



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



THIAGO ROBERTO DELONG

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO
PRÉ-MOLDADO DURANTE AS ETAPAS DO SEU PROCESSO
CONSTRUTIVO**

UBERLÂNDIA
2022

THIAGO ROBERTO DELONG

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO
PRÉ-MOLDADO DURANTE AS ETAPAS DO SEU PROCESSO
CONSTRUTIVO**

Monografia apresentada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pela Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima

**UBERLÂNDIA
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãs por todo o suporte dado ao longo da minha vida, a eles devo tudo.

Aos amigos, em especial, Bruna, Gabriela, Giovanna, José e Marcela que fizeram parte de todos os bons momentos dessa jornada e tornaram cada instante ruim mais suportável.

A minha namorada Milena, por todo o amor, companheirismo e ajuda durante estes anos.

Aos meus professores por todo o conhecimento, reprovações e aprendizados passados. A eles devo minha evolução acadêmica e pessoal, em especial à Dra. Maria Cristina Vidigal e Dr. Arquimedes Diógenes Ciloni, os quais tive a oportunidade de ter como meus orientadores.

RESUMO

O trabalho apresenta uma análise estrutural com ênfase nos deslocamentos gerados em um edifício de quatro pavimentos de estrutura pré-moldada. A partir de dados obtidos através do software STRAP, em sua versão trial, analisa-se de forma quantitativa, a relação entre o uso de lajes e ligações semirrígidas como fator determinante no travamento estrutural durante o processo construtivo. Através da análise de variações de carregamentos para a estrutura em sua fase construtiva e nas possibilidades no desenvolvimento do processo executivo, são gerados dez possíveis modelos de montagem da estrutura. São apresentados os resultados, considerações e limites referentes à deslocabilidade estrutural de cada modelo, segundo a ABNT NBR 6118:2014. Os resultados mostram que algumas situações de montagem devem ser evitadas, uma vez que não é possível garantir a estabilidade estrutural. Assim, caso seja necessário ocorrer a interrupção do empreendimento, antes de que haja o abandono da obra, deve-se realizar um estudo verificando sua estabilidade e segurança.

Palavras-chave: Pré-moldado; Estrutura de concreto; Deslocamentos; Estabilidade Global; Execução.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVO	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1	LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS E EFEITO DIAFRAGMA.....	7
3.2	LIMITES NORMATIVOS	8
4	METODOLOGIA.....	9
4.1	MODELO ESTRUTURAL PARA A ETAPA 01	13
4.2	MODELO ESTRUTURAL PARA A ETAPA 02.....	15
5	RESULTADOS.....	17
5.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA A ETAPA 01.....	17
5.1.1	Hipótese 01	18
5.1.2	Hipótese 02	20
5.1.3	Hipótese 03	21
5.1.4	Hipótese 04	23
5.1.5	Hipótese 05	24
5.1.6	Hipótese 06	26
5.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA A ETAPA 02.....	27
5.2.1	Hipótese 07	28
5.2.2	Hipótese 08	29
5.2.3	Hipótese 09	31
5.2.4	Hipótese 10	32
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS.....	37
	ANEXO A – Locação de pilares	38
	ANEXO B – Planta De Vigas Pvto. Tipo	39

ANEXO C – Planta De Lajes Pvto. Tipo	40
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de existir uma sintonia entre a concepção de projetos, desde os complementares até os projetos essenciais de um edifício, torna cada vez mais complexa a atividade de engenheiros projetistas e executores. Tratando-se de edifícios com estruturas que fogem do modelo convencional de concreto armado moldado in-loco, esta dificuldade torna-se cada vez mais explícita, visto o menor grau de disseminação da aplicação de modelos estruturais alternativos.

Estruturas pré-moldadas são aquelas onde ocorre em campo apenas a junção de elementos estruturais previamente executados em fábrica, ou seja, suas vigas, pilares e lajes, já finalizados, são transportados até o terreno onde é realizada a montagem de toda a estrutura. A aplicação de estruturas pré-moldadas traz consigo grandes vantagens, que nos últimos anos, atraíram engenheiros e clientes a optarem por este sistema estrutural. Porém, a execução em canteiro de obras de forma simplificada, se comparada com o modelo convencional, apresenta alguns desafios que devem ser analisados pela equipe de projetos e execução.

Em estruturas pré-moldadas, as ligações viga-pilar podem ser rígidas, articuladas ou semirrígidas. No caso de ligações articuladas e deformáveis à flexão, a verificação da estabilidade global pode ser mais crítica. Assim, durante a fase construtiva, é também necessário analisar os efeitos das ligações na estabilidade do conjunto, pois dada a baixa rigidez, a aplicação de pequenas forças pode levar à grandes deslocamentos e até, em alguns casos, ao colapso estrutural.

Gutierre (2016, p. 28), afirma que “As lajes, quando consideradas a sua rigidez à flexão para resistir às cargas laterais, se comportam similarmente às vigas-faixa, formando pórticos com os pilares”. Desta maneira, existe a necessidade, a fim de gerar economia à obra, de considerar estes elementos no conjunto estrutural para a estabilidade global da estrutura.

Juntamente com o uso de ligações semirrígidas, em edifícios pré-moldados, a consideração das lajes (ligação viga/laje/capa de concreto), provê um certo grau de engastamento à estrutura, verificando os requisitos de estabilidade global necessária para o edifício. Porém, este fator deve estar alinhado, pelos motivos citados acima, ao projeto e prazos de execução do edifício, de forma que a estrutura de vigas e pilares não sejam

executadas de forma isolada, a fim de não gerar riscos no decorrer da execução do empreendimento.

