

ANÁLISE COMPARATIVA NO DIMENSIONAMENTO DE EDIFÍCIOS PRÉ-FABRICADOS EM CONCRETO ARMADO COM DIFERENTES SISTEMAS DE ENRIJECIMENTOS DA ESTRUTURA

Maurício Fortes Berton (1), Alexandre Vargas (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)mauricioberton@yahoo.com.br, (2)avargas@unesc.net

RESUMO

O presente trabalho trata de um estudo comparativo de diferentes tipos de edifícios pré-moldados quanto à análise global adotando elementos enrijecedores na estrutura principal e as relacionando com as ações laterais, adotando uma planta padrão. Em um primeiro instante foi dimensionado, utilizando métodos computacionais, uma estrutura monolítica, considerando ligações rígidas entre os elementos estruturais. Posteriormente foram simuladas pela mesma ferramenta de cálculo as diferentes situações de estruturas pré-moldadas, tipo esqueleto e por painéis portantes, em quatro diferentes situações: estruturas pré-moldadas convencionais, com núcleo monolítico, com núcleo rígido e em painéis portantes. Adotando como parâmetros para análise a rigidez das ligações, deslocamentos na estrutura principal, seções das peças e consumo de concreto e armadura. Os resultados obtidos mostram as diferentes contribuições dos elementos rígidos em uma estrutura pré-moldada, e viabilizam a industrialização de edifícios por meio de estruturas pré-moldadas.

Palavras-chave: estruturas pré-moldadas, sistemas de enrijecimento, deformação da estrutura.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de novos métodos na construção de edifícios no Brasil, como edifícios em estruturas pré-moldadas, não pode que ser visto somente como um ponto positivo, mas também como uma medida necessária para o setor, decorrente da facilidade, agilidade e rapidez de montagem que o sistema proporciona. “Designam-se estruturas pré-moldadas todas aquelas que são moldadas fora do local de sua utilização definitiva e estruturas pré-fabricadas as que são moldadas em instalações

industriais.” (CHASTRE; LÚCIO, 2012, p. 4). O país vive uma crise, onde a mão de obra, além de cara é escassa e com profissionais cada vez menos especializados, causando muitas vezes impactos negativos dentro das empresas, pois os prazos e custos das obras passam a ter variações de uma obra para outra. Em grande escala, no Brasil são adotados principalmente sistemas de construção com estruturas moldadas “in-loco” (no local), o que necessita de um planejamento inicial mais detalhado que envolva os tempos de execução dos sistemas de fôrmas e escoras adequados com os tempos de concretagem e curas necessárias para a estrutura.

A Construção Civil tem sido considerada uma indústria atrasada quando comparada a outros ramos industriais. A razão disso está no fato de ela apresentar, de uma maneira geral, baixa produtividade, grande desperdício de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade. (DEBS, 2000, p. 03).

A pré-moldagem de estruturas é uma boa solução para estruturas de pequenos e médios portes, uma vez que as peças são produzidas em um ambiente industrial com todo o controle e suporte que garantem a durabilidade e o seu desempenho, além da facilidade de montagem que proporciona uma conseqüente redução de mão de obra que é acompanhada pela diminuição de custos.

A industrialização da construção civil, através da utilização de peças de concreto pré-fabricados, promoveu no Brasil e no mundo, um salto de qualidade nos canteiros de obras, pois através de componentes industrializados com alto controle ao longo de sua produção, com materiais de boa qualidade, fornecedores selecionados e mão-de-obra treinada e qualificada, as obras tornaram-se mais organizadas e seguras. (SERRA; FERREIRA; PIGOZZO, 2005).

Porém o emprego de estruturas pré-moldadas em edifícios não é muito difundido no país, pois ainda existem muitas dúvidas quanto à execução dessas obras e da viabilidade estrutural, em razão de que os vínculos das peças se não executados de maneira correta proporcionam deslocamentos excessivos que inviabilizam o sistema. Debs (2000, p. 01) reconhece que apesar dos avanços do pré-moldado no cenário mundial, no Brasil ainda é pouco explorado, sendo os principais fatores, a instabilidade econômica que dificulta o planejamento e os investimentos a longo prazo, o conservadorismo dos agentes envolvidos e a falta de conhecimento de alternativas em concreto pré-moldado.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de analisar e comparar métodos de dimensionamento com diferentes travamentos estruturais de edifícios em estruturas pré-fabricadas e, avaliar criticamente, seus desempenhos quanto à estabilidade e deformações, tendo como referência o mesmo edifício calculado considerando moldagem “*in-loco*”.

1.1. LIGAÇÕES

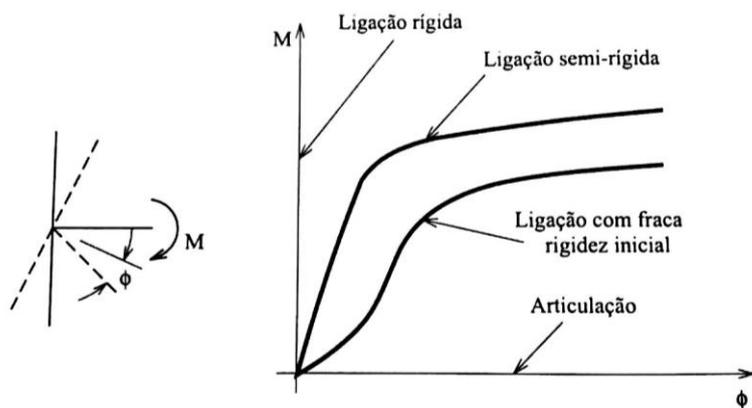
Sistemas pré-fabricados são distinguidos por apresentarem facilidades de execução e por isso possuem ligações geralmente simples (articuladas) que facilitam a montagem da edificação. Em contrapartida ligações articuladas são caracterizadas por serem ligações fracas, que tornam as estruturas mais solicitadas aos momentos fletores. Por outro lado, podemos simular os vínculos das peças iguais aos de obras moldadas no local, utilizando ligações mais complexas (rígidas ou semirrígidas) que transmitam os momentos fletores. Porém essas ligações requerem mais trabalho, diminuindo, em parte, as vantagens de execução que o sistema pré-moldado nos permite.

