constante e por fim fazendo um redimensionamento da estrutura a fim de promover a execução de estruturas mais econômicas.

Com o uso de dois modelos numéricos de estruturas tipo galpões com pavimento único, foram dispostos em um painéis verticais e em outro horizontalmente, a fim de capturar as diferenças e influências de cada um (Figura 20).

Figura 23 – Planta baixa do edifício modelo. Fonte: (DE PAULA, 2007).

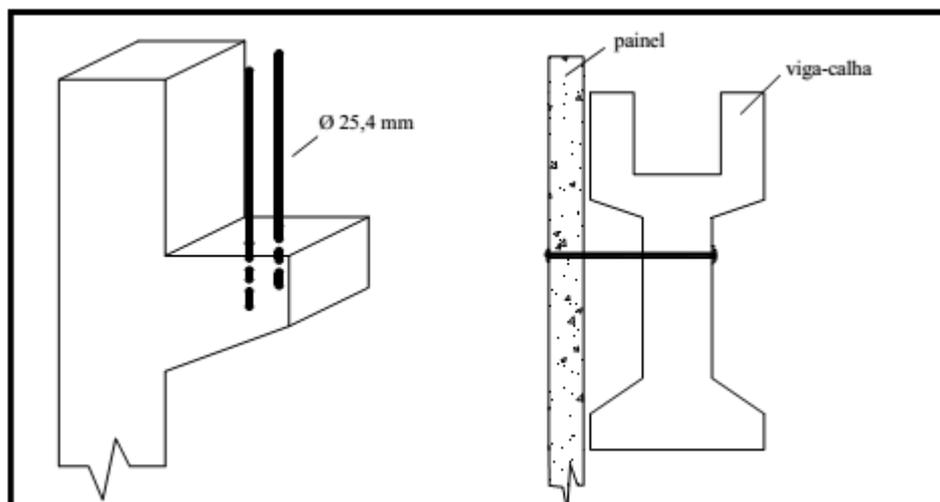


Com o uso de estruturas reais, os dois modelos numéricos de galpões possuem pavimento único. Como método escolhido de análise os elementos finitos, através do software ANSYS.

Na primeira análise, utiliza-se um galpão de um pavimento, de estrutura composta por 6 pilares 50x50cm.

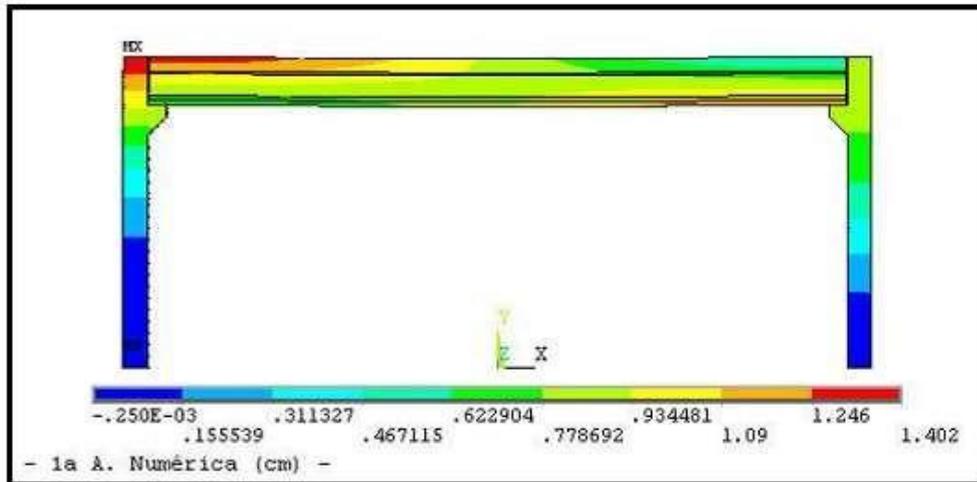
Como travamento dos painéis foram utilizados tirantes galvanizados, parafusados na viga calha. A viga-calha nos consolos dos pilares foi ligada por meio de quatro chumbadores de 25,4 mm de diâmetro. A disposição dos painéis pode ser vista na Figura 21.

Figura 24 – Ligações dos elementos (DE PAULA, 2007).



Com estas considerações, De Paula (2007) mostra os resultados dos deslocamentos da estrutura com e sem os painéis, como pode ser evidenciado na Figura 22.

Figura 25 – Deslocamentos estrutura 1 sem painéis (DE PAULA, 2007).



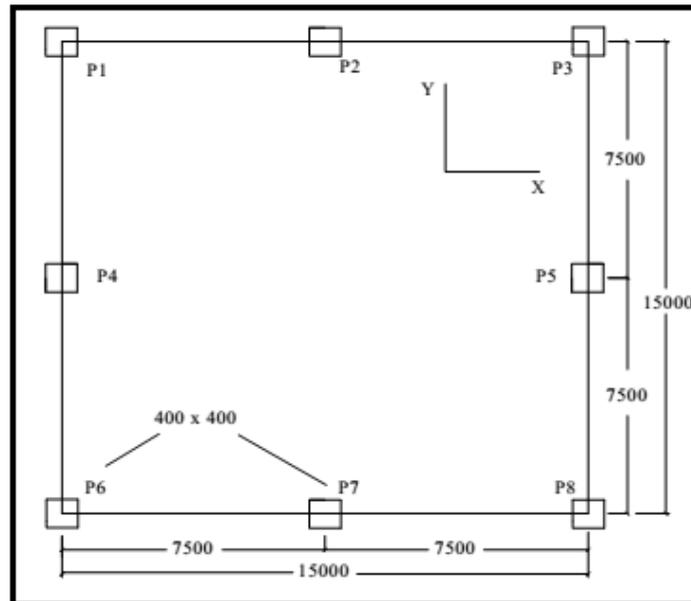
Os resultados mostram que o uso dos painéis na estrutura trouxe ganhos de rigidez da ordem de 9 vezes maiores que o exemplo controle sem painéis.

Tabela 1 – Deslocamento no topo dos pilares considerando carregamento lateral, peso próprio e força de protensão. (DE PAULA, 2007).

Tipo de painel	Deslocamento (mm)
Maciço	1,148
Maciço com aberturas	1,274
Nervurado	1,398
Nervurado com aberturas	1,542

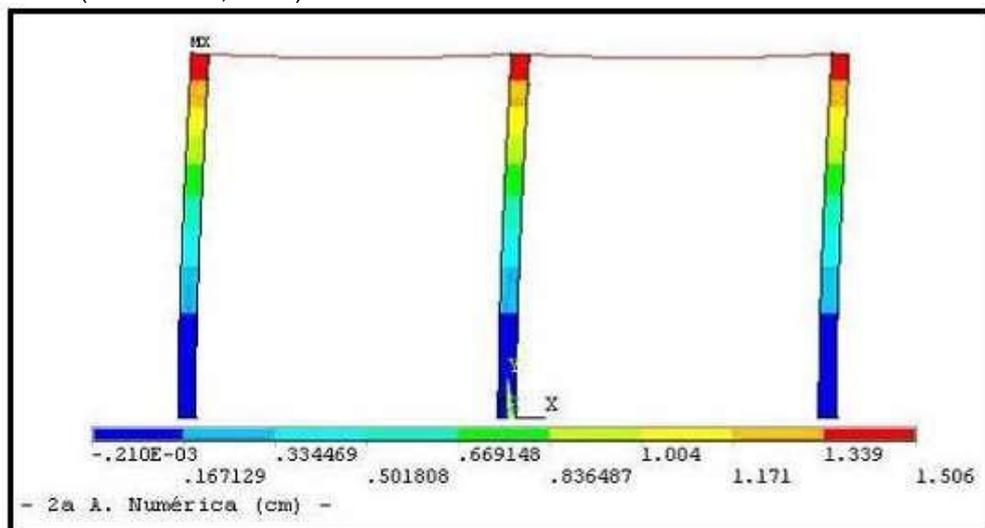
Para o segundo modelo de análises, apresenta-se uma estrutura de painéis de fechamento pré-moldados de concreto horizontais na composição da vedação vertical de uma estrutura de pavimento único (galpão), com pilares e vigas também em concreto pré- moldado. A mesma é formada por dez pilares de seção transversal quadrada, 400 mm×400 mm, sendo os pilares P9 e P10 posicionados nos extremos para aberturas de vãos de portas, de acordo com a Figura 23.

Figura 26 – Segundo modelo de análises (DE PAULA, 2007).



De Paula (2007) obtém para a ação do vento, o deslocamento horizontal máximo no topo dos pilares na direção x de 15,06 mm, conforme pode-se observar na Figura 24.

Figura 27 – Deslocamentos no segundo modelo de análises.
Fonte: (DE PAULA, 2007).



Assim, De Paula (2007) a partir dos dados coletados conclui que os painéis de fechamento pré-moldados de concreto contribuem de forma significativa para a diminuição dos deslocamentos da estrutura principal frente às ações laterais.

Ainda, considerando os modelos de painéis, percebe-se que o de maior resultado foi com o painel maciço, mas que todos de alguma forma contribuíram para uma diminuição dos efeitos de segunda ordem.

Analisando outros aspectos como as excentricidades, verificou-se que quanto maiores, menores eram as tensões nas ligações e maiores eram os deslocamentos na estrutura. A consideração do efeito da temperatura implica em maiores tensões tanto nos painéis quanto nas ligações, sendo que nas ligações este aumento é mais significativo, acarretando, também, em maiores esforços de flexão nos painéis.

3.3 Freitas (2012)

Freitas (2012) analisa a influência dos tipos de ligação painel-estrutura no comportamento do sistema estrutural em elementos pré-moldados de concreto, levando-se em conta a não-linearidade dos materiais envolvidos, ação de carregamento vertical e lateral, e por fim o efeito de variação de temperatura e junta de dilatação.

Freitas (2012) realizou três análises distintas procurando desenvolver a temática proposta. Primeiramente uma fachada de um edifício de 3 pavimentos foi analisada numericamente, depois a mesma fachada foi analisada por meio de análise não linear, e por fim uma análise numérica de uma fachada com junta de dilatação.

No modelo 1, mostrado na figura abaixo, a análise foi realizada 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 2 apresenta um resumo das análises desenvolvidas para análise linear.

Tabela 2 – Resultados da análise linear do primeiro modelo de análises (FREITAS, 2012).

Tipo de ligação	Tipo de análise	Deslocamentos [cm]		Máxima tensão de Von Mises [kN/cm ²]		
		Direção x	Direção z	Vigas e pilares	Painéis	Dentes dos painéis
Soldada/ Soldada	M1-SS-PPV	0,090	0,101	1,008	0,755	0,551
	M1-SS-TV	0,193	2,042	6,405	3,426	4,562
	M1-SS-TC	0,388	0,569	6,468	7,383	10,513
Acoplada/ Acoplada	M1-AA-PPV	0,462	0,242	3,243	0,492	1,141
	M1-AA-TV	0,528	2,069	4,600	4,126	4,152
	M1-AA-TC	0,699	0,301	4,415	1,345	6,191
Soldada/ Acoplada	M1-SA-PPV	0,114	0,188	2,026	0,788	1,016
	M1-SA-TV	0,103	2,047	5,593	4,137	4,497
	M1-SA-TC	0,334	0,418	2,826	3,039	8,580

No modelo 2, apresenta-se uma análise da simulação numérica considerando a não linearidade física dos materiais para a fachada do edifício em pré-moldados de concreto, utilizando o programa ANSYS (ver Tabela 3)

Tabela 3 – Resultados da análise linear do segundo modelo de análises (FREITAS, 2012).

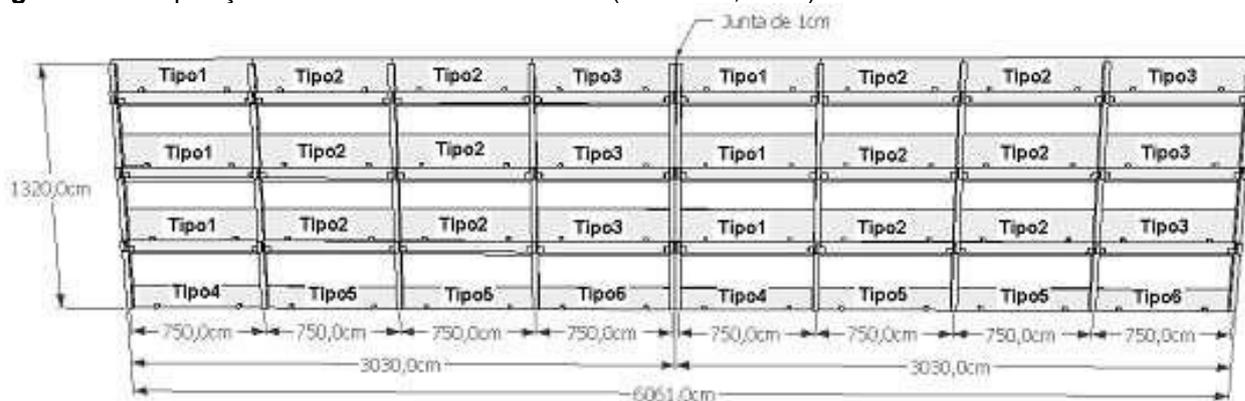
Tipo de ligação	Tipo de análise	Porcentagem do carregamento com convergência numérica (%)	Deslocamentos [cm]		Máxima tensão de Von Mises [kN/cm ²]		
			Direção x	Direção z	Vigas e pilares	Painéis	Dentes dos painéis
Soldada/ Soldada	M1-SS-PPV-NL	90	0,089	0,238	0,906	0,586	0,703
	M1-SS-TV-NL	30	0,300	1,271	0,980	0,984	1,439
Acoplada/ Acoplada	M1-AA-PPV-NL	100	0,808	0,410	1,856	0,542	0,775
	M1-AA-TV-NL	60	0,826	2,865	1,169	0,749	1,747
Soldada/ Acoplada	M1-SA-PPV-NL	100	0,155	0,353	1,092	0,848	1,064
	M1-SA-TV-NL	40	0,291	1,860	1,802	0,644	1,392

Por fim, o modelo 3 é composto por uma estrutura de pórtico formada por elementos pré-moldados com 8 vãos iguais, divididos por uma junta de dilatação de 1 cm no meio da estrutura.

Tabela 4 – Resultados análise linear do modelo 3 (FREITAS, 2012).

Modelos M2	Deslocamentos [cm]		Tensões de Von Mises [kN/cm ²]		
	Direção x	Direção z	Viga e Pilar	Painel	Dente
M2-AA-PPV-L	0,391	0,243	3,464	0,475	1,128
M2-AA-TC-L	0,643	0,240	4,338	0,888	4,148
M2-AA-PPV-NL	0,503	0,258	0,941	0,479	0,606
M2-AA-TC-NL	0,838	0,438	1,420	1,020	1,937

Figura 28 – Disposição dos elementos do modelo 3 (FREITAS, 2012).



As análises numéricas desenvolvidas neste item consideram carregamento devido ao peso próprio e vento (PPV) e temperatura constante de 20 °C (TC), para a análise linear e não-linear física dos materiais envolvidos.

Assim, Freotaas (2012) mostra que para a ação do peso próprio e do vento, 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).

Com análises de temperatura constante, os deslocamentos maiores ocorrem 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, maior flexão nos painéis.