As soluções consideradas na execução de um edifício possuem papel determinante na qualidade final do empreendimento e, muitas vezes, situações encontradas no desenvolvimento da obra diferem do modelo final para o qual o edifício foi calculado. Este tipo de situação pode gerar ações inesperadas para o elemento estrutural ou a falta de rigidez e engastamento necessária para o conjunto, sendo a sequência construtiva um fator determinante para o comportamento estrutural esperado no empreendimento.

Neste contexto este trabalho visa analisar de forma numérica algumas possibilidades construtivas para um edifício pré-moldado de quatro pavimentos, apresentando resultados quanto aos deslocamentos máximos gerados em cada modelo e etapa construtiva, determinando qual sequência executiva pode, ou não, ser executada de forma segura.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar situações construtivas de montagem de um edifício de quatro pavimentos, a fim de avaliar os impactos da sequência deste processo executivo nos deslocamentos e limites de deslocabilidades estabelecidos em norma técnica, levando-se em conta o travamento das lajes, comportamento de ligações semirrígidas e o uso da alvenaria de fechamento no edifício.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

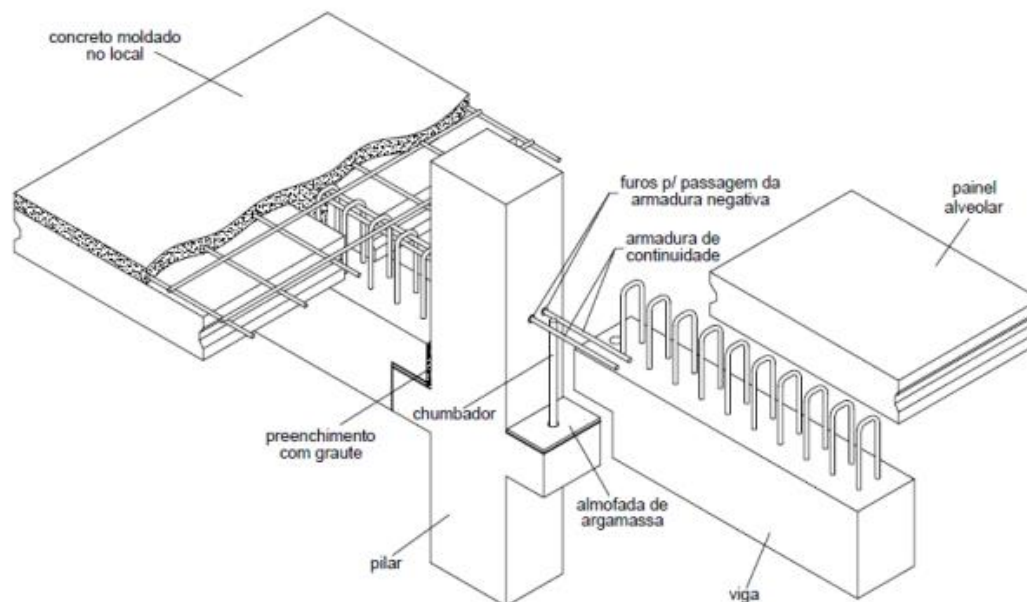
3.1 LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS E EFEITO DIAFRAGMA

Ao analisar estruturas pré-moldadas, principalmente aquelas onde há um elevado número de pavimentos, há a necessidade de considerar quais elementos estruturais trabalham de forma isolada e quais trabalham em conjunto.

Miotto (2002, p.20) traz uma consideração importante em relação ao uso de ligações semirrígidas: "Considerando o efeito da semirrigidez obtém-se significantes economias ligadas à redução da mão de obra necessária para a realização de ligações rígidas ou à redução das dimensões da estrutura no caso de ligações articuladas". Desta forma, elementos e determinações feitas pelo engenheiro projetistas, agregam segurança e economia à estrutura.

A Figura 1 ilustra um tipo comum de ligação semirrígida, com armadura negativa de continuidade passando dentro do pilar, chumbador preenchido com graute, almofada de argamassa, painel alveolar e concreto moldado no local.

Figura 1 – Ligação viga-pilar semirrígida



Fonte: BALDISSERA, 2006, p.5

As lajes em edifício pré-moldados apresentam grande importância na análise estrutural dos deslocamentos gerados a partir de ações laterais, em virtude do efeito diafragma. Ao analisar que uma única laje pode conectar vários pontos de um mesmo plano, a estrutura tende a sofrer um travamento e enrijecimento naquela superfície, desde que seja garantida a ligação entre todos os elementos.

Ao trabalhar com lajes pré-moldadas, elementos que possuem bordas totalmente apoiadas às vigas, o método de enrijecimento estrutural entre as lajes e o restante da estrutura parte do uso de uma camada de concreto sobreposta a laje juntamente com uma malha de aço ligada aos estribos da viga.

3.2 LIMITES NORMATIVOS

Tratando-se de estruturas de concreto pré-moldado, a ABNT NBR 9062:2017, norma responsável pelo projeto e execução de estruturas pré-moldadas, determina em sua seção 5.1.1.1 que, de forma geral, este modelo de estrutura deve seguir as regras definidas pela ABNT NBR 6118:2014, sendo acrescidas as suas seções 5, 6 e 7.