Em projetos de ligações, as vinculações devem assegurar à rigidez e estabilidade global da estrutura, levando-se em conta as tolerâncias de fabricação e montagem e necessitando também prever as acomodações das ligações, causadas por possíveis rotações e deslocamentos dos elementos decorrentes dos esforços da estrutura.

Em geral essas acomodações são características de ligações com fraca rigidez inicial, onde, por exemplo, podemos encontrar em um sistema de apoio com elastômero e chumbador que permite uma pequena rotação da peça, conforme mostra os diagramas apresentados nas Figura 1 e Figura 2.

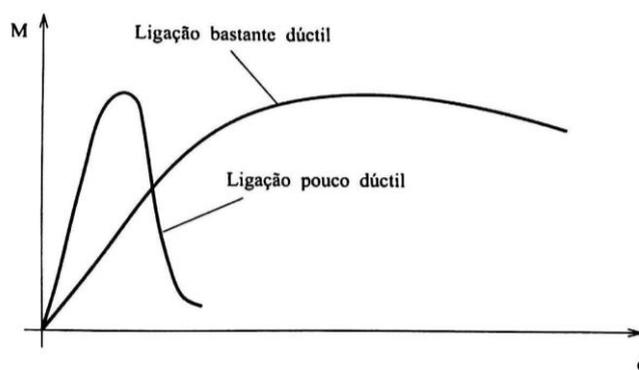
Duas características importantes relacionadas às ligações são a ductilidade e durabilidade. A ductilidade é a capacidade de suportar deformações inelásticas sem perder significativamente a resistência. E a durabilidade está relacionada à ruína da ligação, que não deve acontecer anteriormente à ruína da estrutura.

Figura 1 - Momento fletor x rotação das ligações.



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 112.

Figura 2 - Momento fletor x rotação de ligações com diferentes ductilidades.



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 113.

Nota-se que a maior dificuldade encontrada na pré-moldagem está no dimensionamento das ligações dos elementos, sendo necessário um estudo criterioso para que o projetista utilize a solução correta que atenda aos esforços solicitantes.

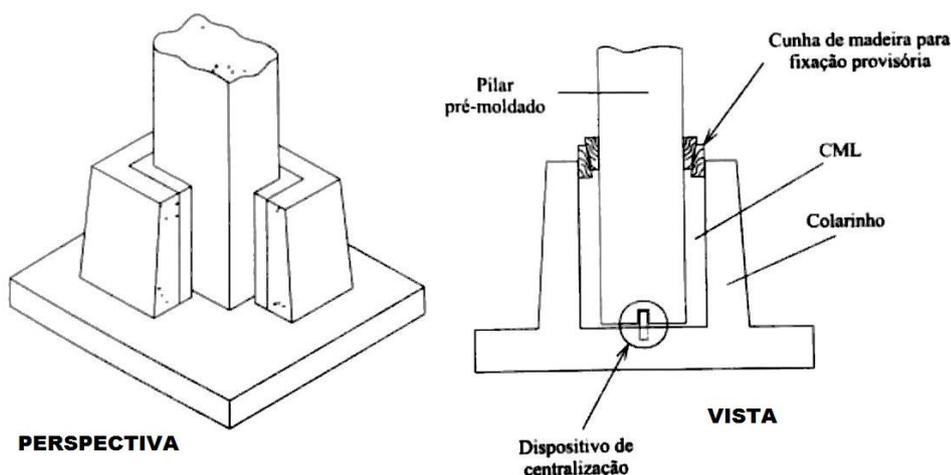
1.1.1. LIGAÇÕES PILAR X FUNDAÇÃO

Nesse estudo as ligações dos pilares nas fundações foram adotadas conforme o padrão utilizado por empresas do ramo de pré-moldados da região de Criciúma/SC, Santa Catarina, que são as ligações do tipo cálice conforme mostrado no detalhe da Figura 3.

Esse tipo de ligação acontece por meio do encaixo do pilar no colarinho deixado no elemento de fundação e posteriormente ao pilar ser centralizado e prumado por

meio de cunhas, é preenchido o espaço que fica entre o colarinho e o pilar com graute ou concreto moldado no local (CML) de resistência igual ou maior ao concreto utilizado no colarinho.

Figura 3 - Ligação pilar x fundação por meio de cálice.

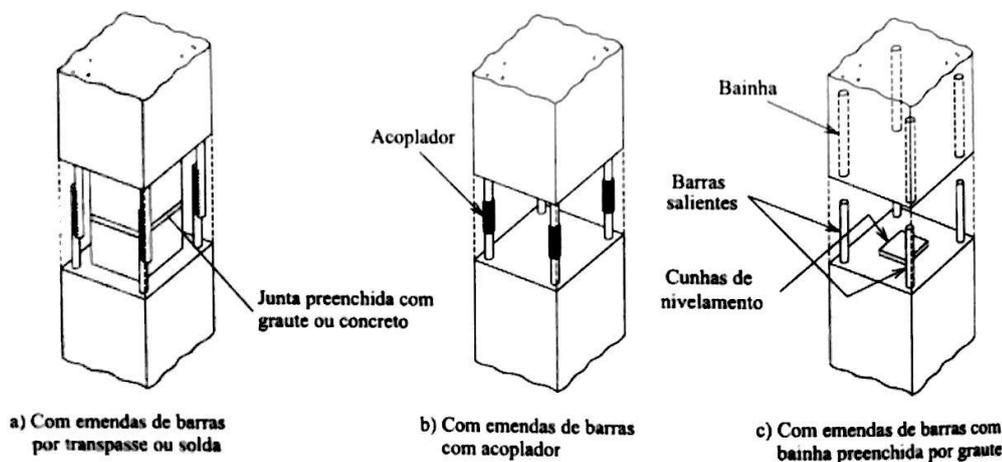


Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 161.

1.1.2. LIGAÇÕES PILAR X PILAR

Esse tipo de vínculo é usualmente empregado em obras com grandes alturas e devem apresentar caráter rígido. Porém observa-se grande dificuldade para o posicionamento e prumo dos elementos. Na Figura 4 estão detalhados alguns tipos usuais de emendas de pilares.