Por fim, é interessante de salientar que Freitas (2012) verificou que os deslocamentos na direção perpendicular ao plano do painel, decorrente de sua flexão, resultam em valores críticos o uso de ligações de contraventamento acopladas (AA) comparativamente ao uso de ligações soldadas (SS).

3.4 Considerações Finais

Foi apresentada nesse capítulo uma caracterização geral do que são estes elementos estruturais painéis pré-moldados de concreto, os sistemas estruturais nos quais eles são mais comumente utilizados, bem como alguns estudos já realizados sobre o tema.

É possível perceber que este elemento estrutural pode trazer diversas alternativas para a construção de edificações, que dentre suas características, podem levar a um sistema estrutural mais eficaz.

No Brasil este sistema estrutural tem utilização limitada, frente as diversas tipologias e arranjos verificadas na literatura, representando assim mais um ponto o qual reforça a importância de estudos na área, de forma a desenvolver e difundir esta alternativa construtiva no meio técnico.

Os estudos supra apresentados demonstram que este sistema estrutural, além de cumprir com boa eficiência a funcionalidade de fechamento, apresentam excelente potencial para contribuem ativamente com a estabilidade lateral dos edifícios, bem como contribuindo na absorção de efeitos das solicitações laterais.

Existem assim, claramente diversos aspectos a serem explorados neste tema, que com uma compreensão maior de seu funcionamento, pode representar mais uma boa alternativa construtiva ao setor.

4. (NORMAS – PROJETO) DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS

Conforme já tratado nos capítulos anteriores, dentre as características pouco exploradas dos painéis pré-moldados reside no fato do aproveitamento do mesmo como parte integrante do sistema estrutural, ou seja, contribuindo ativamente no suporte de ações provenientes de cargas acidentais, peso próprio de outros elementos, vento, estabilidade global, entre outros.

Diante da proposta deste trabalho, de contribuir na análise de edifícios que utilizem painéis estruturais, apresenta-se neste capítulo uma breve revisão de referências normativas para a elaboração de projetos com esta concepção estrutural.

4.1 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Existe atualmente em consulta pública uma norma específica que aponta requisitos e procedimentos para a utilização de painéis de parede de concreto pré-moldado, projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016).

O referido projeto de norma abrange aspectos relacionados à: padronização de classificações de tipos de painel; durabilidade; propriedade dos materiais, segurança e estados limites; limites de dimensões, deslocamentos e aberturas de fissuras; instalações prediais; análise estrutural; instabilidade e efeitos de segunda ordem; ligações; dimensionamento; integridade estrutural; produção; manuseio, armazenamento e transporte; controle de execução e inspeção; entre outros.

Há ainda, uma recomendação de cálculo na ABNT NBR 6118 (2014), que aborda o assunto de Elementos Especiais no seu item 22. A norma recomenda a utilização de outras alternativas para o dimensionamento estrutural para regiões nas quais a hipótese da seção plana não mais se aplica, caracterizando-as como “Regiões D”.

Ainda, no item 22.4, a ABNT NBR 6118 (2014) traz referências para análises de vigas parede, o elemento que se aproxima das características dos painéis pré-moldados. Para estas análises a referida norma recomenda a utilização de modelos

planos elásticos lineares e não lineares, baseados em métodos numéricos adequados, como o método dos elementos finitos. Admite-se também, para o dimensionamento das vigas-paredes no estado-limite último, modelos concebidos a partir do método das bielas e tirantes.

Souza (2004) cita em seu trabalho que esses métodos de análise são consagrados em literatura e meio acadêmico, fornecendo um perfeito entendimento a respeito dos mecanismos resistentes da estrutura, seja esta de concreto simples, concreto armado ou concreto protendido.

Souza (2004) ainda cita que a referida norma apesar de indicar a utilização de tais métodos para estruturas especiais, ainda não fornece um mínimo de subsídios para o desenvolvimento de projetos estruturais utilizando tais processos. Indo além, a ABNT NBR 6118 (2014) acaba não capturando este efeito de região especial em painéis, pois leva em consideração a relação (vão)/(altura da viga) para classificar uma viga em comum ou parede. Dessa maneira, um painel que deveria ser dimensionada como parede pode acabar sendo dimensionado como se fosse viga comum, e vice versa, e um dimensionamento inseguro pode ser gerado.

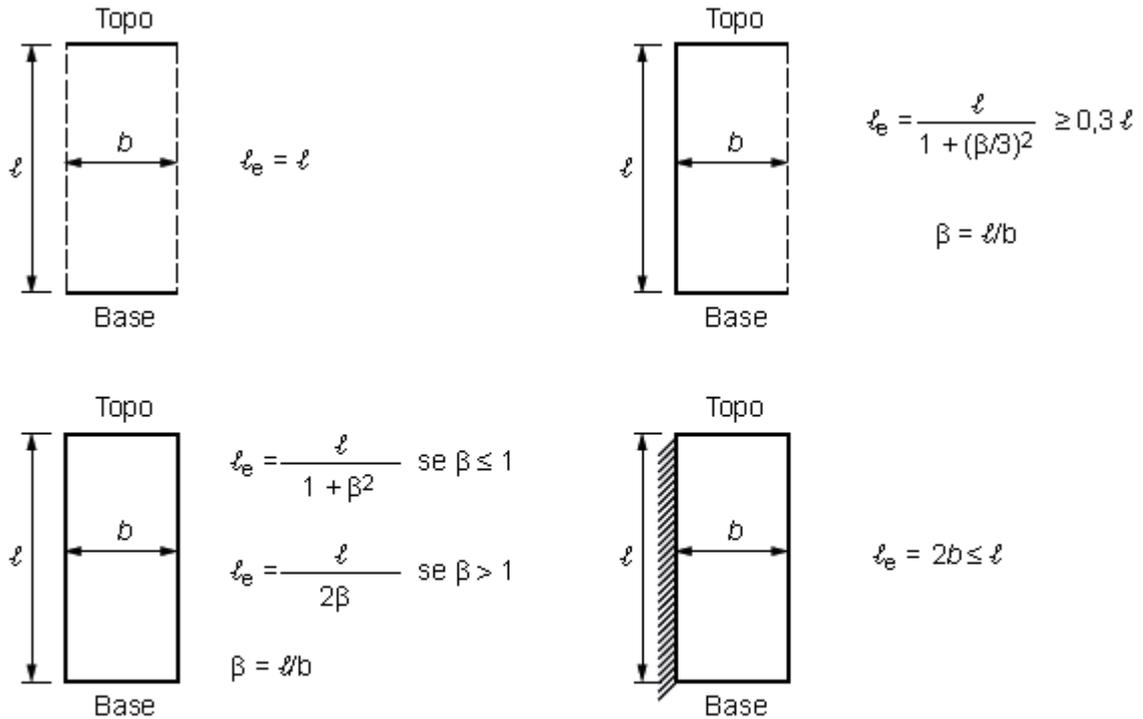
Assim, frente as muitas discussões no meio técnico com relação ao correto modelo de dimensionamento de painéis estruturais, considerando ainda o conceito de contribuição para a rigidez dos edifícios, o projeto da norma ABNT NBR 16.475 (2016) vem contribuir para uma padronização dos processos de análise estrutural e detalhamento de painéis pré-moldados.

Dentre os diversos pontos abordados pelo referido projeto de norma, apresenta-se neste trabalho aqueles preponderantes para as considerações de análise estrutural de sistemas construtivos em painéis pré-moldados.

Com relação ao dimensionamento, são apresentadas premissas básicas, conforme transcrito do item 15.2 do projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016):

- a) trechos de parede com comprimento menor que dez vezes a sua espessura devem ser dimensionados como pilar ou pilar-parede;*
- b) paredes devem ser dimensionadas à flexão-composta para os esforços atuantes considerando-se, além das excentricidades definidas em item 12.5, os deslocamentos devido a eventuais ações transversais à superfície da parede, como por exemplo, a ação do vento;*
- c) altura equivalente da parede (l_e), de acordo com a Figura 27.*

Figura 29 – Altura equivalente dos painéis segundo sua vinculação na estrutura. (extraído da Figura 23 do projeto de norma NBR 16.475:2016)



Em seu item 9.2, o projeto de norma destaca as ações transitórias as quais os painéis são submetidos, definidas pelas fases que precedem a situação em serviço do elemento. Diferentemente de qualquer estrutura de concreto armado moldado *in loco*, os elementos possuem esta peculiaridade que deve ser levada em conta no projeto.

A referida norma cita ações durante o saque da forma, durante o estoque da peça e durante a montagem. Para saque do painel, bem como ações durante a montagem, referenciam-se as recomendações de efeitos de amplificação dinâmica β_a definidos presentes na ABNT NBR 9062 (2006). No caso de ações transitórias durante o estoque da peça, são apresentadas recomendações para prevenção de eventuais empenamentos, devidos a diferenças de temperatura nas faces, retração e posicionamento do mesmo, devendo ser limitados de acordo com seção 12.5, e calculados de acordo com a expressão:

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot w_d \cdot \text{sen}\theta}{384 \cdot E_c} \cdot \left(\frac{a^4}{I_x} + \frac{b^4}{I_z} \right) \quad (1)$$

Sendo,

- a é a altura do painel;
- b é a distância horizontal entre os apoios;
- w_d é o peso por unidade de área;

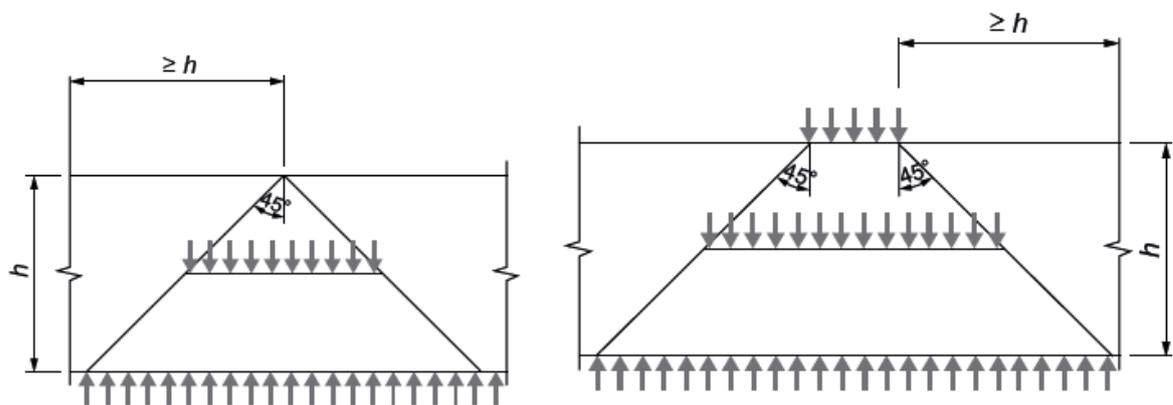
I_x e I_z são os momentos de inércia em relação ao eixo X e Z respectivamente

Com relação aos esforços solicitantes, assunto tratado no item 9.3, o projeto ABNT NBR 16475 (2016) destaca apenas alguns pontos como:

- Permissão de cálculo das reações das lajes por meio de charneiras plásticas, com a condição de a determinação dos esforços de flexão garantam a monoliticidade do diafragma e a conexão com as paredes;
- Respeito aos limites de deslocamento de topo e base de edifício presentes na ABNT NBR 9062 (2016).

Para os carregamentos verticais dos elementos, item abordado na seção 9.4, consideram-se todas as cargas atuantes no mesmo, de acordo com recomendações da ABNT NBR 6120 (1980). Para cargas linearmente distribuídas, bem como concentradas, admite-se um espraio conforme figura a seguir, verificando-se as tensões de cisalhamento nos mesmos e na região de suas ligações, sendo o ângulo de encaminhamento de cargas definido em função da rigidez da ligação e limitado a 45° e à largura efetiva (Figura 28).

Figura 30 – Ângulo de espraio de cargas. (extraído da Figura 9 do projeto de norma NBR 16.475:2016)



a) Cargas concentradas

b) Cargas parcialmente distribuídas

Com relação às aberturas, a distribuição de carga deve ser feita excluindo-se zonas limitadas por planos a 45° , tangentes à borda da abertura. O dimensionamento das armaduras ao redor de aberturas deve ser realizado de acordo com ABNT NBR 16055 (2012) Parede de concreto moldada no local para construção de edificações – Requisitos e Procedimentos.

Outro item a se verificar diz respeito às ações transversais ao plano do painel, nas quais são previstas na referida norma o vento e o desaprumo, sendo demais ações deixadas para avaliação do projetista, como excentricidades executivas. Quanto ao vento, referencia-se a ABNT NBR 6123 (1988), para o desaprumo, deve ser considerado um ângulo segundo abaixo, que também pode ser considerado através de esforços horizontais equivalentes:

$$\theta = \frac{1}{170 \cdot \sqrt{H}} \quad (2)$$

Onde,

- θ é o ângulo de desaprumo, expresso em radianos (rad);
 H é a altura da edificação, expressa em metros (m);

O referido projeto de norma trata ainda de limites dimensionais, e largura e espessura efetiva para fins de dimensionamento estrutural, e deslocamentos máximos admissíveis para painéis, em seu item 10.

Mais adiante, são apresentadas recomendações para a análise estrutural de um sistema com painéis parede pré-moldados de concreto. No item 12, podemos destacar as seguintes prescrições:

- O modelo estrutural deve contemplar interferências (aberturas, instalações, etc.;
- Necessária consideração de interação solo-estrutura e/ou do painel com outros elementos de apoio, como vigas;
- É permitido distribuir as ações horizontais entre os painéis de parede por um método simplificado baseado na rigidez do momento polar, sendo necessário considerar eventual efeito de torção do pavimento, para edificações com até 25 pavimentos e em que as aberturas nos painéis de parede não causem deformações globais significativas.
- Painéis de contraventamento podem ser representados por elementos lineares, desde que sejam consideradas deformações por flexão e cisalhamento;
- As ligações entre painéis de parede estruturais e outros componentes da estrutura devem ser consideradas de forma a representar a transferência de esforços, sendo necessário verificar a resistência da ligação.

Como hipóteses básicas, são válidas considerações de combinações ELS e ELU presentes na ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 8681 (2003).

Para a definição dos painéis resistentes aos esforços horizontais, como de contraventamento, o projeto de norma cita a consideração das excentricidades nas diferentes etapas de projeto e produção.

Com relação a efeitos de segunda ordem e de instabilidade global a referida norma faz referência a parâmetros já existentes, presentes na ABNT NBR 9062 (2006). Em painéis de contraventamento que não suportam cargas verticais além do seu peso próprio, aplica-se o disposto para vigas nesta norma para a definição da não linearidade física. Para painéis de parede que suportam cargas verticais do pavimento, aplica-se o disposto para pilares.

É prevista a consideração de diminuição da rigidez para elementos nos quais é prevista a fissuração do concreto nas fases transitórias, seguindo o proposto na ABNT NBR 6118 (2014). Aplicam-se referências a esta norma ainda a instabilidade local e instabilidade localizada.

São apresentadas armaduras mínimas para os painéis parede, conforme item 15.4 do projeto de norma, prevendo porcentagem mínima de área de aço na seção transversal, espaçamento máximo de barras e previsão de armadura dupla de acordo com a espessura.