São apresentados na seção 13.3 da ABNT NBR 6118:2014, limites de deslocamentos referentes a possíveis efeitos que a estrutura possa sofrer no decorrer de sua vida útil, porém, não traz nenhuma referência quanto a limites de deslocamento em fases construtivas do empreendimento. Por este motivo, para efeito de comparação e análise são utilizados neste trabalho os efeitos de aceitabilidade sensorial como parâmetro de aceitação para os resultados de deslocamentos obtidos neste trabalho.

A Figura 2 apresenta parte da referida Tabela 13.3 da ABNT NBR 6118:2014.

Figura 2 – Limites de deslocabilidade para aceitabilidade sensorial

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

4 METODOLOGIA

O estudo apresentado parte da necessidade do alinhamento entre projeto estrutural e projeto executivo, tendo como objetivo apresentar uma análise estrutural do comportamento de um edifício de quatro pavimentos, projetado em concreto pré-moldado.

O cálculo dos deslocamentos é desenvolvido neste trabalho utilizando o programa computacional STRAP (versão Trial), para o qual será feita a modelagem de todo o sistema estrutural, bem como considerada também a influência do travamento das lajes e sistemas alternativos de enrijecimento dos elementos estruturais no decorrer da execução do edifício.

Assim, são obtidos os deslocamentos gerados na estrutura com e sem o engastamento das lajes aos pavimentos e com o uso de ligações semirrígidas entre vigas e pilares, permitindo acompanhar a evolução e impacto das diversas situações de montagem, bem como avaliar, ainda que de forma preliminar, até qual pavimento é viável realizar a montagem da estrutura somente com vigas e pilares, com segurança e sem acarretar danos ou riscos estruturais.

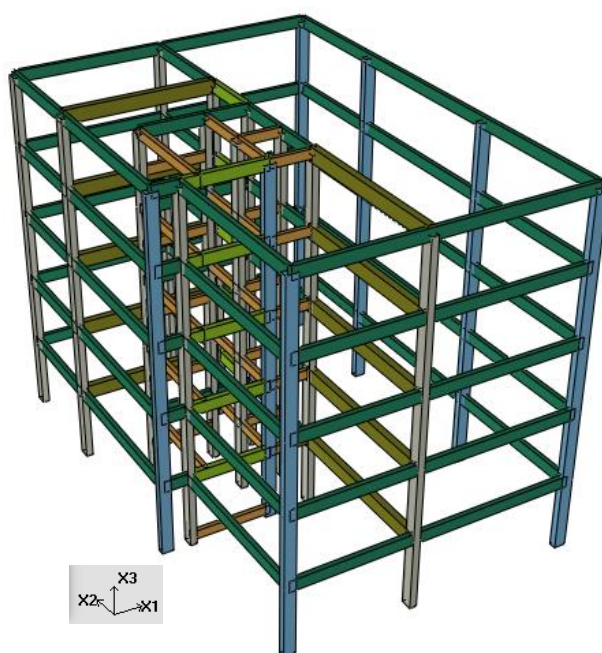
Para as análises desenvolvidas neste trabalho foram utilizados os dados de um projeto de um edifício real em fase de montagem devidamente dimensionado em relação aos seus elementos estruturais de vigas, pilares e lajes. Para o citado projeto, foram estabelecidas hipóteses de execução para o empreendimento, com diversas possibilidades de sequência de montagem, bem como consideração do travamento dado pelas lajes e ligações semirrígidas viga-pilar.

A partir do desenvolvimento de cada modelo estrutural e obtenção dos deslocamentos máximos, comparou-se estes resultados com os deslocamentos máximos permitidos segundo a Tabela 13.3, da norma técnica vigente (ABNT NBR 6118:2014). Nota-se que esta análise se utiliza de limites de deslocamento aplicados às estruturas finalizadas e que são aplicados a este trabalho devido a carência de referências normativas de limites de deslocabilidade estrutural em edifícios em sua fase construtiva.

Para efeito de análise e desenvolvimento do trabalho são apresentadas dez hipóteses estruturais, divididas em duas etapas. Na primeira etapa não há a consideração da execução das paredes de alvenaria ao longo da montagem dos elementos estruturais e com a colocação somente das lajes como forma de enrijecimento. Na segunda etapa, é admitida a presença das paredes de alvenaria no decorrer da montagem, juntamente com a consideração das ligações semirrígidas entre vigas e pilares. Para a rigidez secante das ligações, admitiu-se um valor estimado de 75.000 kNm/rad, baseado nas informações de Miotto (2002), apenas como referência para avaliar uma situação intermediária entre o caso totalmente articulado ou perfeitamente rígido. Sabe-se, entretanto, que um cálculo de estimativa mais aprofundado é necessário para um projeto real, levando-se em conta os parâmetros geométricos e físicos dos elementos que concorrem a ligação.

A Figura 3 apresenta a representação gráfica da estrutura estudada, sendo a esbeltez do conjunto na direção do eixo X1 um fator importante a ser observado e considerado ao realizar a análise dos deslocamentos estruturais. O sistema de coordenadas X1, X2 e X3 é a representação usual utilizada no programa STRAP e foi mantido para as análises deste trabalho.