Figura 4 - Ligação pilar x pilar.



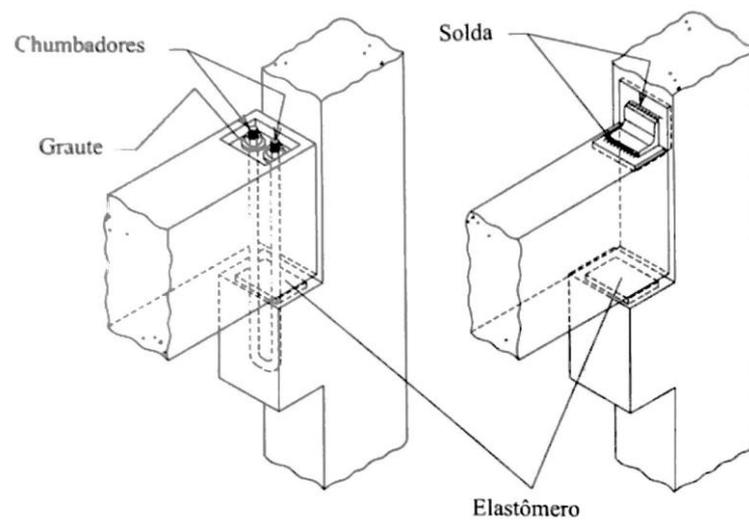
Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 164.

1.1.3. LIGAÇÕES VIGA X PILAR E VIGA PRINCIPAL X VIGA SECUNDÁRIA

Ligações entre viga e pilar podem ser consideradas como rígido ou articulado, porém para esse estudo são levados em conta a facilidade de execução que o sistema pré-moldado nos proporciona e as certezas quanto às ligações. Os sistemas apresentados nas

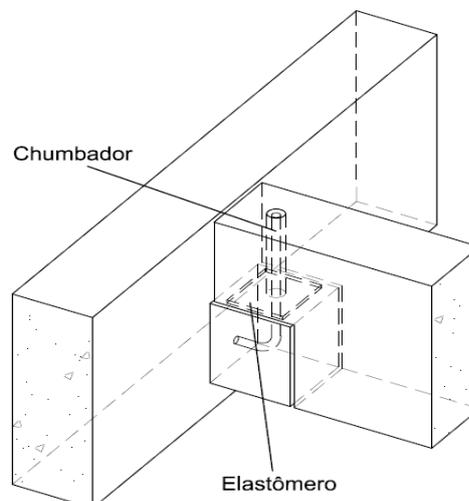
Figura 5 e Figura 6, mostram ligações do tipo articuladas que são os mais utilizados por fabricas da região, por ser mais prático e pela rapidez de montagem.

Figura 5 - Ligação articulada viga x pilar.



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 164.

Figura 6 - Ligação viga primaria x viga secundária



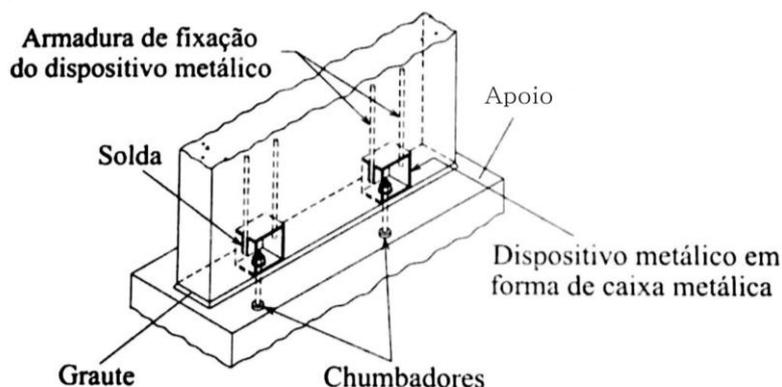
Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

1.1.4. LIGAÇÕES PAINEL X PAINEL E PAINEL X APOIO INICIAL

De modo geral, nestas ligações são mais comuns as transmissões de esforços de cisalhamento e tensões de compressão devidas à força normal, por esse motivo podem ser consideradas ligações rígidas.

As ligações de arranque que ocorrem no primeiro pavimento ou no térreo podem acontecer direto nas fundações ou em vigas quando temos o pavimento térreo em pilotis, sendo necessário que todos os painéis apresentem esse apoio inicial, conforme mostra a Figura 7.

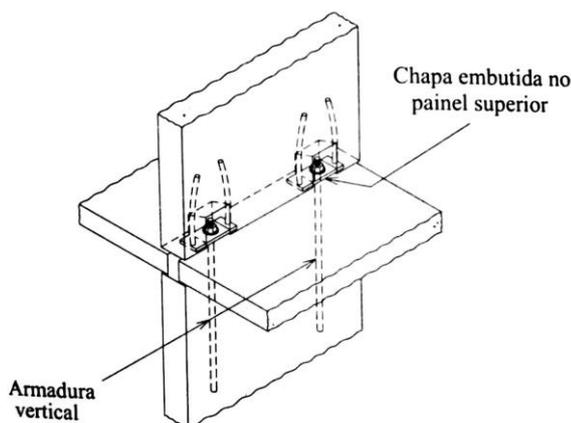
Figura 7 - Ligação painel x apoio inicial



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 171.

Nas ligações horizontais, devemos ter cuidado com o tipo adotado, pois se deve garantir o prumo e alinhamento das peças, não sendo admitidas excentricidades excessivas conforme esquema apresentado na Figura 8.