Na sequência, no item 15.6, apresentam-se fórmulas para a verificação de resistência do painel, conforme a seguir:

$$N_{d,resist} = b_{ef} \cdot t_{ef} \cdot f_{cd} \cdot \varphi \leq \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \alpha_1 \cdot b_{ef} \cdot t_{ef} \cdot f_{cd} \left[1 - \left(\frac{l_e}{32 \cdot t_{ef}}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$\theta = 1,14 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_{tot}}{t_{ef}}\right) - 0,02 \cdot \frac{l_e}{t_{ef}} \leq \left(1 - \frac{2 \cdot e_{tot}}{t_{ef}}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 \cdot f_{ck} \geq 0,67 \quad (5)$$

Sendo,

$N_{d,resist}$ é a normal de compressão resistente de cálculo, por unidade de comprimento admitida no plano médio da parede;

b_{ef} é a largura efetiva da parede, conforme item 10.1.2 do projeto de norma NBR 16475:2016;

t_{ef} é a espessura efetiva da parede, conforme item 10.1.1 do projeto de norma NBR 16475:2016;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto;

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto;

l_e é a altura equivalente, conforme item 15.2 do projeto de norma NBR 16475:2016;

e_{tot} é a excentricidade de primeira ordem considerando as excentricidades definidas no item do projeto de norma NBR 16475:2016.

É prevista ainda resistência de cálculo sob efeito de normal de compressão e considerando-se efeitos de segunda ordem pelo processo P- δ , determinando-se uma rigidez efetiva, segundo equações presentes no item 15.6.2:

$$E \cdot I_{ef} = \frac{\phi \cdot E_c \cdot I_g}{1 + \beta_d} \quad (6)$$

Sendo,

ϕ é o coeficiente relativo à condição de fissuração da seção: para seção fissurada $\phi=0,70$ e para seção fissurada $\phi=0,30$;

β_d é o coeficiente relativo ao efeito da fluência do concreto: $\beta_d=carga\ permanente/carga\ total$. Quando a seção está submetida a esforços transversais, vento, por exemplo, $\beta_d=0$

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

I_g é o momento de inércia da seção.

Dimensionamentos ao cisalhamento, ao redor de aberturas, bem como verificação à tração devido a momentos no plano da parede, o projeto de norma referencia prescrições da ABNT NBR 16055 (2012). Quanto ao içamento, há referência novamente a ABNT NBR 9062 (2006).

4.2 ACI – American Concrete Institute

Em busca de mais referências que abordassem a análise estrutural de painéis, bem como considerações para o seu dimensionamento, são apresentadas normas referências mundiais, nas quais, havendo ausência de parâmetros nacionais, podem ser utilizadas segundo critério do projetista.

Assim, o ACI – American Concrete Institute, na figura de seu comitê 533, publicou o *Guide for Precast Concrete Wall Panels*, ou Guia para painéis parede pré-moldados em português, gerando assim o Guia ACI 533R-11 (2011).

Neste guia, abordam-se aspectos funcionais dos painéis pré-moldados como tolerâncias, materiais, fabricação, instalação, testes de qualidade, etc. No capítulo 3 especificamente, são abordados aspectos gerais de projeto de painéis, citando ainda o ACI 318-08, hoje com versão mais atualizada, o ACI 318-14, como guia geral para o dimensionamento propriamente dito, com exceção às recomendações específicas do próprio guia.

Estas recomendações do Guia ACI 533R-11, que adicionam parâmetros ao ACI -318-14, em geral, dizem respeito a: limites de protensão, flexão e cisalhamento; avaliação do efeito de esbeltez; reforços de armaduras adicionais; dimensões efetivas e dimensões limite; deslocamentos máximos permitidos; e limites de fissuração.

Este guia ainda recomenda a verificação das seguintes solicitações, sempre que o projetista observar aplicação:

- Construção, manipulação, armazenagem e transporte;
- Instalação e impacto;
- Efeitos estáticos e dinâmicos da gravidade, e cargas laterais do solo;
- Pressão hidrostática, vento e ação sísmica.

Por fim recomenda-se atenção com as seguintes solicitações desenvolvidas por fatores apresentados a seguir:

- Determinação de suporte diferencial;
- Deformações de fluência e retração;
- Restrições estruturais;
- Efeitos de temperaturas ambientais;
- Movimentos térmicos e/ou de curvaturas;
- A variação diferencial de volume do painel com relação à estrutura de suporte;

- Concentrações de tensões nas proximidades de conexões e cargas aplicadas pontualmente.

Assim, uma vez que o Guia ACI 533R-11 não propõe diretamente modelos de cálculo, mas sim fixa parâmetros de diferenciação de painéis com relação ao código ACI-318R-14. Este último, por sua vez, faz indicações de dimensionamento, apontando em seu *Chapter 11 - Walls* (Capítulo 11 - Paredes, em inglês) parâmetros de projeto de painéis pré-moldados, conforme indica-se no item 11.1 (a) e (b), bem como aspectos de dimensionamento.

O ACI-318R-14 no item 11.2 remete às especificações dos materiais especificamente para o caso de painéis, estas que podem ser verificadas no capítulo 19 no caso do concreto, e no capítulo 20 no caso do aço.

Voltando-se novamente ao Guia ACI 533R-11, são definidos em seu item 11.3 limites geométricos aos painéis, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões mínimas de espessura de painéis. (extraído de tabela 11.3.1.1, do ACI 533R-11).

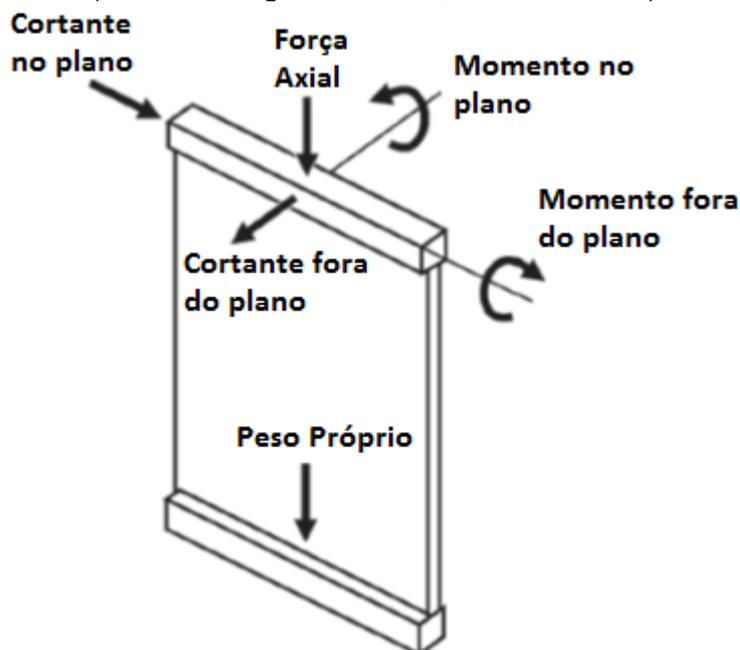
Tipo de Painel	Menor espessura h	
Estrutural	Maior que:	10,16 cm
		1/25 do comprimento e altura não apoiado
Não-estrutural	Maior que:	10,16 cm
		1/30 do comprimento e altura não apoiado

Para o concreto, são fixados valores mínimos de f_c' (símbolo análogo ao f_{ck} para a norma brasileira), baseados na durabilidade e propriedades de projeto. Assim, a tabela 19.2.1.1 fixa valores superiores a 2500 psi, correspondendo a 17,2 MPa. Por fim, segundo critérios de durabilidade, consultando parâmetros de classe de exposição da tabela 19.3.1.1, podemos chegar a valores que exigem resistência mínima de 2500 psi (17,24 MPa), através de tabela 19.3.2.1.

Requisitos de desempenho de ligações são apresentados nos itens 16.2 e 16.3. A resistência necessária ao painel pode ser obtida segundo as combinações de ações segundo Capítulo 5, e procedimentos de análise do Capítulo 6.

Apresentam-se a seguir as mais comuns e principais forças atuantes nos painéis segundo o ACI 318-R14 (Figura 29).

Figura 31 – Esforços atuantes no plano e fora do plano dos painéis. (extraído da Figura R11.4.1.3, do ACI 533R-11)



A partir da definição destas forças principais e mais comuns atuantes nos painéis, a referida norma apresenta equações simplificadas para a verificação de painéis, conforme itens 11.5.3 a 11.5.5. Abordam-se ainda questões centrais para reforços de armadura, assim como espaçamento mínimos para a mesma, direcionando como o detalhamento deve ser realizado no item 11.7.

As combinações de ações podem ser retiradas da tabela 5.3.1, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Combinações de carregamentos. (extraído de tabela 5.3. 1, do ACI 318R-14).

Combinação de carga	Carregamento Primário
$U = 1,4D$	D
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_r, \text{ ou } S, \text{ ou } R)$	L
$U = 1,2D + 1,6(L_r, \text{ ou } S, \text{ ou } R) + (1,0L \text{ ou } 0,5W)$	$L_r, S, \text{ ou } R$
$U = 1,2D + 1,0 W + 1,0L + 0,5(L_r, \text{ ou } S, \text{ ou } R)$	W
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L + 0,2S$	E
$U = 0,9D + 1,0W$	W
$U = 0,9D + 1,0E$	E

No Capítulo 6, análise estrutural, são apresentados os métodos de análise que devem ser aplicados aos painéis estruturais.

São recomendados no item 11.4.1.3 verificações quanto aos efeitos da esbeltez, segundo métodos apresentados nos itens 6.6.4, 6.7, 6.8 ou 11.8, este último somente se os referidos painéis atenderem requisitos específicos para este item.

O efeito da flambagem nos elementos pode ser obtido da equação 6.2.5a, Equação 7 da sequência, e o respectivo raio de giração, conforme equação 6.2.5.1, Equação 8:

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22 \quad (7)$$

$$r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} \quad (8)$$

No item 6.3.1.1 salienta-se a importância de que sejam verificadas as rigidezes dos elementos do sistema estrutural adotado com as premissas consistentes.

Mais adiante, no item 6.6.3.1 são apresentados momentos de inércia para análise elástica, que salvo em análise mais rigorosa, deve ser considerado segundo Tabela 7:

Tabela 7 – Momento de inércia e área de seção transversal permitida para análise elástica por combinações. (extraído de tabela 6.6.3.1.1(a), do ACI 318R-14).

Elemento e Condição		Momento de Inércia	Área da seção transversal
Colunas		0,7 I _g	1,0 A _g
Painéis Parede	Sem fissuras	0,7 I _g	
	Fissurada	0,35 I _g	
Vigas		0,35 I _g	

O item 6.6.4 trata do método de majoração dos momentos, para estruturas deslocáveis, analisando assim a estrutura de um edifício como um todo. Já os itens 6.7 e 6.8, tratam de análise elástica e inelástica de segunda ordem respectivamente; por fim o item 11.8 traz recomendações para análise de paredes delgadas, e será tratado mais adiante.

4.2.1 Determinação da capacidade resistente

Em resumo temos que as capacidades resistentes de normal, cortante e momentos devem ser superiores às solicitações nos painéis, já considerados os fatores de majoração de esforços, e minoração de resistências.

$$\phi P_n \geq P_u \quad (9)$$

$$\phi M_n \geq M_u \quad (10)$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad (11)$$

Nos itens 11.4.2 e 11.4.3 são determinados que a máxima força axial vertical P_u não deve exceder a $\Phi P_{n,max}$, onde segundo tabela 22.4.2.1 tem-se:

$$\phi P_{n,max} = 0,8 \cdot P_0 \quad (12)$$

E, para elementos não protendidos:

$$P_0 = 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \quad (13)$$

Por fim, temos o fator de ponderação para resistência, seguindo parâmetros da Tabela 8.

Tabela 8 – Fator de redução de resistência para momento, forças axiais, ou ambas combinadas simultaneamente . (extraído de tabela 21.2.2, do ACI 318R-14).

Net tensile strain ε_t	Classification	ϕ			
		Type of transverse reinforcement			
		Spirals conforming to 25.7.3		Other	
$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{ty}$	Compression-controlled	0.75	(a)	0.65	(b)
$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0.005$	Transition ^[1]	$0.75 + 0.15 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0.005 - \varepsilon_{ty})}$	(c)	$0.65 + 0.25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0.005 - \varepsilon_{ty})}$	(d)
$\varepsilon_t \geq 0.005$	Tension-controlled	0.90	(e)	0.90	(f)

^[1]For sections classified as transition, it shall be permitted to use ϕ corresponding to compression-controlled sections.

Com relação aos momentos M_u que o painel está submetido, estes devem ser majorados de acordo com análises de estabilidade já citadas dos itens 6.6.4, 6.7 e 6.8. Por fim, as forças cortantes devem ser projetadas de acordo com solicitações no plano e fora dele. Estando estes valores de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de redução da resistência (extraído de tabela 21.2.1, do ACI 318R-14).

Action or structural element		ϕ	Exceptions
(a)	Moment, axial force, or combined moment and axial force	0.65 to 0.90 in accordance with 21.2.2	Near ends of pre-tensioned members where strands are not fully developed, ϕ shall be in accordance with 21.2.3.
(b)	Shear	0.75	Additional requirements are given in 21.2.4 for structures designed to resist earthquake effects.
(c)	Torsion	0.75	—
(d)	Bearing	0.65	—
(e)	Post-tensioned anchorage zones	0.85	—
(f)	Brackets and corbels	0.75	—
(g)	Struts, ties, nodal zones, and bearing areas designed in accordance with strut-and-tie method in Chapter 23	0.75	—
(h)	Components of connections of precast members controlled by yielding of steel elements in tension	0.90	—
(i)	Plain concrete elements	0.60	—
(j)	Anchors in concrete elements	0.45 to 0.75 in accordance with Chapter 17	—

Com relação ao cálculo de forças axiais e flexão dentro e fora do plano do painel, recomenda-se sequência prevista no item 22.4. No entanto, alternativamente, quando estas solicitações estiverem localizadas no terço central de um painel retangular e sólido, as mesmas podem ser obtidas através da equação (14).

$$P_n = 0,55 \cdot f'_c \cdot A_g \left[1 - \left(\frac{k \cdot l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Tendo como referência os valores de k conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de k (ACI 318-R14).

Boundary conditions	k
Walls braced top and bottom against lateral translation and:	
(a) Restrained against rotation at one or both ends (top, bottom, or both)	0.8
(b) Unrestrained against rotation at both ends	1.0
Walls not braced against lateral translation	2.0

Conforme aponta McCormac (2013), painéis estruturais de edifícios de maior altura, e que necessariamente sofrem com maiores efeitos de esforços laterais como vento ou dimensionamento para terremotos, podem ser dimensionados para absorver estes esforços laterais, sendo chamados de *shear walls*. Pondera ainda que um dos requisitos básicos deste tipo de painel é de serem bem avaliados os esforços de flexão, ao invés de dimensionamento somente por controle de forças cortantes. No entanto, finaliza pontuando que os efeitos de cortante são mais importantes em painéis de baixa relação altura/comprimento, enquanto os efeitos de flexão são mais importantes em painéis mais altos.

Para esforços cortantes no plano do painel, estes podem ser calculados alternativamente segundo modelo biela-tirante presente no capítulo 23 desta norma ACI em estudo, para $h_w \leq 2l_w$. No entanto, propõe-se método prático descrito na sequência.