Figura 3 – Representação gráfica da estrutura analisada obtida pelo software STRAP

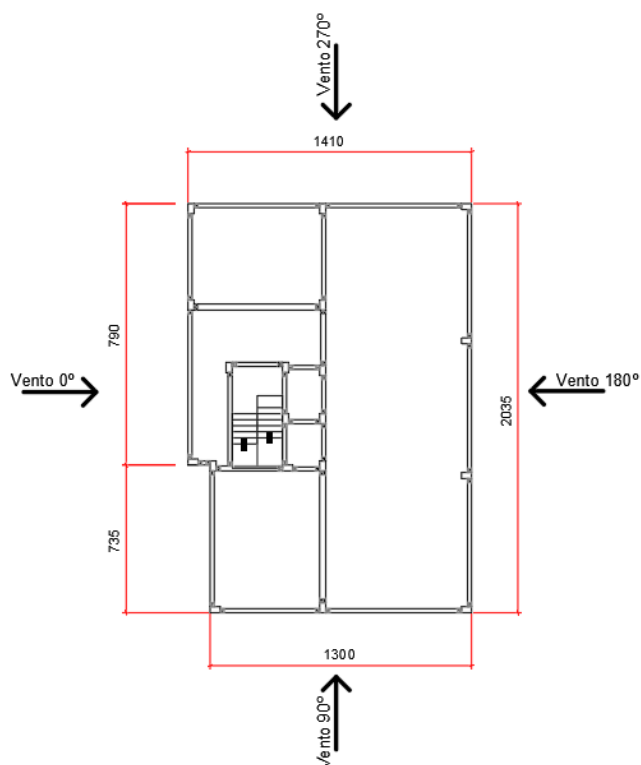


Fonte: Autor

Para ambas as etapas de análise definiu-se o local da edificação, a cidade de Londrina-PR, e determinadas, segundo a ABNT NBR 6123:1988, as ações laterais aplicadas à estrutura devido as forças de vento.

As dimensões dos elementos estruturais foram obtidas do projeto estrutural e para fins de avaliação do peso-próprio, estão discriminadas no Anexo 1 deste trabalho, juntamente com plantas de locação e de vigas. A Figura 4 apresenta um croqui com as dimensões do edifício em centímetros e os sentidos adotados para análise da ação do vento na estrutura.

Figura 4 – Croqui representativo do edifício em planta e sentidos adotados para as ações do vento



Fonte: Autor.

Para consideração de cargas atuantes sobre a estrutura, priorizou-se analisar a existência de somente cargas possíveis na etapa construtiva do edifício. A Tabela 1 apresenta dados referentes aos valores de cargas verticais consideradas e aplicadas na análise estrutural.

Tabela 1 – Dados de cargas permanentes considerados em projeto

Cargas Verticais de Projeto	
Peso Próprio (kN/m³)	25
Lajes Alveolares (kN/m²)	1,25
Capa de Concreto (kN/m²)	1,25

Fonte: Autor.

Outros dados e considerações de projeto aplicadas ao edifício podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados considerados em projeto

Dados de Projeto	
fck (MPa)	40
ρ (kg/m³)	2500
E (GPa)	32

Fonte: Autor.

4.1 MODELO ESTRUTURAL PARA A ETAPA 01

Na primeira etapa foram elaboradas seis hipóteses construtivas e realizado o estudo do comportamento estrutural sem a consideração da execução de alvenarias. Todas as ligações viga-pilar são admitidas articuladas. Portanto, todas as análises feitas consistem na aplicação do carregamento diretamente na estrutura, variando o número de pavimentos travados através das lajes e capa de concreto.

Nesta primeira etapa de análise, referindo-se à fase de montagem, tem-se uma estrutura totalmente permeável, somente com lajes como elementos impermeáveis. A ação do vento, como carga variável, é admitida nas faces laterais das vigas e pilares. Desta forma os valores apresentados na Tabela 3 e Tabela 4 são referentes a cargas aplicadas aos elementos estruturais e são discriminados conforme a dimensão da face da peça estrutural que recebe a ação do vento. Todos os valores são apresentados em tf/m pois todas as cargas foram distribuídas linearmente na estrutura, variando sua força conforme a mudança de pavimento.

Além do peso próprio de todos os elementos, são admitidas as cargas permanentes devido à presença das lajes e capa de concreto, estes valores são discriminados e podem ser observados na Tabela 1.

A Tabela 3 apresenta os dados de alturas da edificação analisada e o coeficiente de pressão dinâmica. A Tabela 4 traz as cargas utilizadas no desenvolvimento da análise estrutural.

Tabela 3 – Alturas de referência para cálculo de cargas laterais

Altura do Edifício (m)	Coefficiente de Pressão Dinâmica (kN/m^2)
3,19	0,506
6,38	0,602
9,57	0,666
12,76	0,715
15,95	0,757

Fonte: Autor.

Tabela 4 – Ação do vento aplicada à estrutura

Altura (m)	Forças Distribuídas em Vigas 20x50 e Pilares 50x30				Forças Distribuídas em Pilares 30x50			
	(tf/m)							
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
3,19	0,029	0,023	0,029	0,023	0,017	0,014	0,017	0,014
6,38	0,035	0,028	0,035	0,028	0,021	0,017	0,021	0,017
9,57	0,038	0,031	0,038	0,031	0,023	0,018	0,023	0,018
12,76	0,041	0,033	0,041	0,033	0,025	0,020	0,025	0,020
15,95	0,044	0,035	0,044	0,035	0,026	0,021	0,026	0,021

Fonte: Autor.