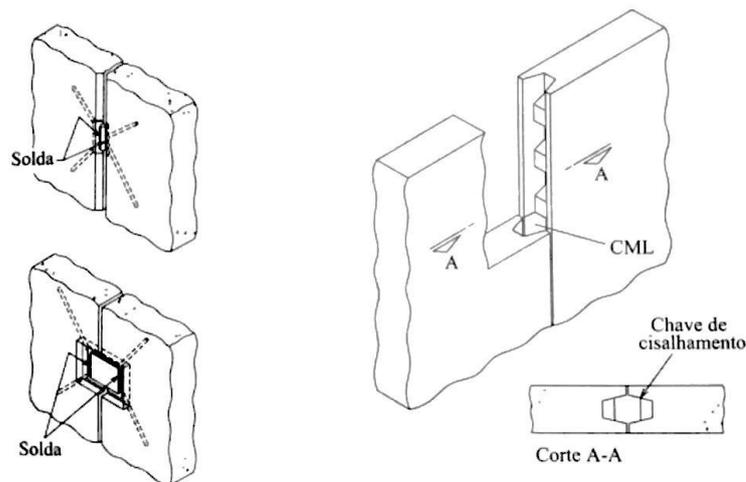
Figura 8 - Ligação horizontal painel x painel



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 171.

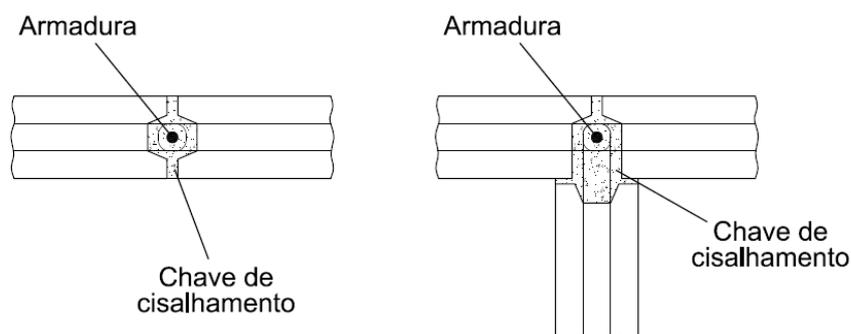
Nas ligações verticais entre painéis, deve-se utilizar em ambos as faces de encontro às chaves de cisalhamento, juntamente com chapas soldadas ou armaduras de espera. Posteriormente a locação e fixação horizontal, essas chaves de cisalhamentos devem ser preenchidas com graute ou concreto moldado no local (Figura 9 e Figura 10).

Figura 9 - Ligação vertical painel x painel



Fonte: Mounir K. El Debs, 2000, p. 169.

Figura 10 - Ligação vertical painel x painel com armadura



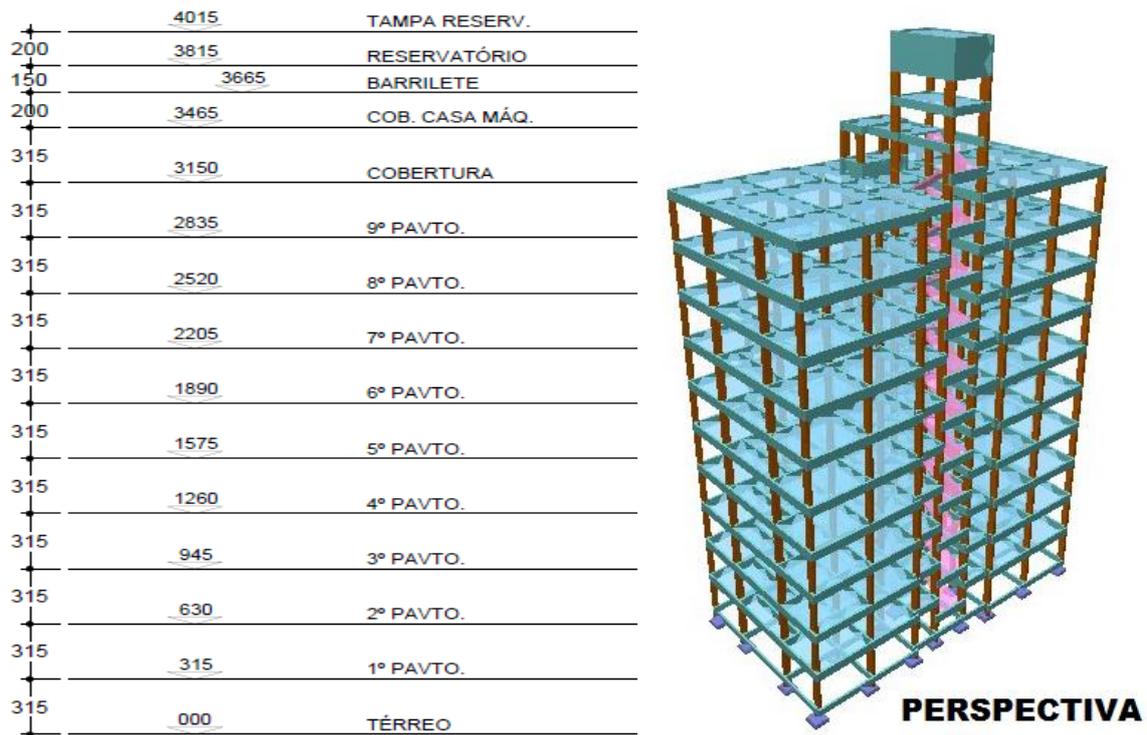
Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, é dimensionado, utilizando o software de cálculo estrutural CypeCad versão 2012 - que utiliza a NBR 6118:2007 - um edifício composto por pavimento térreo em pilotis, 9 pavimentos tipo e reservatório,

conforme esquema estrutural apresentado na Figura 11. Dimensiona-se a supra estrutura pelos sistemas de moldagem “in-loco” e pré-fabricada, ambos os modelos garantindo a estabilidade global da estrutura. Nesse estudo não são dimensionados os elementos de fundação, porém considera-se que os baldrames e colarinhos serão com concreto moldado em obra.

Figura 11 – Cotas de níveis dos pavimentos e perspectiva da obra



Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

As lajes são do tipo maciças, pois possibilitam que paredes sejam erguidas sobre as mesmas quando dimensionadas para esse fim. As vigas possuem as mesmas dimensões para todos os sistemas estudados, pois elas apenas exercem influências maiores no pavimento.

As resistências dos concretos são padronizadas, levando em conta as resistências mais utilizadas em ambas às situações estudadas. As resistências adotadas foram:

- Pilares, vigas e painéis – concreto com $f_{ck} = 30\text{MPa}$;
- Lajes – concreto com $f_{ck} = 25\text{MPa}$;
- Baldrames e elementos de fundação – concreto com $f_{ck} = 25\text{MPa}$.