Temos que primeiramente V_n em qualquer seção horizontal não deve exceder:

$$10\sqrt{f'_c}hd$$

E V_n , pode ser calculado através de

$$V_n = V_c + V_s$$

Ainda, a menos que um cálculo detalhado seja realizado, temos que V_c não deve exceder os valores de:

$$2\lambda\sqrt{f'_c}hd$$

São admitidos cálculos de V_c segundo Tabela 11.

Tabela 11 – Valores admitidos para o cálculo de V_c (ACI 318-R14).

Calculation option	Axial force	V_c		
Simplified	Compression	$2\lambda\sqrt{f'_c}hd$		(a)
	Tension	Greater of:	$2\left(1 + \frac{N_u}{500A_g}\right)\lambda\sqrt{f'_c}hd$	(b)
			0	(c)
Detailed	Tension or compression	Lesser of:	$3.3\lambda\sqrt{f'_c}hd + \frac{N_u d}{4\ell_w}$	(d)
			$\left[0.6\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{\ell_w \left(1.25\lambda\sqrt{f'} + 0.2 \frac{N_u}{\ell_w h} \right)}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{\ell_w}{2}} \right] hd$ <p>Equation shall not apply if $(M_u/V_u - \ell_w/2)$ is negative.</p>	(e)

Seções do painel próximas pelo menos $l_w/2$ da base do mesmo, podem ser projetadas para V_c obtido através da opção de cálculo detalhado para regiões acima destes valores ou do seu centro para cima, o que for menor.

Valores de V_s podem ser obtidos através de reforço de cortante transversal, calculados por:

$$V_s = \frac{A_v f_{yr} d}{s}$$

Para cortantes fora do plano do painel, recomenda-se item 22.5, que trata de forças cortantes unilaterais.

A referida norma ACI318R-14 ainda trata das armaduras nos painéis, conforme tabela a seguir, abordando seu detalhamento no item 11.7 (Tabela 12).

Tabela 12 – Taxa de armadura mínima (ACI 318-R14).

Wall type	Type of nonprestressed reinforcement	Bar/wire size	f_{ys} , psi	Minimum longitudinal ^[1] , ρ_l	Minimum transverse, ρ_t
Cast-in-place	Deformed bars	\leq No. 5	$\geq 60,000$	0.0012	0.0020
			$< 60,000$	0.0015	0.0025
		$>$ No. 5	Any	0.0015	0.0025
	Welded-wire reinforcement	\leq W31 or D31	Any	0.0012	0.0020
Precast ^[2]	Deformed bars or welded-wire reinforcement	Any	Any	0.0010	0.0010

^[1]Prestressed walls with an average effective compressive stress of at least 225 psi need not meet the requirement for minimum longitudinal reinforcement ρ_l .

^[2]In one-way precast, prestressed walls not wider than 12 ft and not mechanically connected to cause restraint in the transverse direction, the minimum reinforcement requirement in the direction normal to the flexural reinforcement need not be satisfied.

No item 11.7, trata-se de detalhamento de armadura. Fixam-se valores e modelos limite a serem seguidos. A seguir apresentam-se recomendações para espaçamento das armaduras longitudinais:

- a. O espaçamento s das barras longitudinais não pode exceder: $5h$; 18in (45,7 cm) para painéis externos, ou 30in (76,2cm) para paredes internas. Se armaduras para efeito cortante forem necessárias para suporte de ações no plano do painel, s não deve exceder o menor entre os valores de $3h$, 18in (45,7cm), e $l_w/3$.
- b. Para paredes de h maior que 10in (25,4cm), a distribuição de armaduras para cada direção pode ser posicionada como duas camadas paralelas com faces de acordo com:
 - Uma camada de pelo menos metade, não excedendo dois terços, do total de armadura necessária para cada direção pode ser posicionada a pelo menos 2in (5,1cm), não excedendo $h/3$, da superfície externa.
 - A outra camada que consiste no equilíbrio necessário para a armadura nesta direção, pode ser posicionada a pelo menos 3/4in (1,9cm), mas não mais que $h/3$, da superfície interna.
- c. Armadura de tensões de flexão podem ser distribuídas e posicionadas tão próximo quanto possível das faces de tensão.

A seguir apresentam-se recomendações para espaçamento das armaduras transversais:

- a. O espaçamento s das armaduras transversais não pode exceder: $5h$; 18in (45,7 cm) para painéis externos, ou 30in (76,2cm) para paredes internas. Se armaduras para efeito cortante forem necessárias para suporte de ações no plano do painel, s não deve exceder o menor entre os valores de $3h$, 18in (45,7cm), e $lw/5$.

Para espaçamento das armaduras longitudinais para suportes laterais, recomenda-se que se ela for necessária para forças axiais, ou se A_{st} exceder $0,01A_g$, as armaduras longitudinais podem ser lateralmente suportadas pelas amarrações transversais.

Fechando as recomendações para detalhamento, o ACI 318R-14 cita reforços ao redor de aberturas. No item, a referida norma remete que além do requerido no item 11.6, que trata de armaduras mínimas, são necessárias pelo menos 02 barras de aço N° 5 para painéis com duas camadas de armaduras nas duas direções; e uma barra N° 5 em paredes com uma camada de armaduras ao redor da abertura. Estas barras devem estar ancoradas de modo a desenvolver f_y em tensão nas arestas das aberturas

Por fim, no item 11.8, apresenta-se um método simplificado para análise de painéis delgados fora do plano, nos quais os painéis têm restrição a rotação em seu topo.

Desta forma, de maneira simplificada, o ACI 318R-14 apresenta métodos práticos para a determinação dos esforços nos painéis bem como seu detalhamento.

4.3 Considerações Finais

Verificam-se diferenças significativas nos procedimentos de cálculo apresentados. O modelo do ACI apresenta o cálculo de esforços resistentes de painéis através de expressões empíricas, e métodos simplificados; enquanto o projeto de norma ABNT NBR 16678 (2016) apresenta alguns cálculos de armaduras adicionais para normais e cisalhamento, no entanto também remetendo à norma de paredes de concreto, ABNT NBR 16055 (2012), bem como indicando modelos clássicos de cálculo, no entanto não demonstrados na mesma.

5. MODELOS E ANÁLISE

Neste capítulo o presente trabalho tem por objetivo estabelecer um comparativo entre as normas apresentadas anteriormente. Para tal, com auxílio do software STRAP®, se estabelece um modelo a ser calculado e detalhado segundo recomendações presentes entre as referências normativas, sendo possível então estabelecer comentários a respeito de ambas, podendo contribuir positivamente para o avanço nos entendimentos a respeito do projeto deste tipo de painel.

5.1 Considerações Iniciais

De modo a demonstrar analiticamente os resultados, e obter resultados relevantes para a utilização da comparação entre as normas, bem como modelo estrutural, e variação de parâmetros, estabeleceu-se o seguinte roteiro para análise:

Modelagem de edifício padrão e simétrico, de forma a melhor capturar variações nos parâmetros e modelo de cálculo de normas utilizadas;

Utilização de modelo com ligações rotuladas nos painéis, e depois engastadas, de forma a obter dois cálculos mais comumente utilizados, assim como verificar as variações dos resultados obtidos;

Cálculo através de modelo de verificação do ACI-318R-14, com metodologia de cálculo empírica para painéis portantes;

Cálculo segundo parâmetros do projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016), com metodologia de cálculo através de dimensionamento como elemento de viga-parede.

5.2 Modelo Estrutural

O modelo estrutural consistiu em um edifício composto por Térreo+3 andares, de estrutura de concreto armado pré-fabricada, com as seguintes características:

Pilares: 40x40, 4m por lance;

Vigas: 30x70, 10m de vão, rotuladas, com offset de 25cm;

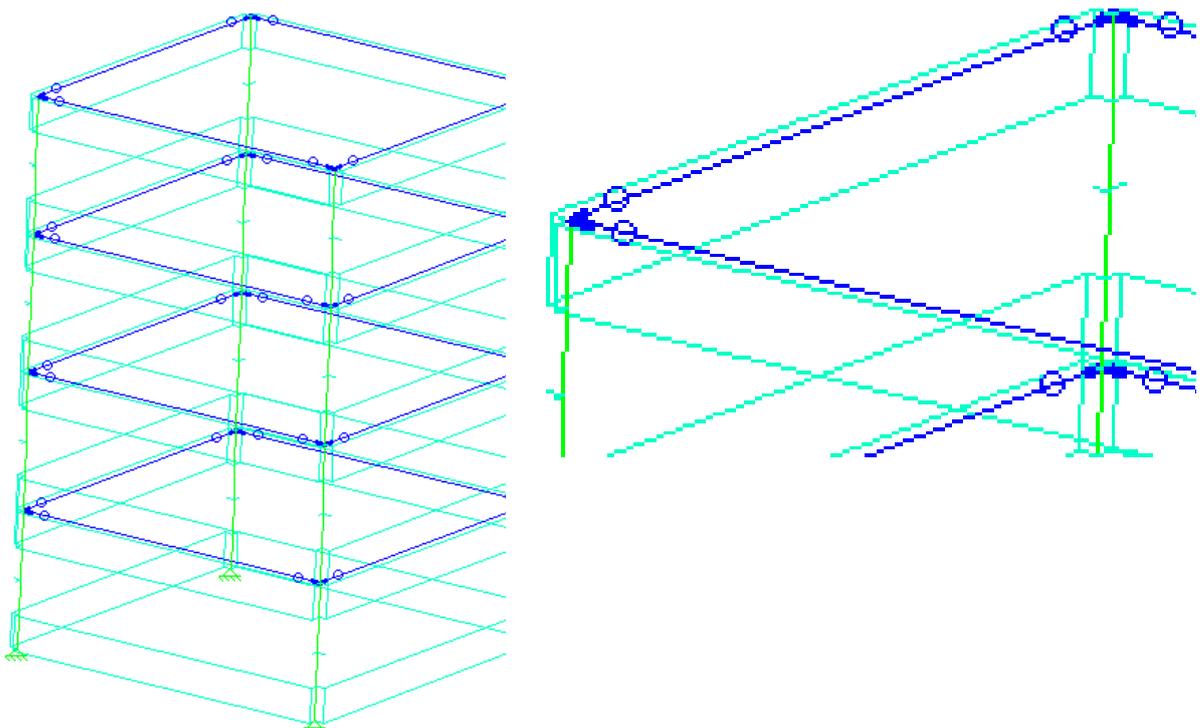
Lajes: LP26,5, com capa. Laje considerada em ligações rígidas, não sendo modeladas no exemplo, apenas colocou-se seus carregamentos de peso-próprio, 3,4 KN/m² para laje e 1,5 KN/m² para capa, e carga acidental de 1,5 KN/m²;

Painéis: painéis maciços, 12 cm de espessura, 1m de altura e 10m de comprimento. Foram considerados no modelo como elementos de superfície, nos quais foram posicionados de forma a representar os mesmos fixados sobre a face externa do pilar, através de modelagem de elementos de maior rigidez, com 26cm de comprimento, tirando-os do eixo dos pilares;

Ligações dos painéis: foram realizados cálculos dos mesmos rotulados e engastados, de forma a se comparar os resultados;

Combinação de ações: foram realizados dois modelos, um com critérios do ACI 318R-14, e outro com os critérios da ABNT NBR 6120 (1980).

Figura 30 – Modelo estrutural adotado para a análise, e detalhe do posicionamento e ligações..



5.3 Modelo de referência: Edifício sem painéis

A seguir, apresentam-se os modelos sem a utilização dos painéis. Desta forma, estabelece-se um parâmetro de comparação de resultados com os modelos que se seguirão neste trabalho, principalmente nas grandezas de momentos fletores nas bases dos pilares e deslocamentos totais nos topos. Apresentam-se aqui os resultados segundo análise de combinação de cargas recomendada pela ABNT NBR 6120 (1980) e pelo ACI-318R-14.

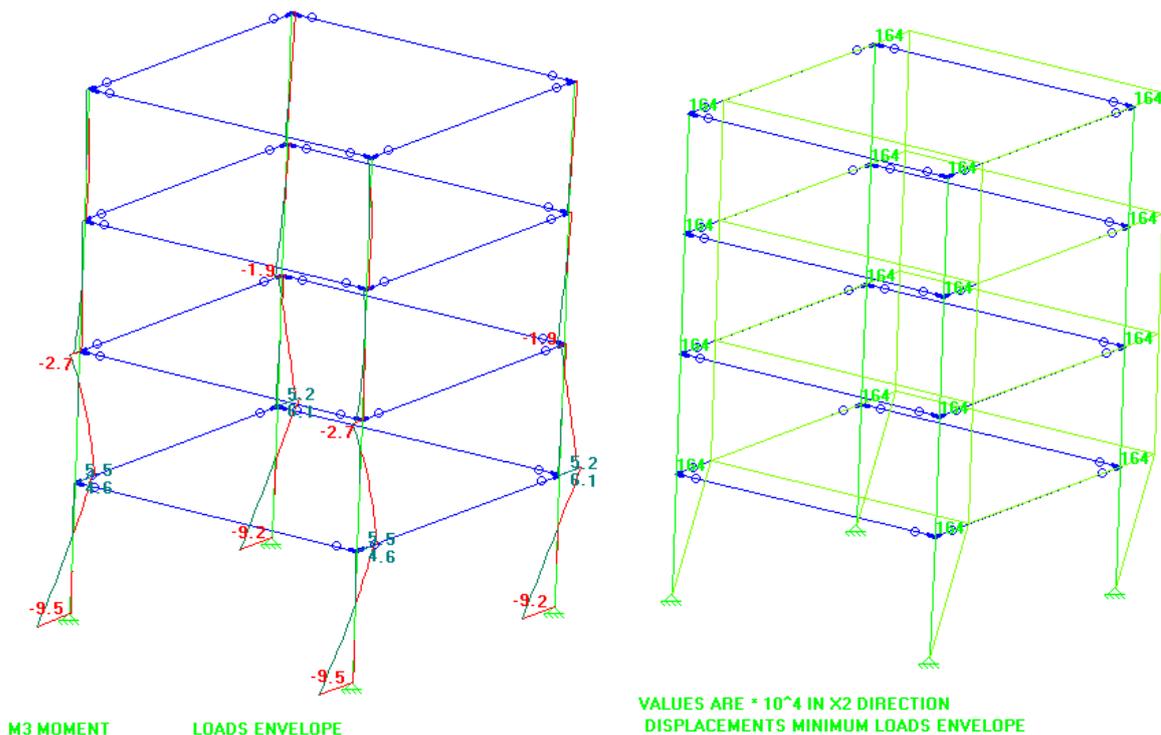
5.4 Modelo de Referência: cálculo segundo ABNT NBR 6120 (1980)

Apresenta-se, na Tabela 13, os resultados obtidos através da simulação com o modelo sem painéis contraventando, segundo combinações de esforços presentes na ABNT NBR 6120 (1980).

Tabela 13 – Esforços do modelo de referência (ABNT NBR 6120, 1980).

RESULTADOS OBTIDOS	
Momento Máximo na Base dos Pilares	95 KN.m
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	1,638 cm

Figura 32 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise NBR 6120 (1980).