A partir do lançamento do carregamento, são determinadas as combinações de serviço, tratando cada vento como ação isolada, combinada às cargas permanentes verticais da estrutura. Assim, para todas as hipóteses foram desenvolvidas, através do software STRAP, combinações de serviço onde foram aplicadas cargas permanentes, citadas na Tabela 1, juntamente com a ação variável do vento, obtendo-se quatro combinações de carregamento, uma para cada sentido do vento, que podem ser observados na Figura 4. Desta forma, é possível a obtenção dos deslocamentos nodais de todos os pontos da estrutura, salientando que neste primeiro modelo estrutural consideram-se todas as ligações viga-pilar como rotuladas.

O Quadro 1 apresenta um resumo da consideração em cada combinação de serviço aplicada à estrutura e apresentadas nos resultados desta análise estrutural.

Quadro 1 – Combinações de cargas aplicadas à estrutura

Combinação	Ação Principal	Carregamento
1	Vento 0°	Peso Próprio Estrutural Peso Próprio Lajes Peso Próprio Capa de Concreto
2	Vento 90°	
3	Vento 180°	
4	Vento 270°	

Fonte: Autor.

O Quadro 2 apresenta um resumo das particularidades de cada uma das hipóteses analisadas nesta primeira etapa.

Quadro 2 – Detalhamento das hipóteses analisadas na Etapa 01

Hipótese	Características
01	Estrutura totalmente montada e sem o uso de lajes.
02	Estrutura totalmente montada e lajes no 1° pavimento.
03	Estrutura totalmente montada e lajes no 1° e 2° pavimentos.
04	Estrutura totalmente montada e lajes no 1°, 2° e 3° pavimentos.
05	Estrutura totalmente montada e lajes em todos os pavimentos, exceto na cobertura.
06	Estrutura totalmente montada e lajes em todos os pavimentos.

Fonte: Autor.

4.2 MODELO ESTRUTURAL PARA A ETAPA 02

Considerando que no decorrer da execução de um edifício, é comum ocorrer mais de um processo executivo simultaneamente, admite-se a possibilidade da construção da alvenaria de fechamento em pavimentos inferiores logo após a concretagem das lajes do pavimento subsequente. Portanto, esta segunda etapa de análises estruturais traz quatro hipóteses construtivas e é voltada para a determinação dos deslocamentos, tanto da estrutura finalizada, como da estrutura ao longo da sua execução, assim como na primeira etapa.

Após a análise das seis estruturas iniciais (Etapa 01), são analisados quatro sistemas estruturais, levando-se em conta além da presença das paredes de alvenaria (elemento que recebe ação do vento), a consideração das semirrigidez das ligações vigapilar. A consideração da deformabilidade da ligação é incluída nas análises observando-se o aumento de carregamento lateral aplicado à estrutura e, conseqüentemente, o aumento expressivo do deslocamento. Nota-se que somente o travamento estrutural

através das lajes não é suficiente para a garantia de uma estabilidade global que respeite os limites normativos do caso em estudo.

Admitindo que as paredes de alvenaria constituem um elemento estanque e, seguindo as prerrogativas determinadas pela ABNT NBR 6123:1988, tem-se, na Tabela 5 os valores das ações variáveis calculadas para a ação do vento na estrutura.

Tabela 5 – Ações laterais aplicadas à estrutura

Altura (m)	Ação do Vento (tf/m^2)		
	Barlavento	Sotavento	Laterais
3,19	0,035	0,025	0,046
6,38	0,042	0,030	0,054
9,57	0,047	0,033	0,060
12,76	0,050	0,036	0,064
15,95	0,053	0,038	0,068

Fonte: Autor.

Assim, utilizando os carregamentos permanentes e variáveis possíveis durante a execução do edifício, igualmente explicado para a Etapa 01, são determinadas as combinações de carregamento para a segunda etapa. Com isso, são obtidas as envoltórias de deslocamentos máximos.

O Quadro 3 apresenta as particularidades aplicadas a cada uma das hipóteses analisadas.

Quadro 3 – Detalhamento das hipóteses analisadas na Etapa 02

Hipótese	Características
07	Estrutura e alvenaria executada em todos os pavimentos e sem uso de ligações semirrígidas entre vigas/pilares
08	Estrutura totalmente montada e alvenaria executada no 1º e 2º pavimentos
09	Estrutura totalmente montada e alvenaria executada no 1º, 2º e 3º pavimentos
10	Estrutura totalmente montada e alvenaria executada em todos os pavimentos

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS

Considerando o comprimento l da estrutura como sendo sua maior altura, tem-se pela Equação 01 e Equação 02, os limites de deslocamento aceitáveis para o edifício analisado neste trabalho, com altura total de 15,95 m. Valores das dimensões detalhadas do edifício podem ser observadas em Anexo.