Para a inclusão do vento na estrutura foi utilizado a norma NBR 6123:1988, adotando o vento característico da região de Criciúma/SC referenciado na norma, que é de 45 m/s com ventos de categoria IV, edificação classe B e fator probabilístico do grupo 2.

A adoção do programa CypeCad foi devido a facilidade e alta produtividade que ele fornece ao projetista e também por possuir seu ambiente CAD próprio com a opção de impressão de relatórios da obra. Cabe ressaltar que o mesmo não é comumente utilizado em estruturas pré-moldadas, mas para fins comparativos e pelas demais facilidades, já citadas, que ele fornece se tornou viável ao estudo.

Os modelos para as estruturas pré-moldadas são de dois tipos: por paredes portantes, que utilizam paredes estruturais pré-moldadas como elemento estrutural, ou esqueleto, que utilizam pilares e vigas, sendo o último um modelo mais delicado, devido aos grandes deslocamentos que ele pode proporcionar. Sendo assim os arranjos estruturais adotados, são:

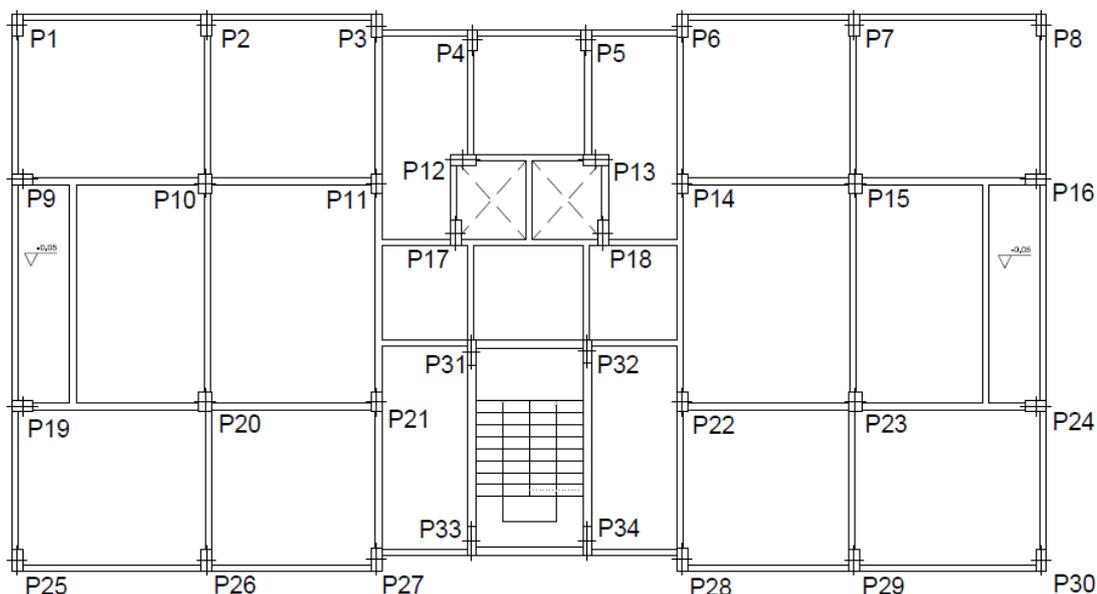
- Monolítico (Referência);
- Pré-moldado Convencional;
- Pré-moldado com núcleo monolítico;
- Pré-moldado com núcleo enrijecido;
- Painéis portantes pré-fabricados;

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos a partir dos dimensionamentos da estrutura padrão com as diferentes considerações de enrijecimento no cálculo nas opções pré-moldadas. Foram analisadas as seções das peças, consumo de concreto, consumo de aço e deslocamentos limites segundo as normas para cada estrutura, sempre garantindo a estabilidade global.

O lançamento estrutural é o mesmo para todas as opções estudadas. A Figura 12 mostra a forma do pavimento tipo utilizada para todos os casos. Para cada dimensionamento ocorreram alterações nas dimensões dos elementos estruturais e conseqüentemente no consumo dos materiais.

Figura 12 - Forma pavimento tipo



Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

3.1. ESTRUTURA MONOLÍTICA

A estrutura monolítica foi dimensionada segundo a NBR 6118:2007, e adotada como grupo de controle, ou seja, as demais estruturas dimensionadas buscam se aproximar dos resultados obtidos nesse dimensionamento, e utilizaram para isso diferentes sistemas de enrijecimento da estrutura. Foram padronizados as dimensões das lajes e vigas, adotando para as lajes altura de quinze centímetros (15cm) e as vigas seção transversal de 15x65 cm.

Os deslocamentos da estrutura monolítica podem ser analisados na Tabela 1 e estão entendendo os limites previstos na tabela 13.3 da norma NBR 6118:2007.

Deslocamento Total da Estrutura = $H / 1700$;

Deslocamento entre Pavimentos = $H_i / 850$.

Nessa estrutura obtivemos deslocamentos com valores muito próximos em ambos os sentidos, devido à rigidez da estrutura, que se distingue pela transferência dos esforços entre os elementos da estrutura. O fator determinante para definir as dimensões das seções das peças foi o combate de esforços da estrutura, obtendo um valor médio das áreas para as seções transversais dos pilares de, aproximadamente, 1250cm^2 (25x50cm). Os deslocamentos obtidos seguem

conforme demonstram os cálculos: Deslocamento Total da Estrutura = $40150\text{mm} / 1700 = 23,62\text{mm}$; Deslocamento entre Pavimentos = $3150\text{mm} / 850 = 3,71\text{mm}$.

Nas combinações foram utilizados as seguintes ações: AP = Ações Permanentes; Qa = Ações Variáveis ; V = Vento.

Tabela 1 - Deslocamento da estrutura monolítica

COMBINAÇÃO	DESLOCAMENTO	PONTO MÁX. DESL.
AP + Qa + V(+X)	17,21 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-X)	16,96 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(+Y)	18,31 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-Y)	17,98 mm	TAMPA RESERVATÓRIO

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Na Tabela 2 temos a resumo de materiais da estrutura.