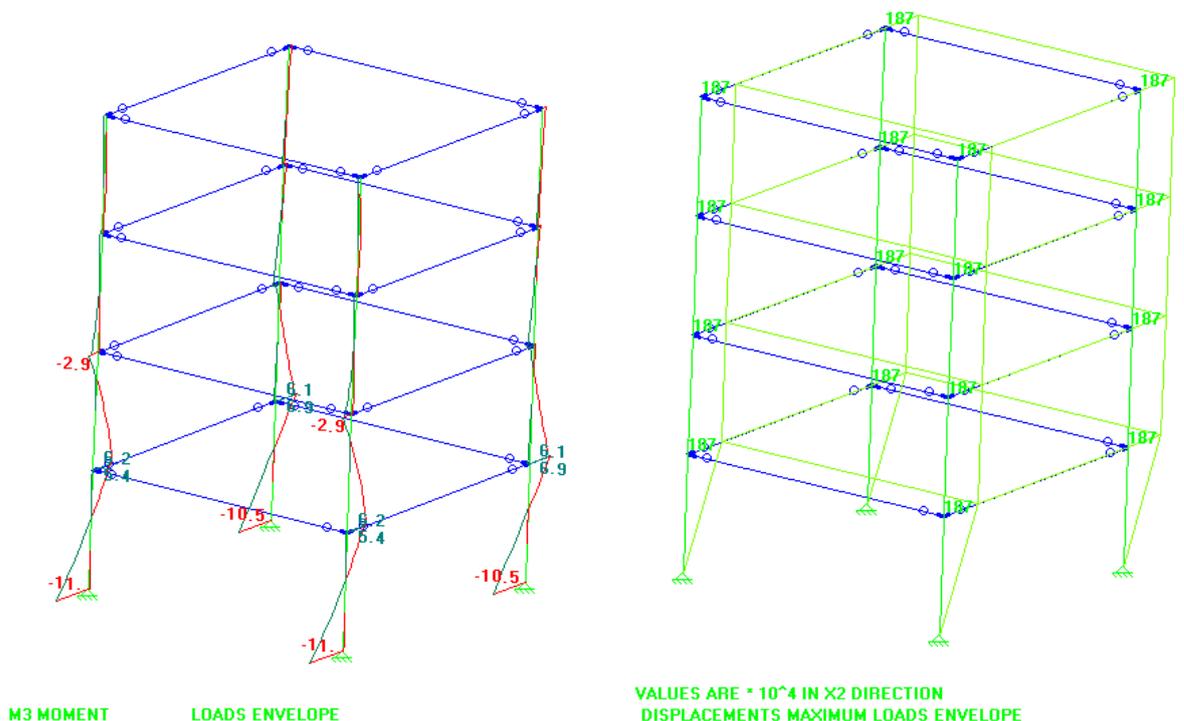
5.5 Modelo de Controle: cálculo segundo ACI-318R-14

Apresenta-se, na Tabela 14, os resultados obtidos através da simulação com o modelo sem painéis contraventando, segundo combinações de esforços presentes no ACI 318R-14.

Tabela 14 – Esforços do modelo de referência (ACI 318-R14).

RESULTADOS OBTIDOS	
Momento Máximo na Base dos Pilares	110 KN.m
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	1,872 cm

Figura 33 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise do ACI 318R-14.



5.6 Modelo com painéis rotulados: painéis que não contraventam a estrutura

Apresentam-se os resultados obtidos através da simulação com o modelo já com os painéis na estrutura, no entanto, neste item os mesmos foram rotulados em

sua extremidade, vislumbrando o que seriam painéis que não contraventam a estrutura.

5.7 Modelo com painéis rotulados: cálculo segundo NBR 6120 (1980)

Apresentam-se, na Tabela 15, os resultados obtidos através das análises feitas com o modelo no qual os painéis não contraventavam a estrutura, ou seja, apresentavam ligações rotuladas com a estrutura, permitindo somente a transmissão esforços verticais e horizontais para a ABNT NBR 6120 (1980).

Tabela 15 – Esforços do modelo com painéis rotulados (ABNT NBR 6120, 1980).

RESULTADOS OBTIDOS	
Momento Máximo na Base dos Pilares	5,38 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	277,0 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis	5,66 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	0,70 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	11.830 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,174 cm

Figura 34 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).

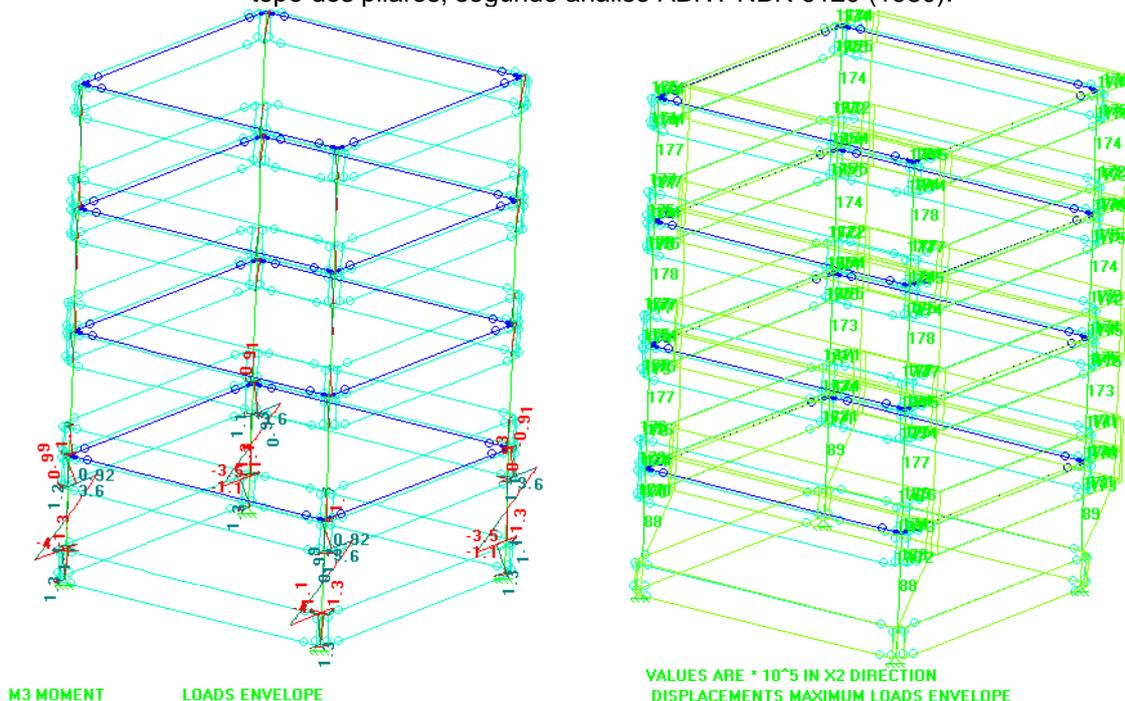


Figura 35 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).

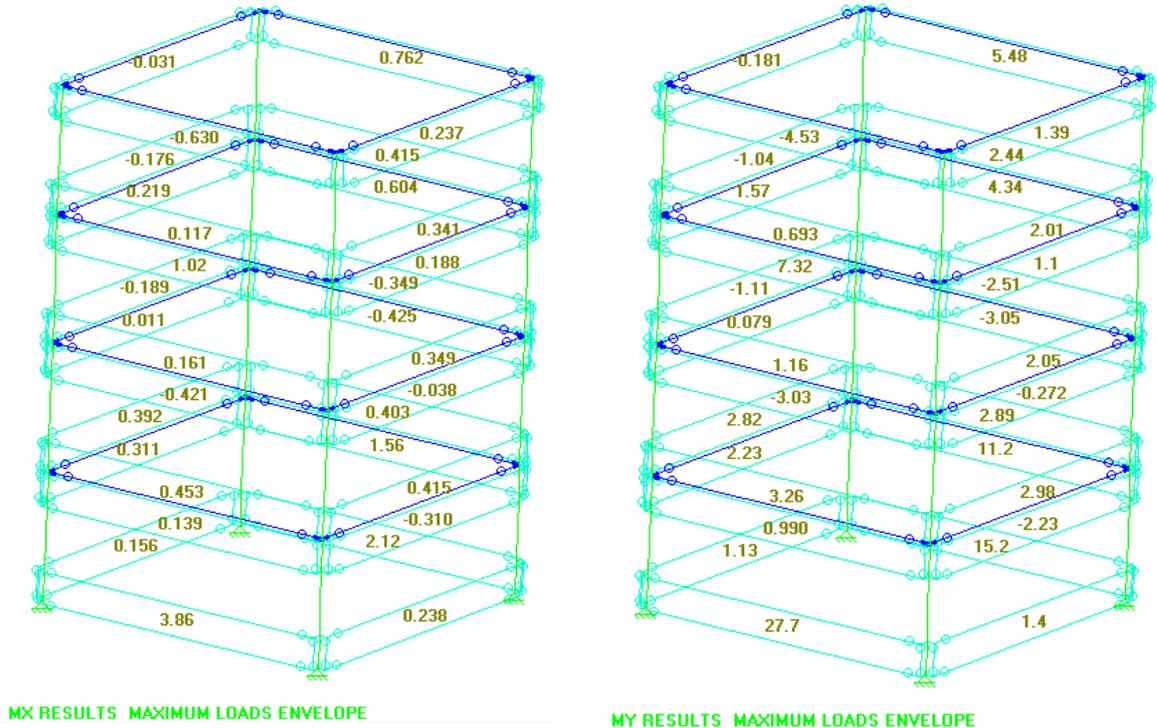
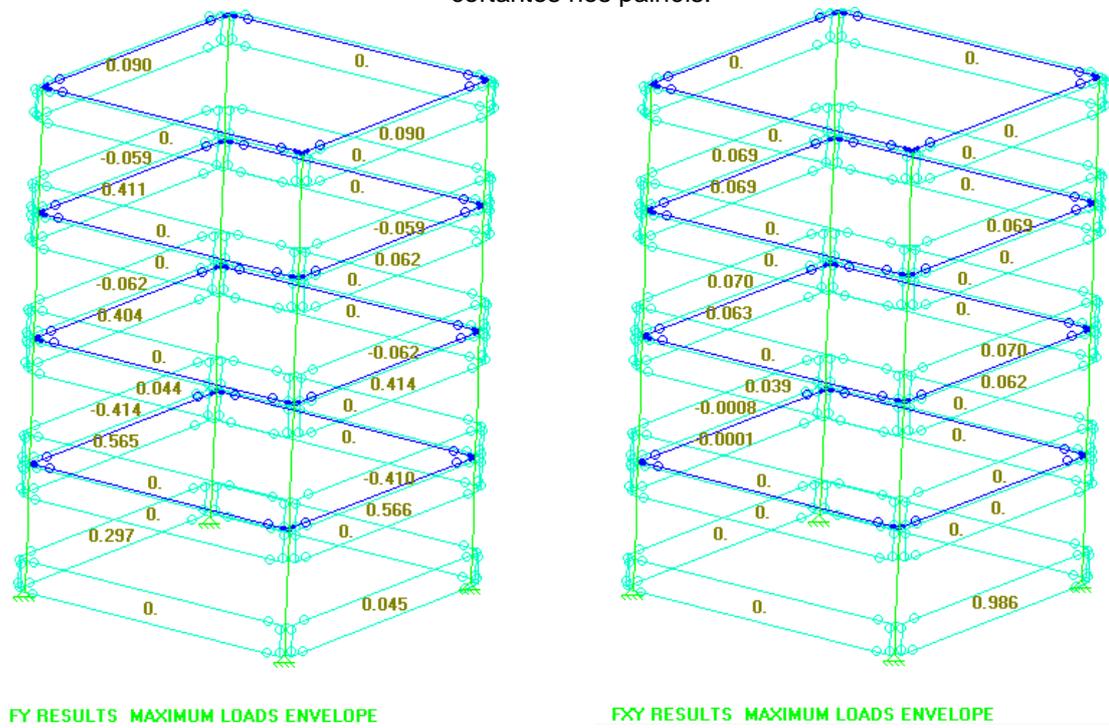


Figura 36 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY, de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.



5.8 Modelo com painéis rotulados: cálculo segundo ACI 318R-14

Apresentam-se, na Tabela 16, os resultados obtidos através das análises feitas com o modelo no qual os painéis não contraventavam a estrutura, ou seja, apresentavam ligações rotuladas com a estrutura, permitindo somente a transmissão esforços verticais e horizontais para o ACI-318R-14.

Tabela 16 – Esforços do modelo com painéis rotulados(ACI 318R-14).

RESULTADOS OBTIDOS	
Momento Máximo na Base dos Pilares	7,30 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	284,0 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis	0,91 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	9,14 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	12.140 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,199 cm

Figura 37 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo ACI 318R-14.

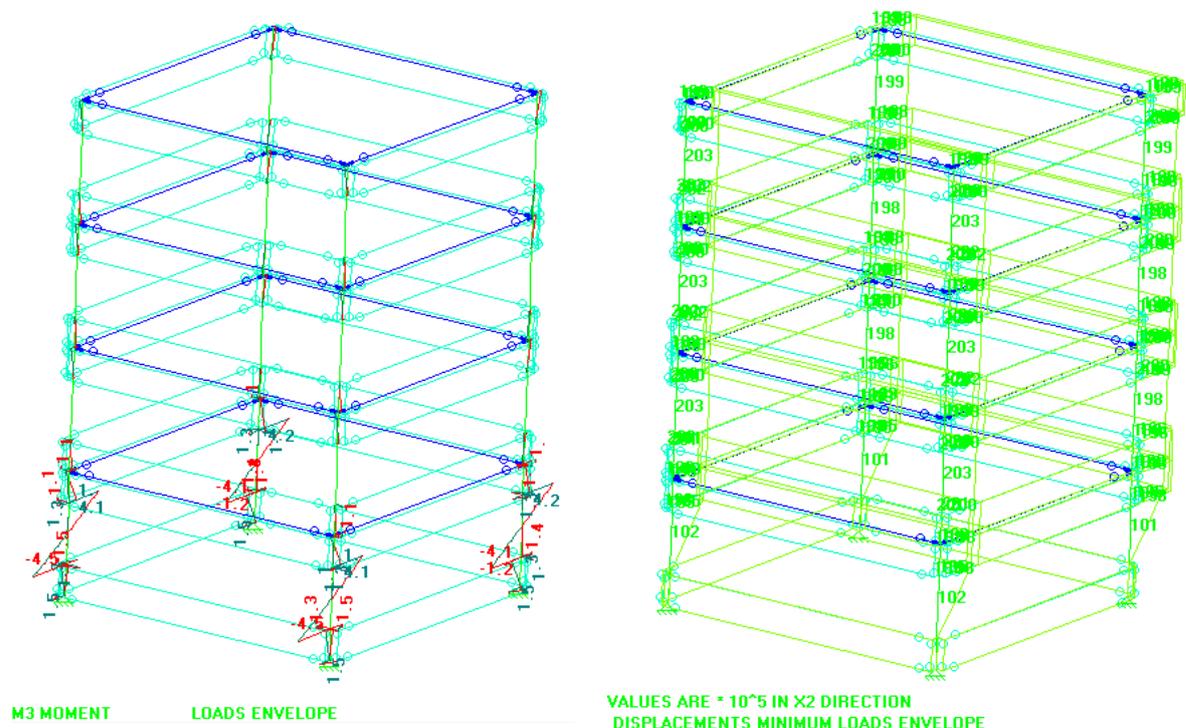


Figura 38 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ACI 318R-14.