$$\frac{l}{250} = \frac{1595}{250} = 6,38 \text{ cm} \quad (01)$$

$$\frac{l}{350} = \frac{1595}{350} = 4,55 \text{ cm} \quad (02)$$

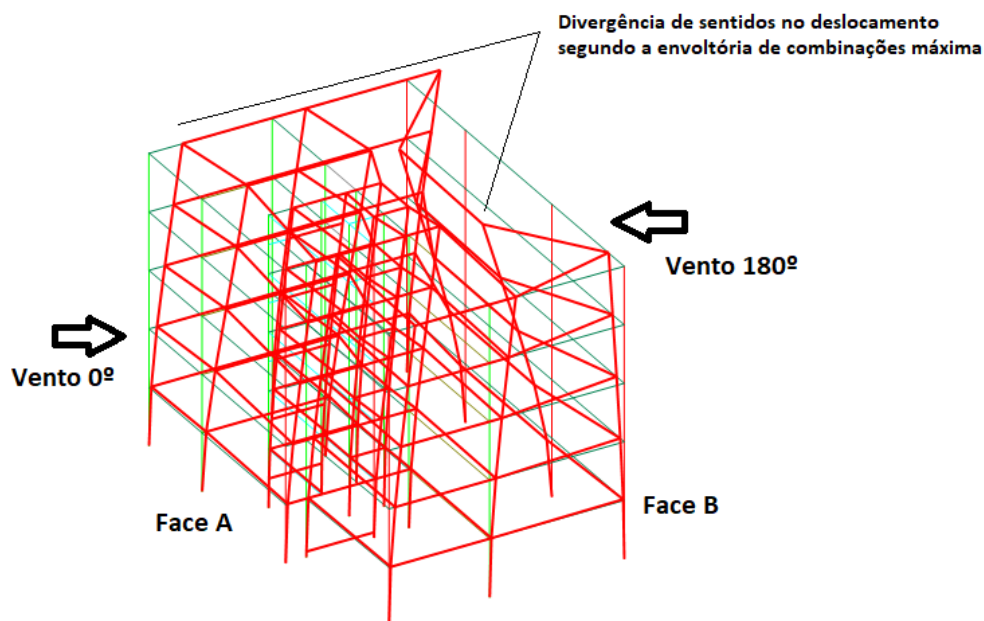
Desta maneira, para efeito comparativo, o deslocamento máximo aceitável para a estrutura em estudo neste trabalho é de 4,55 cm.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA A ETAPA 01

Todos os resultados citados a seguir são obtidos da envoltória máxima de combinações, pois esta refere-se ao maior deslocamento estrutural analisando todas as combinações de carregamentos possíveis. Portanto, em casos em que não há o travamento do pavimento através da laje, é possível observar a estrutura em uma divergência de sentidos, pois, por exemplo, enquanto o vento 0° gera uma ação no sentido positivo na face A, o vento 180° gera uma ação no sentido oposto (do outro lado da estrutura, na face B).

A Figura 5 apresenta uma imagem da envoltória final dos máximos deslocamentos gerados na estrutura para todas as possibilidades de ação do vento consideradas neste trabalho.

Figura 5 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas



Fonte: Autor

Salienta-se que nesta etapa de análise não são consideradas a construção das paredes no decorrer da execução estrutural e não são inseridas ligações semirrígidas entre vigas e pilares. Os deslocamentos verticais da estrutura não são apresentados por não serem significativos e não serem escopo de análise da proposta deste trabalho.

5.1.1 Hipótese 01

Esta primeira hipótese trabalha com uma possível execução de somente a montagem das vigas e pilares no edifício. Desta forma, excluindo-se a ligação entre a fundação e os pilares (rígida), todas as suas ligações restantes são consideradas rotuladas.

Esta situação corresponde, por exemplo, ao caso de abandono da obra, problemas financeiros ou legislativos que impeçam a continuidade da construção. Desta forma, esta hipótese visa avaliar se há risco em deixar os elementos pré-moldados montados no local.

A Tabela 6 apresenta os valores críticos de deslocamento para esta situação analisada. Os resultados são apresentados para os nós críticos, ou seja, nós que possuem o maior deslocamento nas direções X1 e X2.

Tabela 6 – Dados obtidos para Hipótese 01

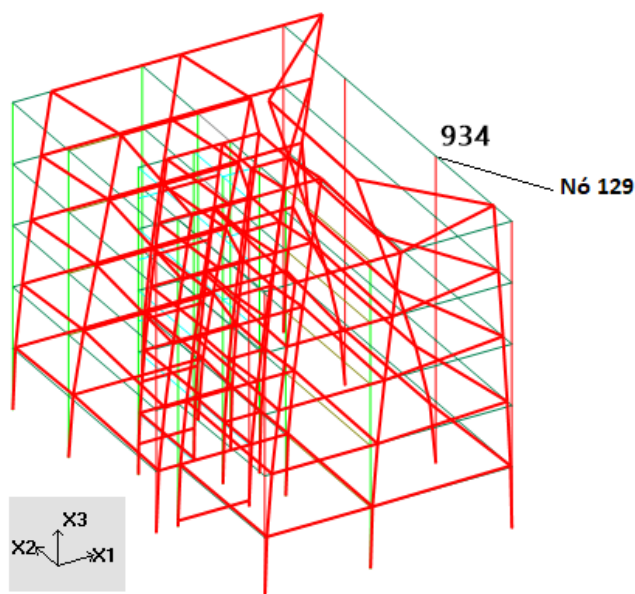
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	-9,343	3,666
Nó Crítico	129	129
Combinação Crítica	4	3

Fonte: Autor.

Nesta hipótese é possível analisar que o resultado de deslocamento horizontal no sentido X1 excede o limite determinado via norma, que pode ser observado na Equação 02. Desta forma nota-se que o modelo apresentado constitui riscos e não deve ser executado. Observa-se que o maior deslocamento é gerado pela combinação 4, onde são utilizadas as cargas permanentes juntamente com a ação do vento a 180°.

A Figura 6 apresenta o local de máximo deslocamento e uma representação gráfica do comportamento estrutural da hipótese 01.

Figura 6 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 01



Fonte: Autor.