Tabela 2 - Resumo de materiais para a estrutura monolítica

ELEMENTO	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	TAXA MÉDIA (kg/m ³)
Lajes	390,79	20832	53,31
Vigas	238,37	19948	83,69
Pilares	114,77	16334	142,32
Escadas	21,23	1936	91,19
Total	765,16	59050	77,17

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

3.2. ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS

Para o dimensionamento das estruturas pré-moldadas utiliza-se a norma NBR 9062:2006, que especifica as diretrizes para o cálculo de ligações em sistemas pré-fabricados, e também quanto aos fatores de saque (desforma), estocagem e montagem dos elementos dessas estruturas. Nos dimensionamentos dos elementos em geral, assim como no sistema monolítico, utiliza-se a NBR 6118:2007. A NBR 9062:2006 também especifica os deslocamentos admissíveis para essas estruturas, uma vez que, devido às ligações, são obras que suportam maiores deformações. Na Tabela 2 da norma NBR 9062:2006, são especificados os seguintes deslocamentos:

Deslocamento Total da Estrutura com múltiplos pavimentos = $H / 1200$;

Deslocamento entre pavimentos = $H_i / 750$;

Deslocamento entre o ultimo pavimento. e a cobertura = $H_i / 600$;

Sendo assim os cálculos para as estruturas pré-moldadas desse estudo segue a norma vigente:

Deslocamento Total da Estrutura com múltiplos pavimentos. = $40150\text{mm} / 1200 = 33,46\text{mm}$;

Deslocamento da cobertura = $31500\text{mm} / 1200 = 26,25\text{mm}$;

Deslocamento entre pavimentos = $3150\text{mm} / 750 = 4,20\text{mm}$;

Deslocamento entre o ultimo pavimento e a cobertura = $3150\text{mm} / 600 = 5,25\text{mm}$;

3.2.1. PRÉ-MOLDADO CONVENCIONAL (SEM NÚCLEO RÍGIDO)

Em estruturas de edifícios residenciais com grandes números de pavimentos, que é o caso desse estudo, o sistema pré-moldado convencional implica em grandes dimensões dos pilares, ocupando espaços valiosos nos cômodos dos apartamentos, além de apresentar um consumo excessivo de material e dificuldades no transporte e montagem das peças. Nota-se, na Tabela 3, que os deslocamentos para ventos na direção X, apresentam valores aproximados nos dois sentidos, diferentes da direção Y, em que os valores apresentam uma diferença considerável, isso se deve a grande carga do reservatório nos pilares da escada, que pelo fato de não existir nenhum elemento que proporcione qualquer enrijecimento dessa estrutura, ela tende a apoiar-se na estrutura do prédio, causando maiores deslocamentos no sentido de menor inercia da estrutura, ou seja, no sentido Y.

Nessa estrutura, diferentemente da estrutura monolítica, o fator determinante das seções das peças é o combate dos deslocamentos excessivos, que devem estar nos limites conforme demonstrados nos cálculos na introdução dessa seção.

Tabela 3 - Deslocamento da estrutura pré-moldada convencional

COMBINAÇÃO	DESLOCAMENTO	PONTO MÁX. DESL.
AP + Qa + V(+X)	22,23 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-X)	22,34 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(+Y)	26,68 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-Y)	29,05 mm	TAMPA RESERVATÓRIO

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

No dimensionamento da estrutura convencional as seções de lajes e vigas mantiveram-se iguais as utilizadas na estrutura monolítica, sendo as lajes com altura

de quinze centímetros (15cm) e as vigas com seção transversal de 15x65 cm. Nos pilares foram obtidos as maiores variações, sendo a média das áreas para as seções transversais dos pilares de, aproximadamente, 4000cm² (50x80cm), representando um aumento de 220% nas seções transversais.

Na Tabela 4 nota-se um grande aumento no consumo de materiais nos pilares, já nas vigas obteve-se uma diminuição da armadura, que nesses casos, diferentemente da estrutura monolítica, não possui armaduras negativas e de continuidade, que justificam essa queda.

Tabela 4 - Resumo de materiais para a estrutura pré-moldada convencional

ELEMENTO	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	TAXA MÉDIA (kg/m ³)
Lajes	381,61	33703	88,32
Vigas	254,4	14592	57,36
Pilares	361,34	31042	85,91
Escadas	21,23	1936	91,19
Total	1018,58	81273	79,79

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Fazendo um comparativo com a estrutura referência (monolítico), obtivemos:

- Nas lajes um aumento de 62% no consumo de armadura;
- Nas vigas uma queda de 27% no consumo de armadura;
- Nos pilares um aumento de 215% e 90% nos consumos de concreto e armadura, respectivamente.

Esse aumento, principalmente nos pilares, deve-se aos deslocamentos excessivos da estrutura. Já nas lajes maciças os panos se conectam e apresentam uma rigidez nos pavimentos, absorvendo uma parte dos esforços, que acarretam no aumento das armaduras de combate a flexão, punção e de continuidades.

3.2.2. PRÉ-MOLDADO COM NÚCLEO MONOLÍTICO

Uma solução mais simplificada para enrijecimento da estrutura é a adoção de um núcleo monolítico, ou seja, com os pilares e vigas da escada moldados em obra. Esse núcleo tem o objetivo de absorver grande parte dos esforços da estrutura e ajudar a combater os deslocamentos.

Sendo assim, adotou-se nos pilares da escada uma seção transversal igual a 25x115cm, com a maior inercia no sentido Y, pois a estrutura apresentou nesse sentido os maiores deslocamentos. E foi possível notar, quanto aos pilares, que as dimensões diminuíram consideravelmente, passando a ter uma média das áreas para as seções transversais de, aproximadamente, 2400cm² (30x80cm), que representa uma diminuição de 40% quanto a estrutura convencional e, se comparado com a estrutura monolítica, apresentou um acréscimo de 92% nas seções. Na maior parte dos pilares o fator determinante das seções ainda é o combate dos deslocamentos excessivos. Na Tabela 5 são apresentados os deslocamentos da estrutura nas piores situações de calculo.