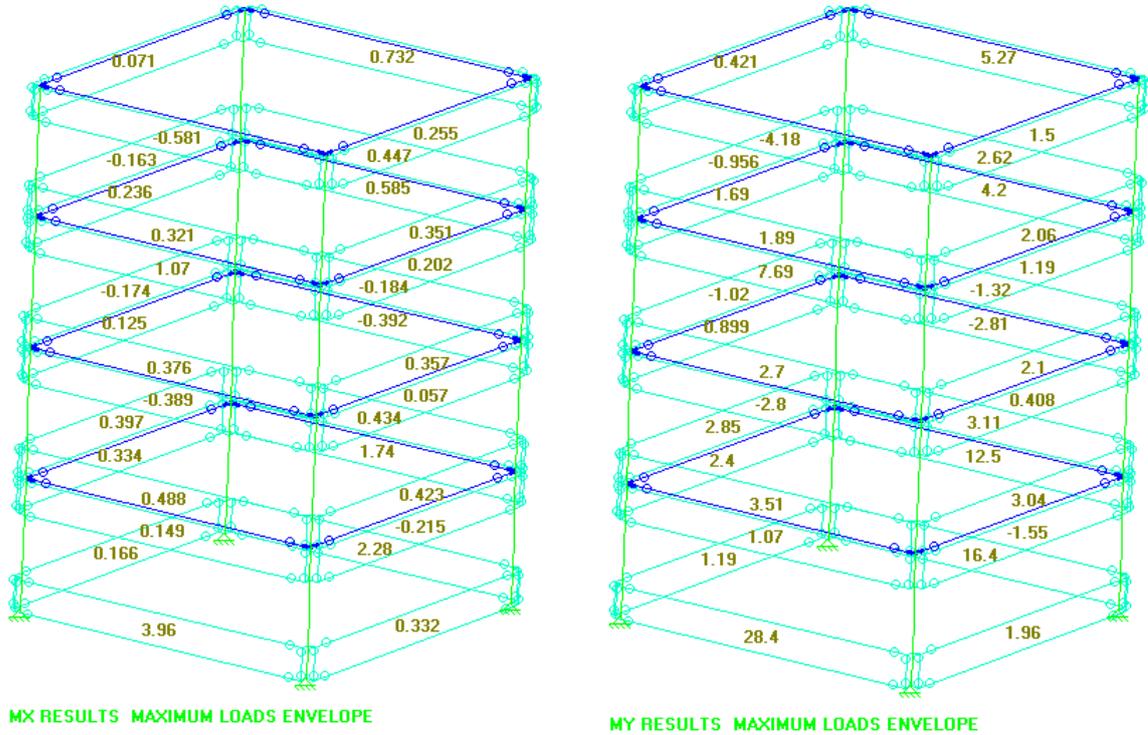


Figura 39 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY, de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.

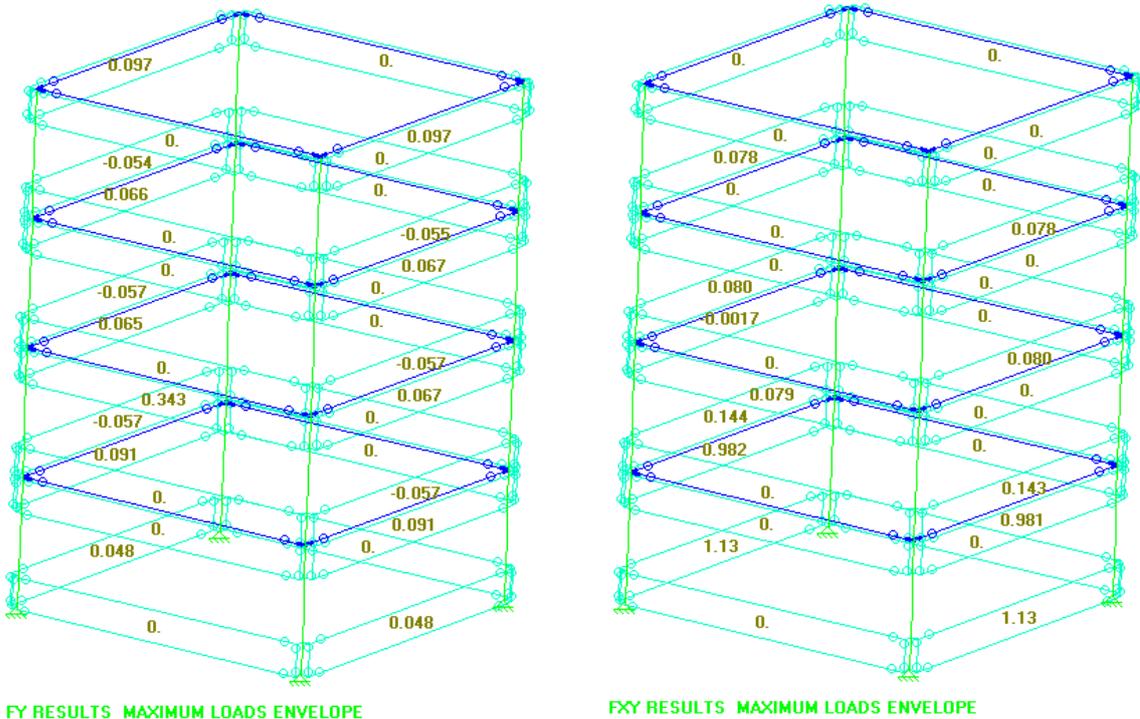


Figura 41 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ABNT NBR 6120 (1980).

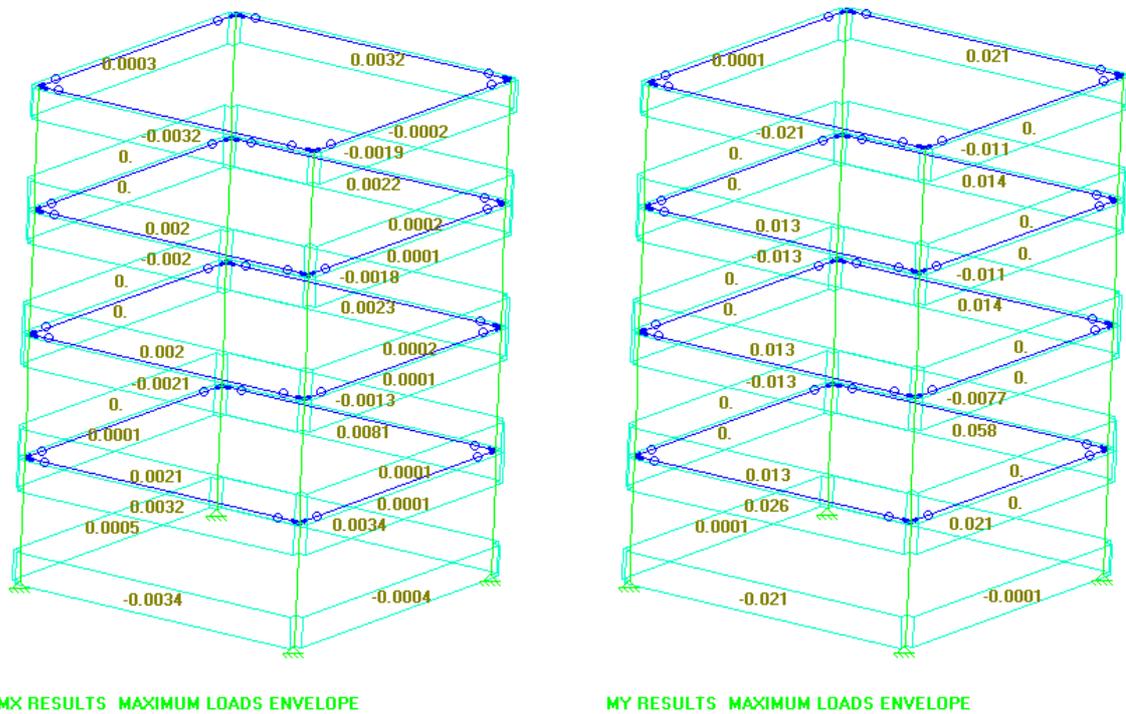
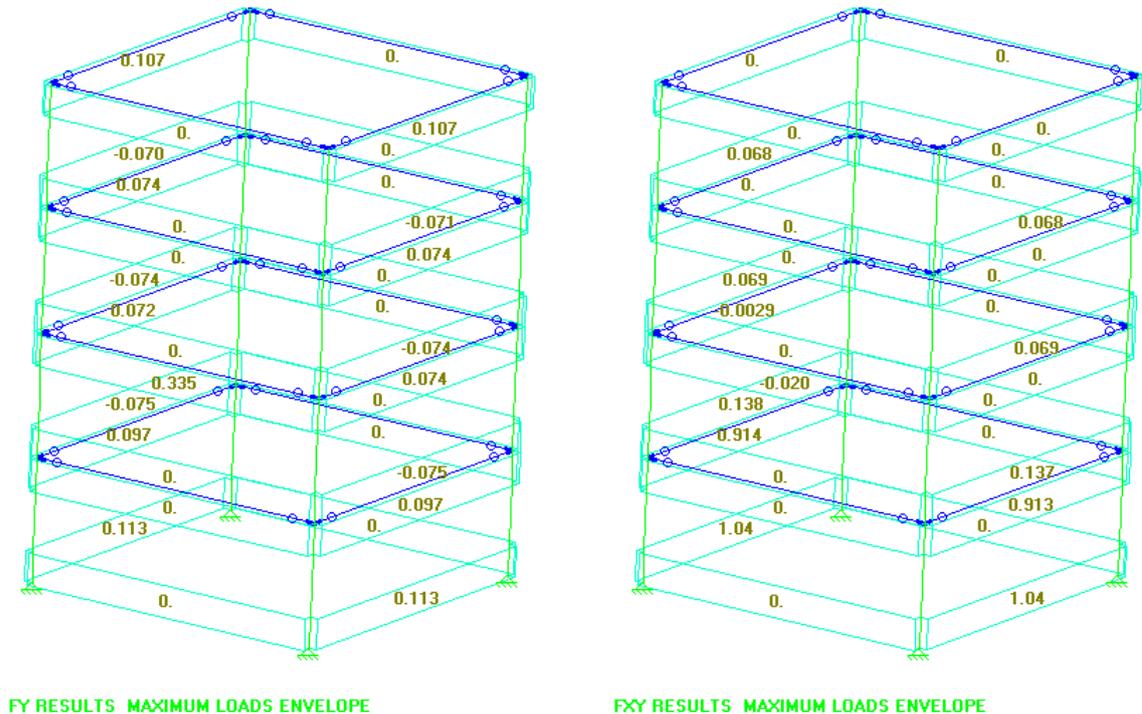


Figura 42 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY, de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.



5.11 Modelo com painéis engastados: cálculo segundo ACI 318R-14

Apresentam-se, na Tabela 18, os resultados obtidos através das análises feitas com o modelo no qual os painéis contraventavam a estrutura, ou seja, apresentavam ligações rígidas com a estrutura, permitindo a transmissão de momentos fletores para o ACI 318R-14.

Tabela 18 – Esforços do modelo com painéis engastados (ACI 318R-14).

RESULTADOS OBTIDOS	
Momento Máximo na Base dos Pilares	8,87 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	0,640 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis	1,22 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	11,90 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	5,17 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,193 cm

Figura 43 – Resultados de Momentos nos pilares da estrutura para os esforços, e deslocamentos do topo dos pilares, segundo ACI 318R-14.

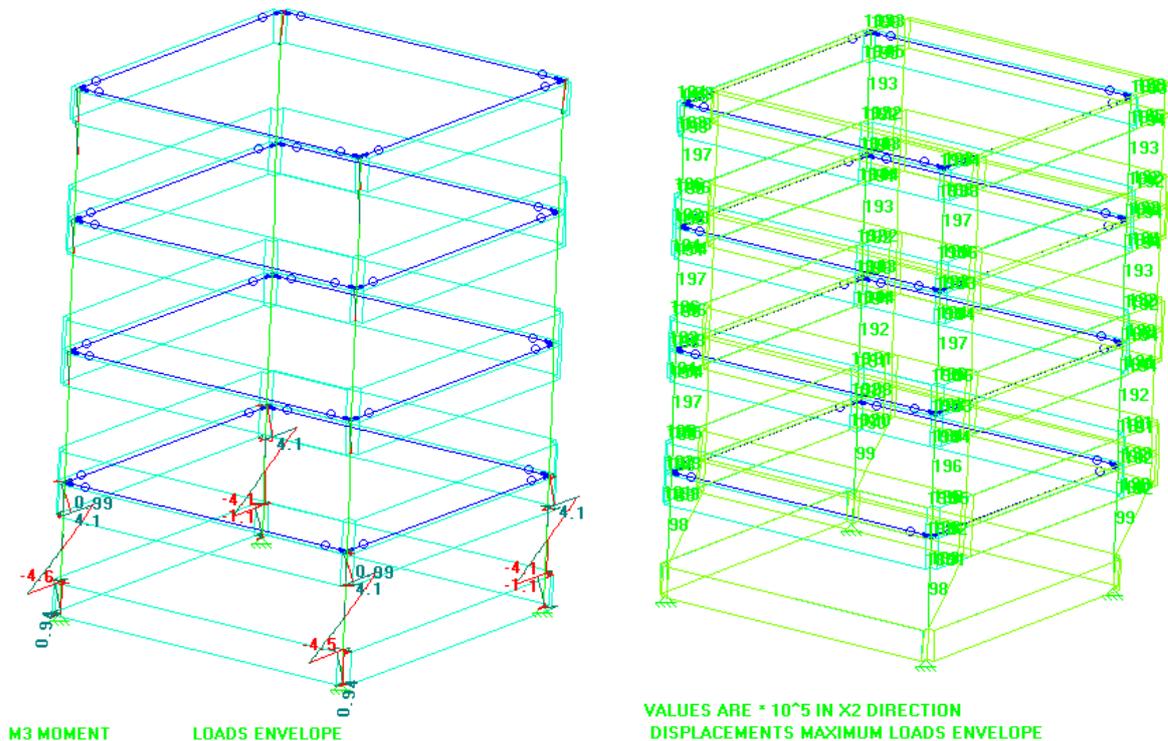


Figura 44 – Valores dos momentos máximos para cada elemento da estrutura. M_x , à esquerda, e M_y , à direita, segundo análise ACI 318R-14.