5.1.2 Hipótese 02

A segunda hipótese analisada consiste na possível execução da estrutura de vigas e pilares por completo e a execução da laje do primeiro pavimento juntamente com sua capa de concreto. Nesta opção, além dos pilares, somente o plano de lajes do primeiro pavimento gera rigidez para a estrutura, sendo possível observar na Figura 7 que a superfície do primeiro pavimento sofre pequenos deslocamentos se comparado ao restante da estrutura.

A Tabela 7 apresenta os dados críticos obtidos para a hipótese 02.

Tabela 7 – Dados obtidos para Hipótese 02

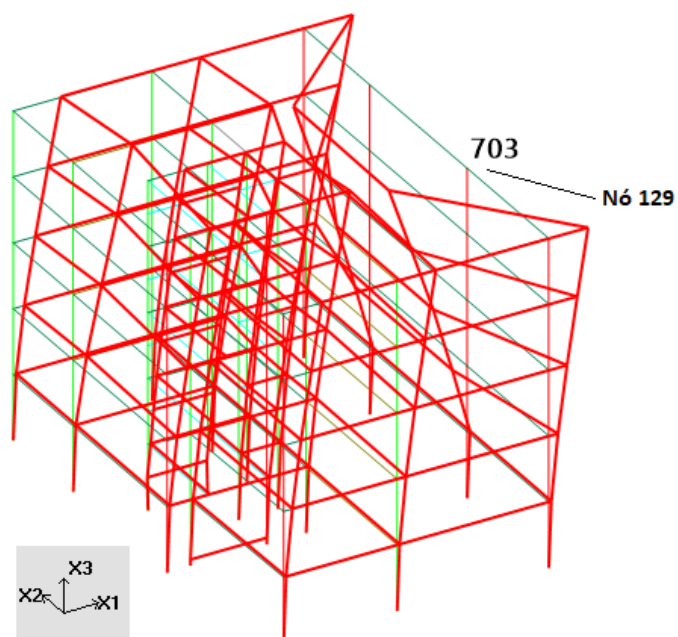
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	-7,031	3.089
Nó Crítico	129	129
Combinação Crítica	4	3

Fonte: Autor.

Novamente, o deslocamento horizontal no sentido X1 excede o limite determinado por norma, que pode ser observado na Equação 02 e, portanto, não se deve ocorrer a montagem estrutural nesta sequência de execução. O ponto de deslocamento crítico segue sendo no último pavimento, no nó 129. A combinação crítica, assim como na hipótese 01, é a aplicação de todas as cargas permanentes juntamente com a ação de vento 180°. A disposição e menor número de pilares na face B da estrutura explica o motivo da combinação deste vento ser crítico para o deslocamento estrutural. Em comparativo com a hipótese 01, a segunda hipótese traz uma redução de aproximadamente 25% no deslocamento do nó crítico da estrutura.

A Figura 7 apresenta a representação gráfica do comportamento estrutural para a hipótese 02 juntamente com a posição de deslocamento máximo.

Figura 7 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 02



Fonte: Autor.

5.1.3 Hipótese 03

A terceira hipótese analisada apresenta uma execução de forma que estejam finalizadas totalmente as vigas e pilares e concretadas as lajes do primeiro e segundo pavimentos. Desta forma, a estrutura apresenta uma maior estabilidade lateral dado o travamento em dois níveis de piso que as lajes desta hipótese proporcionam.

A Tabela 8 apresenta os dados críticos de deslocamentos para a hipótese 03.

Tabela 8 – Dados obtidos para Hipótese 03

Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	-4,992	2,563
Nó Crítico	129	129
Combinação Crítica	4	3

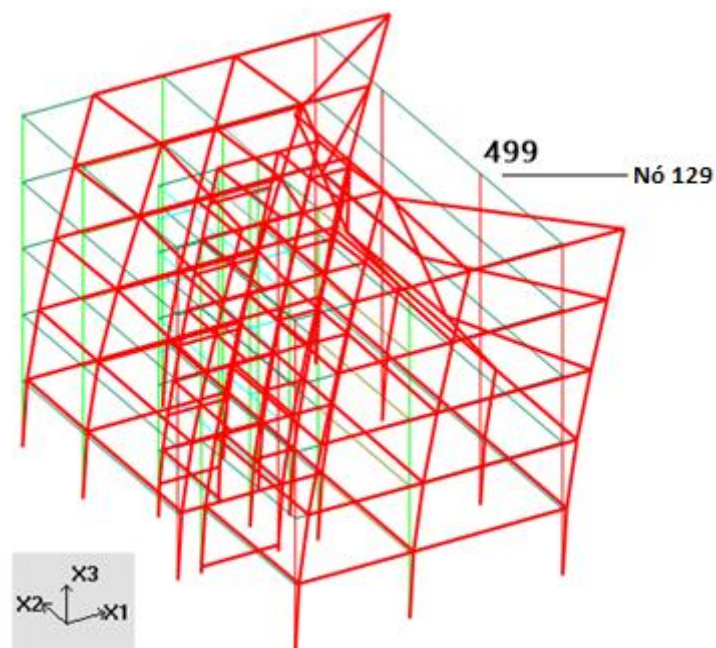
Fonte: Autor.

Os valores apresentados na Tabela 8 demonstram significativa redução dos deslocamentos no decorrer da execução das lajes na estrutura, apresentando, na direção crítica, uma redução de aproximadamente 30% se comparado à hipótese 02, onde apenas um pavimento contribui para a estabilidade da estrutura.

Apesar da significativa redução de deslocamentos citada, se comparado o deslocamento horizontal no sentido X1 com o limite demonstrado na Equação 02, ainda há um excedente de deslocamento, desta forma este modelo de execução não deve ser executado de forma que possa garantir a segurança do empreendimento.