Tabela 5 - Deslocamento da estrutura pré-moldada c/ núcleo monolítico

COMBINAÇÃO	DESLOCAMENTO	PONTO MÁX. DESL.
AP + Qa + V(+X)	22,73 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-X)	22,88 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(+Y)	27,90 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-Y)	25,52 mm	TAMPA RESERVATÓRIO

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Na Tabela 6 já é possível notar uma grande diferença nos quantitativos dos materiais. Teve-se uma boa economia se comparado com a estrutura convencional e chegamos a valores mais próximos da estrutura monolítica.

Tabela 6 - Resumo de materiais para a estrutura pré-moldada c/ núcleo monolítico

ELEMENTO	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	TAXA MÉDIA (kg/m ³)
Lajes	387,67	29349,00	75,71
Vigas	250,88	16822,00	67,05
Pilares	213,18	17991,00	84,39
Escadas	21,23	1936,00	91,19
Total	872,96	66098	75,72

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Comparando as estruturas pré-moldadas convencional e com núcleo monolítico, nota-se que:

- Nas lajes teve-se uma queda de 13% no consumo de armadura;
- Nas vigas teve-se um aumento de 15% no consumo de armadura;

- Nos pilares uma queda de 41% e 42% nos consumos de concreto e armadura, respectivamente.

Entre as duas estruturas a principal economia deve-se aos pilares, porém nota-se que as lajes foram menos solicitadas diminuindo principalmente as armaduras de combate a punção. Nas vigas teve-se um aumento da armadura devido a solicitação das vigas do núcleo monolítico.

E fazendo um comparativo com a estrutura referência (monolítico), obtivemos:

- Nas lajes um aumento de 41% no consumo de armadura;
- Nas vigas uma queda de 16% no consumo de armadura;
- Nos pilares um aumento de 86% e 10% nos consumos de concreto e armadura, respectivamente.

3.2.3. PRÉ-MOLDADO COM NÚCLEO RÍGIDO

Esse tipo de enrijecimento é o mais comumente utilizado em estruturas pré-moldadas executadas em países da Europa, pois o núcleo serve de sustentação à estrutura, uma vez que as ligações dos elementos pré-moldados do edifício não permitem a transmissão de momentos fletores. Observa-se que as seções dos pilares diminuíram, se aproximando muito das seções obtidas na estrutura monolítica. É possível notar na Tabela 7, que o deslocamento no eixo Y foi menor que o deslocamento no eixo X, diferentemente das demais estruturas já vistas, isso se deve a forma que o núcleo foi considerado em planta, pois se tem duas paredes de dimensões maiores no sentido Y, que fornecem maior inercia a estrutura, contra uma parede de menor dimensão no sentido X. Sendo assim, no dimensionamento de alguns pilares teve-se a necessidade de aumentar a inercia no sentido X para combater esses deslocamentos excessivos. Obteve-se uma área média para as seções transversais dos pilares de, aproximadamente, 1500cm² (25x60cm), somente 20% a mais da seção média da estrutura monolítica, sendo esse o principal ganho na adoção de um núcleo rígido para esse edifício.

Tabela 7 - Deslocamento da estrutura pré-moldada c/ núcleo rígido

COMBINAÇÃO	DESLOCAMENTO	PONTO MÁX. DESL.
AP + Qa + V(+X)	25,39 mm	COBERTURA
AP + Qa + V(-X)	25,02 mm	COBERTURA
AP + Qa + V(+Y)	13,78 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-Y)	7,59 mm	TAMPA RESERVATÓRIO

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Nos quantitativos de materiais relacionados na Tabela 8, nota-se uma diferença não muito vantajosa se relacionada com a estrutura com núcleo monolítico, pois para o enrijecimento do núcleo é necessário um grande volume de concreto com uma taxa de armadura alta.

Tabela 8 - Resumo de materiais para a estrutura pré-moldada c/ núcleo rígido

ELEMENTO	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	TAXA MÉDIA (kg/m ³)
Lajes	390,12	24867,00	63,74
Vigas	224,80	14424,00	64,16
Pilares	216,97	21144,00	97,45
Escadas	21,23	1936,00	91,19
Total	853,12	62371	73,11

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Comparando as estruturas pré-moldadas com núcleo monolítico e com núcleo rígido, nota-se que:

- Nas lajes teve-se uma queda de 15% no consumo de armadura;
- Nas vigas teve-se uma queda de 10% e 14% nos consumos de concreto e armadura, respectivamente;
- Nos pilares um aumento 18% no consumo de armadura.

A queda no consumo de concreto e armadura das vigas é ilusório, pois o núcleo rígido não possui vigas o que causa essa diminuição. Já nos pilares o consumo de concreto não tem grande variação e o consumo de armadura aumenta, a grande causa como já comentado seria a adoção do núcleo rígido.

E fazendo um comparativo com a estrutura padrão (monolítico), obtivemos:

- Nas lajes um aumento de 19% no consumo de armadura;

- Nas vigas uma queda de 28% no consumo de armadura;
- Nos pilares um aumento de 89% e 29% nos consumos de concreto e armadura, respectivamente.

3.2.4. ESTRUTURA EM PAINÉIS PORTANTES PRÉ-MOLDADOS

Por esse tipo de estrutura não ser muito difundido no Brasil, não existem normas brasileiras específicas para painéis portantes pré-moldados, porém há especificações importantes na NBR 16055:2012 - norma para paredes de concreto moldadas no local - que podem ser adotadas, assim como na NBR 9062:2006, norma para estruturas pré-moldadas. Uma observação importante da NBR 16055:2012, é que essa norma não pode ser utilizada para dimensionamento de estruturas em painéis portantes pré-moldados, porém pela semelhança da estrutura estudada com a normatizada, alguns pontos quanto à execução podem ser levados em conta, como a adoção de armaduras duplas em painéis de espessuras maiores que 15 centímetros. Outros detalhes também podem ser estudados a partir de catálogos de empresas que já executam esse tipo de obra aqui no país, como é o caso da Empresa de Engenharia Pedreira de São Paulo – SP. Para esse estudo os painéis foram dimensionados com larguras de 15 centímetros para os painéis externos e internos dos apartamentos e com largura de 20 centímetros na escada. Todas as vigas do edifício foram substituídos por painéis, respeitando as aberturas para portas e janelas. De uma maneira geral, os esforços que agem nos painéis são basicamente os provocados pelas forças normais, tendo os painéis a principal função de combater os esforços de compressão.