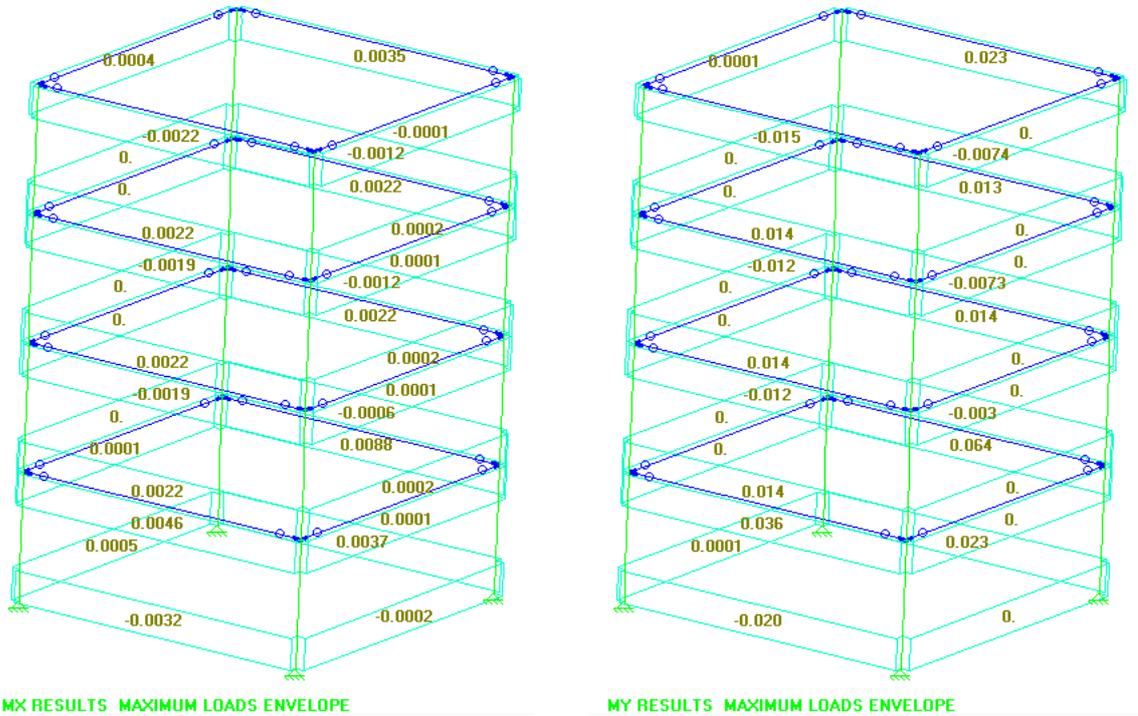
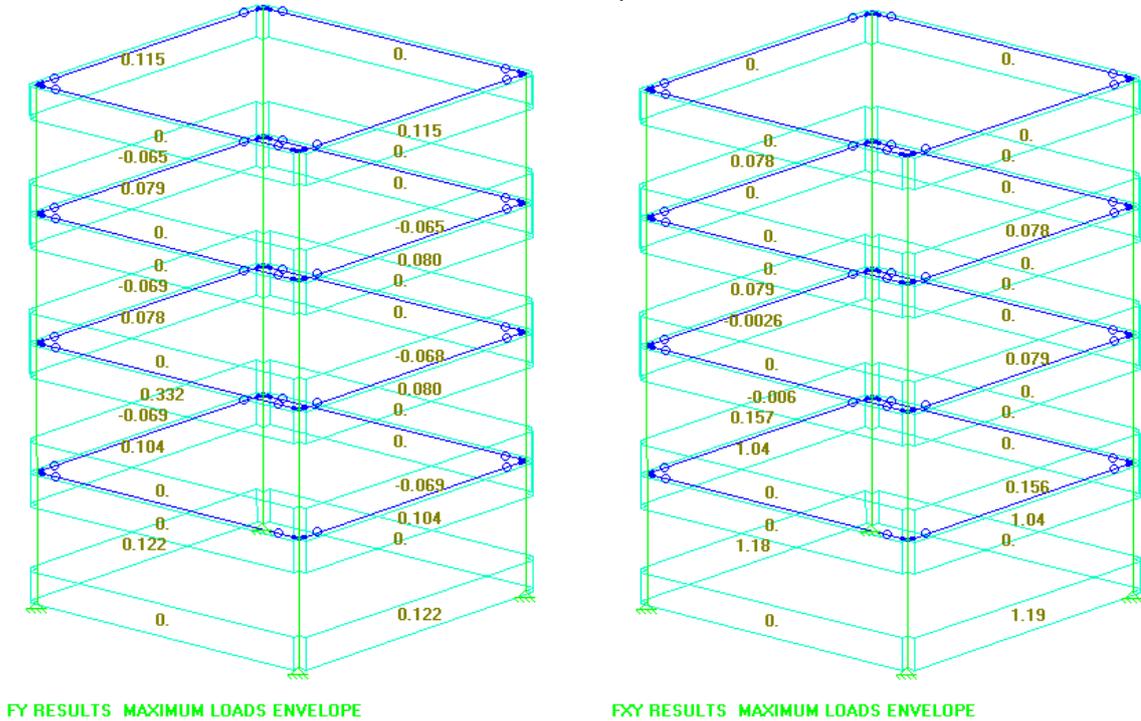


Figura 45 – À esquerda, valores das máximas forças no eixo Y nos painéis, de onde obteve-se as normais máximas. À direita, valores de máximas forças no plano XY, de onde retiram-se as máximas cortantes nos painéis.



5.12 Considerações sobre os resultados obtidos

A seguir transcrevem-se resumidamente os resultados obtidos com os modelos de cálculo nos quais se obtiveram os esforços solicitantes nos elementos estruturais:

Tabela 19 – Resumo dos esforços do modelo sem painéis.

MODELO SEM PAINÉIS	
ABNT NBR 6120 (1980)	
Momento Máximo na Base dos Pilares	95 KN.m
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	1,638 cm
ACI	
Momento Máximo na Base dos Pilares	110 KN.m
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	1,872 cm

Tabela 20 – Resumo dos esforços do modelo com painéis rotulados.

MODELO COM PAINÉIS ROTULADOS	
ABNT NBR 6120 (1980)	
Momento Máximo na Base dos Pilares	5,38 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	277,0 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis (Força Axial)	5,66 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	0,70 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	11.830 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,174 cm
ACI 318R-14	
Momento Máximo na Base dos Pilares	7,30 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	284,0 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis (Força Axial)	0,91 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	9,14 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	12.140 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,199 cm

Tabela 21 – Resumo dos esforços do modelo com painéis engastados.

MODELO COM PAINÉIS ENGASTADOS	
ABNT NBR 6120 (1980)	
Momento Máximo na Base dos Pilares	7,39 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	0,210 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis (Força Axial)	3,35 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	10,40 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	4,54 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,169 cm

ACI 318R-14	
Momento Máximo na Base dos Pilares	8,87 KN.m
Momento Flexão Máximo nos Painéis	0,640 KN.m (M_y)
Máxima Normal nos Painéis (Força Axial)	1,22 KN
Máxima Cortante Vertical nos Painéis	11,90 KN
Máxima Cortante Horizontal nos Painéis	4,54 KN
Deslocamento Máximo no topo dos pilares	0,193 cm

Desta forma, podemos verificar que:

- Os deslocamentos no topo do edifício foram sensivelmente maiores no modelo sem os painéis, denotando que estes elementos de superfície ajudam ativamente na rigidez da estrutura em relação aos esforços laterais;
- Assim como os deslocamentos, os esforços de momento na base dos pilares reduziram a menos de 10% do que na estrutura sem painéis, denotando que os painéis ajudaram a resistir boa parcela dos esforços laterais do edifício;
- O cálculo dos esforços solicitantes pelas combinações de carga do ACI 318R-14 se mostraram mais conservadores do que o da ABNT NBR 6120 (1980), com resultados de flexão nos painéis que chegam a ser três vezes maiores;
- Os momentos fletores nos painéis modelados com rótulas em seus apoios apresentaram momentos fletores muito superior aos modelos engastados, podendo estar relacionados com a ausência das folgas de projeto presentes nas ligações de painéis, e não representadas no modelo;
- Os momentos nas bases dos pilares do modelo engastado foram superiores ao de elementos rotulados, podendo denotar uma maior transferência de esforços.

Desta forma, podemos concluir que é essencial a análise por parte do engenheiro projetista, bem como desenvolvimento em pesquisas, no entendimento do funcionamento destes elementos estruturais, tanto em campo como nas considerações feitas para modelagem.

De acordo com o arranjo estrutural, ligações, entre outros, os resultados dos esforços mudam sensivelmente, podendo assim ser usados a favor do projetista, uma vez verificado qual seria o melhor custo benefício para cada projeto.

A partir dos esforços solicitantes obtidos neste item, será realizado o dimensionamento dos painéis. Como parâmetro adotou-se os valores de esforços obtidos pelo ACI 318R-14 para painéis engastados nos pilares.

5.13 Projeto de Painel: Modelo Engastado (contraventado)

Partindo-se dos resultados obtidos no item 4.2.3.2 para painéis engastados, segundo combinações de carga presentes no ACI 318R-14, apresentam-se a seguir modelos de dimensionamento de painéis estruturais de contraventamento segundo métodos do próprio ACI 318R-14, bem como recomendações presentes no projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016).

5.13.1 ACI 318R-14

Considerando o modelo acima proposto, apresenta-se a recomendação de dimensionamento contida no ACI 318R-14, conforme já abordado no item 3.2 deste estudo.

- I. Retomando o exposto anteriormente, o método simplificado se define verificação da seguinte forma:

$$P_n = 0,55 \cdot f'_c \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{kl_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right]$$

$$P_n = 0,55 \cdot 4351,2 \cdot (39,37 \cdot 4,72) \cdot \left[1 - \left(\frac{0,8 \cdot 393,7}{32 \cdot 39,37} \right)^2 \right]$$

$$P_n = 417.380 \text{ lb}$$

$$\phi P_n = 0,65 \cdot 417.380 = 271.250 \text{ lb}$$

Comparando-se o resultado de resistência, com os esforços obtidos da análise de combinações do modelo, e de acordo com nomenclatura da figura R11.4.1.3 extraída do ACI 318R-14, temos:

$$\phi P_u = 1,22KN = 274,3 \text{ lb}$$

Este resultado é pouco maior do que a capacidade resistente do painel, como se mostra abaixo:

$$\phi P_u = 1,22KN = 274,3 \text{ lb} \geq \phi P_n = 271,3 \text{ lb}$$

Adotam-se esses valores como aproximadamente iguais, uma vez que representam diferença de 1,1%, seguindo assim com o dimensionamento do painel.

II. Conforme aponta o ACI 318R-14, e convenientemente exposto na obra de McCormac (2013), para painéis que suportam esforços laterais como de vento, bem como tem dimensão de comprimento sensivelmente maior que a altura, tem esforços de cortante preponderantes, e previstos de verificação segundo o ACI 318R-14.

Assim, retomando as equações já apresentadas no item 3.2 deste trabalho.

$$V_u \leq \phi V_n$$

$$V_u \leq \phi V_c + \phi V_s$$

Temos primeiramente do item 11.5.3 do ACI 318R-14, a verificação se a largura do painel é suficiente, assim:

$$V_n = 10 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot h \cdot d$$

$$V_u \leq V_n = 10 \cdot \sqrt{4351,2} \cdot 4,72 \cdot 314,96$$

$$V_u = 2.675,2 \text{ lb} \leq V_n = 981.500 \text{ lb}$$

Uma vez a verificação anterior atendida, considerando os esforços solicitantes obtidos do item 4.2.3.2 deste trabalho, temos em Sistema de Unidades Americano:

$$N_u = 1,22 \text{ KN} = 274,3 \text{ lb}$$

$$M_u = 0,640 \text{ KN.m} = 5664,5 \text{ lb.in}$$

$$V_u = 4,54 \text{ KN} = 1.020,53 \text{ lb}$$

Temos também da tabela 11.5.4.6 do ACI 318R-14, valores para cálculo detalhado de V_c , que será o menor entre as equações abaixo:

$$V_c = 3,3 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot h \cdot d + \frac{N_u \cdot d}{4 \cdot l_w}$$

$$V_c = 3,3 \cdot 1 \cdot \sqrt{4351,2} \cdot 4,72 \cdot 314,96 + \frac{274,3 \cdot 314,96}{4 \cdot 393,7}$$

$$V_c = 323.660,3 \text{ lb}$$

Ou,

$$V_c = \left[0,6 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{l_w \left(1,25 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + 0,2 \cdot \frac{N_u}{l_w \cdot h} \right)}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \right] \cdot h \cdot d$$

$$V_c = \left[0,6 \cdot 1 \cdot \sqrt{4351,2} + \frac{393,7 \left(1,25 \cdot 1 \cdot \sqrt{4351,2} + 0,2 \cdot \frac{274,3}{393,7 \cdot 4,72} \right)}{\frac{5664,5}{1020,5} - \frac{393,7}{2}} \right] \cdot 4,72 \cdot 314,96$$

$$V_c = 311.182,2 \text{ lb}$$

Portanto, adotamos $V_c = 311.182,2 \text{ lb}$

Do item 11.6.1 do ACI 318R-14, tem-se que se atendido $V_u \leq 0,5 \cdot V_c$, não será necessária armadura de estribos horizontais complementar para efeitos de cortante horizontal, assim:

$$V_u \leq 0,5 \cdot \phi \cdot V_c$$

$$V_c = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 311.182,2 = 116.693,3 \text{ lb}$$

Desta forma,

$$V_u = 1.020,5 \leq 116.693 = 0,5 \cdot \phi \cdot V_c$$

Sendo dispensável desta forma o complemento de armaduras de estribos longitudinais ao longo da seção da peça para cortante horizontal, sendo apenas fixado o mínimo exigido pelo ACI 318R-14.

No entanto, apresenta-se abaixo o procedimento caso fossem necessárias armaduras complementares:

$$V_u = \phi V_c + \phi V_s$$

Com:

$$\phi V_s = \phi \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s}$$

Substituindo teríamos:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_y \cdot d}$$

Da tabela 11.6.1 deste mesmo código, tem-se que as armaduras mínimas para esforços cortantes horizontais e verticais, ρ_t e ρ_t , iguais a pelo menos 0,001 in.

Assim:

$$s = \frac{2 \cdot 0,11}{0,001} = 220 \text{ in}$$

Temos ainda que o espaçamento vertical máximo das barras é de:

$$\frac{l_w}{5} = 78 \text{ in}$$

Sendo ambos os espaçamentos acima demonstrados superiores a altura h_w da peça, adota-se como armadura 02 camadas de barras #3, com 10 in de espaçamento.

III. Verifica-se ainda, valores de ρ_t , segundo item 11.6.2 do ACI 318R-14, deve ser maior que 0,0025. Desta forma, para definição da armadura transversal temos:

$$\rho_t = \frac{2 \cdot 0,11}{4,72 \cdot 10} = 0,00466$$

$$\min \rho_l = 0,0025 + 0,5 \cdot \left(2,5 - \frac{h_w}{l_w} \right) \cdot (\rho_h - 0,0025)$$

$$\min \rho_l = 0,0025 + 0,5 \cdot \left(2,5 - \frac{39,37}{393,7} \right) \cdot (0,00466 - 0,0025)$$

$$\min \rho_l = 0,00509$$

Assim, podemos adotar para armadura transversal:

$$s = \frac{2 \cdot (0,10 \text{ in}^2)}{4,72 \cdot 0,00509} = 8,32 \text{ in} = 21,1 \text{ cm}$$

Faz-se ainda a verificação, uma vez que o espaçamento dos estribos não pode ser maior que $l_w/3$, assim:

$$\frac{l_w}{3} = \frac{393,7}{3} = 131 \text{ in}$$

Por fim, também se adotam 2 barras #3, porém com espaçamento de 8 in.

IV. Dimensiona-se a seguir as armaduras verticais de flexão no painel, advindas da solicitação da cortante paralela à horizontal do painel, assim:

$$M_u = V_u \cdot h_w = 1020,5 \cdot 39,37 = 40.177,2 \text{ lb.in (na base do painel)}$$

$$\frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{40177,2}{0,9 \cdot 4,72 \cdot 314,96^2} = 0,0953$$

Tendo $\rho_t = 0,00118$, do apêndice A, tabela A.12:

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d$$

$$A_s = 0,00118 \cdot 4,72 \cdot 314,96 = 1,72 \text{ in}^2$$

Assim, adotam-se 10 barras #4 em cada face, adotando que o esforço pode vir de qualquer dos lados.

5.13.2 ABNT NBR 16475 (2016)

Conforme se abordou no item 3.1 deste trabalho, para o dimensionamento de painéis pré-moldados de concreto, são apresentadas premissas no projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016).

Este projeto de norma cita possibilidade de cálculo por pilar, ou pilar parede, no caso de o comprimento do painel ser inferior a dez vezes a sua espessura, assim para o modelo em estudo:

$$\frac{l}{b_w} = \frac{1000}{12} = 83,3 > 10$$

Assim, exclui-se a possibilidade de cálculo como pilar, ou pilar-parede.

Mais adiante, cita que os painéis devem ser calculados à flexão composta para os esforços atuantes, considerando esforços transversais, como o vento, bem como excentricidades.

O referido projeto de norma trata ao longo dos itens 15.6 a 15.10 de cálculo e dimensionamento de esforços resistentes, apresentando ora fórmulas específicas, ora referenciando a ABNT NBR 16055 (2012).

Vale ressaltar, que no item 3.1 deste estudo há a citação de recomendação para elementos especiais da norma ABNT NBR 6118 (2014), fazendo referência a cálculo e dimensionamento destes elementos como vigas-parede.

Resistência sob normal de compressão

Do item 16.6.1 do projeto de norma da ABNT NBR 16475, é definida força resistente de painéis sob normal de compressão:

$$N_{d,resist} = b_{ef} \cdot t_{ef} \cdot f_{cd} \cdot \varphi$$

Sendo:

$$t_{ef} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_g}{L}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \frac{0,12 \cdot 1^3}{12}}{10}} = 0,22$$

Para o cálculo do b_{ef} , a norma cita o menor de dois casos, um com cargas concentradas, outro com momento concentrado. No modelo em análise, nenhuma destas situações ocorre isoladamente, uma vez que no painel em estudo há peso próprio, cargas de vento, e transferência de esforços pelos apoios. Considera-se então b_{ef} para carga uniformemente distribuída, assim:

$$b_{ef} \leq d = 10 - 2 \cdot 0,25 = 9,5 \text{ m}$$

Assim, $N_{d,resist}$, adotando-se para fluência o valor de 2,6, de acordo com tabela 8.2 da ABNT NBR 6118 (2014), temos:

$$N_{d,resist} = 9,5 \cdot 0,22 \cdot \frac{30}{1,4} \cdot 0,554 = 24,81 \text{ KN/m}$$

Ainda, tem-se do mesmo item do projeto de norma que:

$$N_{d,resist} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \cdot a_1 \cdot b_{ef} \cdot t_{ef} \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \left(\frac{l_e}{32 \cdot t_{ef}}\right)^2\right]$$

Sendo:

$$a_1 = 0,85 - 0,0015 \cdot 30 \geq 0,67$$

$$a_1 = 0,80 \geq 0,67$$

$$\beta = \frac{l}{b} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$l_e = \frac{l}{1 + \beta^2} = \frac{1}{1 + (0,1)^2} = 0,99$$

$$\varphi = 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{tot}}{t_{ef}}\right) - 0,02 \cdot \frac{l_e}{t_{ef}} \leq \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{tot}}{t_{ef}}\right)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} e_{ef} &= e_{min} + e_{toler} + e_{temp} \\ e_{ef} &= (1,5 + 0,03t) + \left(\frac{L}{360}\right) + \left(\frac{C \cdot \Delta T \cdot L}{8 \cdot t}\right) \\ e_{ef} &= (0,015 + 0,03 \cdot 0,12) + \left(\frac{10}{360}\right) + \left(\frac{10^{-5} \cdot (35 - 5) \cdot 10}{8 \cdot 0,12}\right) \\ e_{ef} &= 0,049 \text{ m} \end{aligned}$$

Assim,

$$\begin{aligned} \varphi &= 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0,049}{0,22}\right) - 0,02 \cdot \frac{0,99}{0,22} \leq \left(1 - 2 \cdot \frac{0,049}{0,22}\right) \\ \varphi &= 0,54 \leq 0,554 \end{aligned}$$

Finalmente, temos,

$$N_{d,resist} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \cdot 0,80 \cdot 9,5 \cdot 0,22 \cdot \frac{30}{1,3} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,99}{32 \cdot 0,22}\right)^2\right] = 25,20 \text{ KN/m}$$

Verificação à compressão e à tração devido a momentos no plano da parede

O projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016) refere-se à norma ABNT NBR 16055 (2012) com relação a verificações de compressão e de tração na seção do painel devido a presença esforços ortogonais ao plano do painel, como o vento.

No item 17.5.3 da ABNT NBR 16055 (2012), esta norma recomenda que na ausência de método de dimensionamento, o procedimento de cálculo apresentado no item 17.5.2 pode ser utilizado.

Assim:

$$n_{d,resist} \geq \frac{3 \cdot n_{d,max} + n_{d,min}}{4}$$

Temos, para o modelo em estudo:

$$\begin{aligned} n_{d,max} &= 6,56 \text{ KN} \\ n_{d,min} &= -1,18 \text{ KN} \end{aligned}$$

Portanto:

$$n_{d,resist} \geq \frac{3 \cdot 6,56 - 1,18}{4} = 4,625 \text{ KN}$$

O modelo atende então a expressão acima.

Verificação da resistência à força cortante

Para o dimensionamento da resistência à força cortante, o projeto de norma ABNT NBR 16475 (2016) novamente remete à norma de paredes de concreto ABNT NBR 16055 (2012). Assim, de acordo com item 17.6.2 desta última, tem-se:

$$V_d \leq f_{vd}$$

$$f_{vd} = 0,3 \cdot f_{ct,d} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cmd}}{f_{ck}}\right) \sum t \cdot l$$

A condição abaixo deve ser aceita:

$$1 + 3 \frac{\sigma_{cmd}}{f_{ck}} \leq 2$$

$$1 + 3 \frac{[11900/(0,12 \cdot 1)] \cdot 10^{-6}}{30} \leq 2$$

$$1,01 \leq 2 \text{ OK!}$$

Sendo:

$$f_{ct,d} = \frac{0,21 \cdot (f_{ck})^{2/3}}{\gamma_c}$$

$$f_{ct,d} = \frac{0,21 \cdot (30)^{2/3}}{1,3} = 1,56 \text{ MPa}$$

Por fim,

$$f_{vd} = 0,3 \cdot 1,56 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{[11900/(0,12 \cdot 1)] \cdot 10^{-6}}{30}\right) \cdot 0,12 \cdot 10$$

$$f_{vd} = 0,57 \text{ KN}$$

Como, $V_d \geq f_{vd}$, temos:

$$\frac{A_{sh}}{s} = \frac{V_d}{f_{yd}}$$

$$\frac{A_{sh}}{s} = \frac{11900}{50000/1,10} = 0,26 \text{ cm}^2$$

Cálculo de armaduras longitudinais

Conforme mostrado neste item 4.3.2, o projeto de Norma ABNT NBR 16475 (2016) dá alguns parâmetros de verificação, bem como de armaduras mínimas. No entanto, cita que os painéis devem ser calculados à flexão composta para os esforços atuantes, considerando esforços transversais, porém não exemplifica um método ou procedimento específico para obtenção das armaduras longitudinais através do momento fletor solicitante.

Desta forma, realiza-se um cálculo simplificado, através de referência citada de cálculo dos painéis através de modelo de viga parede. Assim, tem-se:

$$R_{td} = \frac{M_d}{z}$$

Onde,

$$\frac{L}{h} = \frac{10}{1} = 10$$

E o valor de M_d , extraído do modelo, igual a 0,614 kN.m.

Assim, “z” é dado pela teoria de vigas esbeltas.

$$z = d - 0,4 \cdot x, \text{ adotando-se } d = 0,96 \text{ m}$$

$$z = 0,96 - 0,4 \cdot 0,038 = 0,945 \text{ m}$$

Então,

$$R_{td} = \frac{0,614}{0,945} = 0,649 \text{ kN}$$

Por fim a armadura adicional longitudinal, tem-se:

$$A_s = \frac{R_{td}}{f_{yd}} = \frac{0,649}{\frac{500}{1,15}} = 0,015 \text{ cm}^2$$

O valor da armadura está condicionado ao valor do esforço do momento fletor, que apresentou valores abaixo de um momento mínimo, portanto, deverá ser empregada a taxa de armadura mínima no detalhamento do painel.

5.14 Considerações Finais

Por meio dos modelos de cálculo apresentados, pode-se verificar maneiras distintas de analisar painéis estruturais de forma analítica. Cada qual possui um procedimento o qual tem origem em diferentes entendimentos sobre o comportamento dos painéis.

No caso do ACI 318R-14, verificam-se equações práticas empíricas, as quais padronizam situações mais comuns deste tipo de estrutura. Em geral ainda, as combinações de carregamentos utilizada nesta norma também levou a esforços maiores do que os analisados pelas normas brasileiras.

Com relação às normativas brasileiras, verifica-se que muitas das análises ali presentes remetem a norma de paredes de concreto, assim como não é especificado modelo de cálculo para a obtenção de armaduras longitudinais. A ABNT NBR 6118 (2014) trata destes elementos como regiões especiais, de cálculo através de teorias para vigas-parede.

6. CONCLUSÕES

O trabalho tratou do assunto relacionado ao estudo sobre o projeto estrutural de painéis em concreto pré-moldado. Com a revisão bibliográfica, bem como da análise preliminar realizada neste trabalho, podemos verificar os seguintes pontos:

- O estudo dos painéis pré-moldados é algo pouco difundido no Brasil, sendo até deficiente em quantidade de informações e pesquisas nesta área;
- Existem projetos de implantação de sistemas estruturais pré-moldados em diversas regiões do país, porém seu uso como elemento que suporta as ações globais do edifício ainda são limitadas;
- Bibliografias internacionais apontam para uma grande diferença no nível de industrialização e utilização de painéis como componentes do sistema estrutural. Há diversas décadas esta tecnologia vem sendo empregada, trazendo mais uma opção de escolha para a construção civil;
- Estudos anteriores apontam que os painéis exercem grande influência nas estruturas pré-moldadas quando estes são realizados com ligações previstas para a distribuição de esforços entre a estrutura e o painel;

Estudos anteriores apontam que os painéis exercem grande influência nas estruturas pré-moldadas quando estes são realizados com ligações previstas para a distribuição de esforços entre a estrutura e o painel.

Os modelos de cálculo utilizados comprovam o pesquisado na bibliografia, apontando para uma influência significativa dos painéis em reduzir o deslocamento e

o momento máximo nas bases dos pilares do edifício de múltiplos pavimentos estudado.

Os modelos de cálculo utilizados comprovam o pesquisado na bibliografia, apontando para uma influência significativa dos painéis em reduzir a deslocabilidade e os momentos fletores nas bases dos pilares do edifício de múltiplos pavimentos estudado.

A norma do ACI 318R-14 apresenta diversas fórmulas empíricas, e modelos simplificados para cálculo dos esforços, e obtenção de armaduras. Já a proposta de norma brasileira para painéis pré-moldados apresenta fórmulas, ora teóricas ora empíricas, para o dimensionamento do painel, porém remete o processo de cálculo para outras normas, tais como a norma de paredes de concreto, e carece de diversas informações ou definições para o projeto do painel, seja ele de contraventamento ou não, ou seja, não apresenta um modelo incorporado de verificação e cálculo de armaduras longitudinais e transversais.

Os modelos de cálculo realizados conforme as normas brasileiras e as normas americanas apontam para diferenças significativas no dimensionamento das armaduras.

Finalmente, o trabalho proposto, específico para o caso de projeto estrutural de painéis em concreto pré-moldado, se mostrou um desafio de grande proporção que necessita de mais estudos, tanto teóricos quanto experimentais, para se terem melhores entendimentos sobre o seu comportamento estrutural e o seu projeto.

6.1 Propostas de trabalhos futuros

Diante das análises realizadas, e das conclusões obtidas verificou-se que o assunto de painéis pré-moldados tem muito a ser desenvolvido, principalmente no Brasil. Procurou-se através deste trabalho contribuir, e na linha deste pensamento, apresentam-se a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- Análise das ligações de painéis, com a utilização dos mesmos como contraventamento da estrutura, ou somente de fechamento;
- Análise do comportamento estrutural dos painéis, através de uma análise mais específica e profunda, utilizando-se de ensaios de campo, comparando-se com os modelos de cálculo consagrados mais utilizados;
- Análise de painéis pré-moldados contraventando as estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute. **ACI 318R-14**: Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, 2014.

American Concrete Institute. **ACI 533R-11**: Guide for precast concrete wall panels. Farmington Hills, 2012.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013;

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16055**: Paredes de concreto moldadas no local para a construção de edificações. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16475**: Painéis de parede de concreto pré-moldado — Requisitos e procedimentos. Projeto em Consulta Nacional. Rio de Janeiro, 2016.

BARTH, F. **Caracterização tecnológica do sistema construtivo: casas industrializadas dominó**. Relatório Técnico. LSC 008. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

CASTILHO, V. C. **Análise Estrutural de painéis de concreto pré-moldado considerando a interação com a estrutura principal**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Editora EdUFSCar. 4^o ed. São Carlos. 2014.

DE PAULA, G. F. **Interação entre painéis pré-moldados de concreto e a estrutura principal por meio de modelos numéricos em elementos finitos**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. 2007.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2000.

ELLIOT, K. S. **Precast Concrete Structures**. Butterworth Heinemann. Oxford, Reino Unido. 2002.

FERREIRA, M. A. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto**. Tradução Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto. São Paulo. 2003.

FREITAS, H. S. **Análise numérica de painéis pré-moldados de fechamento em edificações de pequena altura.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2012.

KONCZ, T. **New Technology Spurs Market for Large Panel Precast Concrete Buildings.** PCI Journal. P. 30-42. Janeiro-Feveireiro.1995.

MCCORMAC, J. C.; RUSSEL, H. B. **Design of Reinforced Concrete.** Wiley. 9ª edição. Nova Jérsei. 2013.

OLIVEIRA, L. A. **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.

PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI). **Design Handbook. 7.ed.,** Chicago, 2010.

TECHNÉ. São Paulo: Editora PINI, **Edição 168.** P. 64-68. Março, 2011.

TECHNÉ. São Paulo: Editora PINI, **Edição 180.** P. 62-66. Março, 2012.

TOMO, F. C. **Critérios para projeto de edifícios com paredes portantes de concreto pré-moldado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

UEHARA, F. N. **Diretrizes para desenvolvimento de projeto para ligações de painéis de fachada horizontais de concreto pré-moldado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.