Estruturas de painéis portantes tem característica de serem estruturas completamente, ou em grande parte, rígidas, por isso não apresentam quase nenhum deslocamento, conforme vimos na Tabela 9.

Tabela 9 - Deslocamento da estrutura de painéis portantes pré-moldados

COMBINAÇÃO	DESLOCAMENTO	PONTO MÁX. DESL.
AP + Qa + V(+X)	1,10 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-X)	1,10 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(+Y)	1,40 mm	TAMPA RESERVATÓRIO
AP + Qa + V(-Y)	1,43 mm	TAMPA RESERVATÓRIO

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

Esse tipo de estrutura se diferencia das demais apresentadas, pois os painéis proporcionam facilidades na execução, uma vez que estruturam o edifício e formam as fachadas e divisões dos apartamentos juntamente com os complementares (hidro sanitários, passagens elétricas, etc.) que se encontram embutidos na estrutura, ou seja, depois dos painéis montados restam apenas alguns serviços de acabamentos a serem feitos. Na Tabela 10 são apresentados os resumos das materiais da estrutura dimensionada com painéis portantes pré-fabricados. Nota-se que o consumo de concreto é mais que o dobro dos obtidos em alguns sistemas, porém o sistema apresenta uma taxa média de consumo de armadura quase 35% menor que as demais. Através disso, pode-se perceber que a viabilidade desse tipo de estrutura deve ser obtida através de um estudo mais criterioso, levando-se em conta o custo total da obra e o tempo de execução, para que assim seja possível comparar custo x benefício com as demais opções.

Tabela 10 - Resumo de materiais p/ a estrutura de painéis portantes pré-moldados

ELEMENTO	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	TAXA MÉDIA (kg/m ³)
Lajes	375,46	17969,00	47,86
Vigas	61,92	3344,80	54,02
Painéis	1307,10	74165,00	56,74
Pilares	14,66	2208,00	150,61
Escadas	21,23	1936,00	91,19
Total	1780,37	99622,8	55,96

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

3.3. RESULTADOS GERAIS

A adoção de elementos rígidos na estrutura ajuda a viabilizar a utilização de sistemas pré-moldados em edifícios com grandes alturas, diminuindo seções e consumo de materiais, conforme podemos observar na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 11 - Percentual de consumo de materiais pelos tipos de estruturas

ESTRUTURA	VOLUME (m ³)	ARMADURA (kg)	PERCENTUAL (%) - VOLUME / ARMADURA				
			Monolítico	P.M. Conv.	P.M. c/ N. Monolítico	P.M. c/ N. Rígido	Paineis Portantes
Monolítico	765,16	59050	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -
P.M. Conv.	1018,58	81273	33% / 38%	- / -	- / -	- / -	- / -
P.M. c/ N. Monolítico	872,96	66098	14% / 12%	-14% / -19%	- / -	- / -	- / -
P.M. c/ N. Rígido	853,12	62371	11% / 6%	-16% / -23%	-2% / -6%	- / -	- / -
Paineis Portantes	1780,37	99623	133% / 69%	75% / 23%	104% / 51%	109% / 60%	- / -

Fonte: Mauricio Fortes Berton, 2015.

4. CONCLUSÃO

De uma forma geral, devem-se estudar muito bem os parâmetros que serão adotados em uma estrutura pré-moldada, para que assim seja possível dimensioná-la adequadamente.

Nesse trabalho foi possível criar algumas situações reais de enrijecimento de um edifício, sendo elas as mais difundidas em bibliografias de concreto pré-moldado no Brasil e em grande parte do mundo. E a partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- a) Os melhores resultados foram obtidos utilizando estruturas pré-moldadas com núcleo rígido. As seções dos elementos e consumo de matérias, foram as mais próximas do sistema monolítico;
- b) Podem ser incluídos, em uma estrutura pré-moldada, elementos rígidos em uma estratégia de projeto a fim de proporcionar resistência à estrutura quanto às ações horizontais;
- c) Considerando a interação dos elementos rígidos na estrutura principal, pode-se obter redução de esforços e deslocamentos e conseqüentemente seções de peças menores e menos armadas;

- d) A adoção do núcleo rígido deve ser bem estudada na planta da estrutura, para que os esforços sejam combatidos em ambas as direções;
- e) Uma estrutura pré-moldada com a vinculação de elementos rígidos pode substituir uma estrutura monolítica, desde que utilizados adequadamente;

Recomenda-se que nos próximos estudos sejam dimensionadas estruturas pré-moldadas mistas, que utilizem em um mesmo edifício vários tipos de elementos enrijecedores, tais como painéis portantes, núcleo rígido, contraventamentos laterais dispostos em “X” entre pavimentos intercalados e paredes de contraventamentos, com a finalidade de avaliar até que ponto a estrutura apresentará benefícios com esse emprego em conjunto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16055**: Paredes de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

AUGUSTO G. PEDREIRA DE FREITAS. **Caderno de Recomendações - Paineis Portantes**. São Paulo: Pedreira, 2010. 56 p.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlo, SP: EDUFSCAR, 2013. 367 p.

CHASTRE, Carlos; LÚCIO, Valter et al. **Estruturas pré-moldadas no mundo**: aplicação e comportamento estrutural. Rio de Janeiro: Parma, 2012. 320 p.

DEBS, Mounir K. El. **Concreto Pré-moldado: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 441 p.

ELLIOT, Kim S.. **Precast Concrete Structures**. Woburn: Butterworth-heinemann, 2002. 375 p.

IGLESIA, Thiago Borges. **SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO**. 2006. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

KIM SEEBER (Usa). Pci Industry Handbook. **PCI Design Handbook**. 6. ed. Chicago: Precast/prestressed Concrete Institute, 2004. 736 p.

SERRA, S.m.b.; FERREIRA, M.de A.; PIGOZZO, B. N.. Evolução dos Pré-fabricados de Concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005, São Carlos. **Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos**. São Carlos: Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ), 2005. p. 2 - 9.