Embora ocorra variação de deslocamentos, nestas primeiras hipóteses, o deslocamento no nó crítico e a combinação crítica se mantém os mesmos. A Figura 8 apresenta o local de máximo deslocamento e uma representação gráfica do comportamento estrutural da hipótese 03.

Figura 8 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 03



Fonte: Autor.

5.1.4 Hipótese 04

A quarta hipótese analisada apresenta um modelo de execução estrutural que pode aparecer com maior frequência em canteiros de obras. A estrutura tem vigas e pilares totalmente montadas e as lajes dos três primeiros pavimentos com capa de concreto executadas.

A Tabela 9 apresenta os dados críticos obtidos para a hipótese 04.

Tabela 9 – Dados obtidos para Hipótese 04

Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	4,118	2,254
Nó Crítico	136	129
Combinação Crítica	2	3

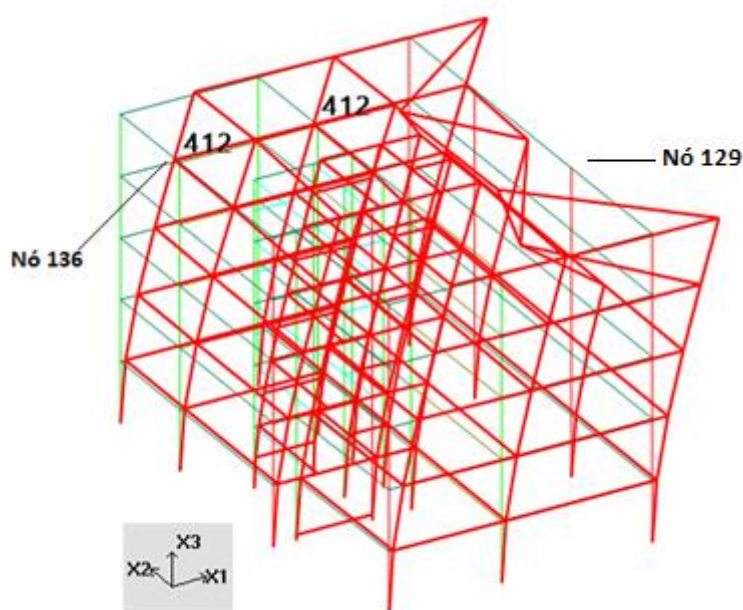
Fonte: Autor.

Para a estrutura com três pavimentos totalmente concretados observa-se que ocorre, pela primeira vez, uma mudança de sentido do deslocamento máximo, nó crítico e combinação crítica, se comparado com as três primeiras hipóteses analisadas.

Nota-se um deslocamento, em X1, de 4,118 cm. Esta é a primeira hipótese onde, se comparado ao limite normativo expresso na Equação 02, a estrutura está atendendo a exigência de deslocamento. Neste modelo, o deslocamento crítico surge na combinação de cargas 2, com todas as cargas permanentes e a ação do vento 0°.

A Figura 9 apresenta o comportamento estrutural desta hipótese e nela observa-se a existência da tendência do comportamento estrutural uniforme ao longo da estrutura, onde quase todos os pilares tendem a deslocar para um mesmo sentido.

Figura 9 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 04



Fonte: Autor.

5.1.5 Hipótese 05

Trata-se da hipótese onde todos os níveis de lajes, excluindo-se a cobertura, estão devidamente finalizados. Desta forma, em questão de desenvolvimento construtivo, trata-se de uma etapa obrigatória em todo tipo de empreendimento que será finalizado. Segue a linha de redução gradativa de deslocamentos gerados e apresenta grande uniformidade

no deslocamento global da estrutura. A Tabela 10 apresenta os dados críticos obtidos para a hipótese 05.

Tabela 10 – Dados obtidos para Hipótese 05

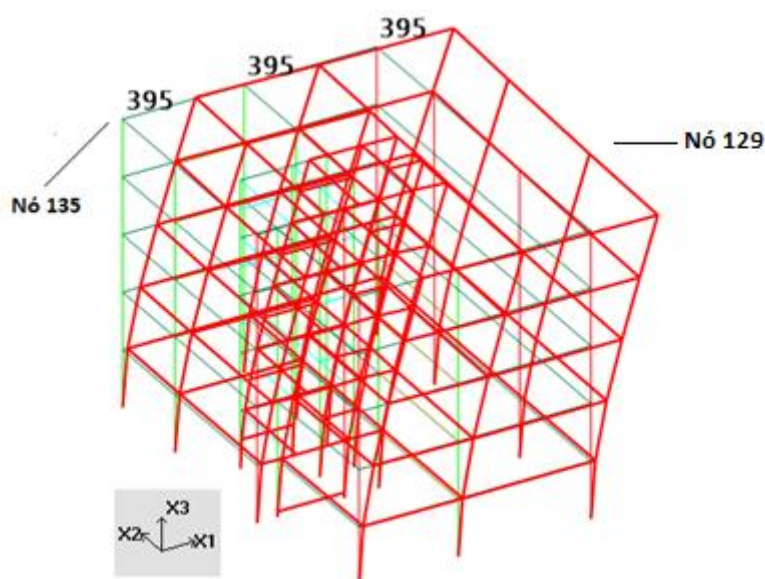
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	3,946	2,128
Nó Crítico	135	129
Combinação Crítica	2	3

Fonte: Autor.

Com deslocamentos menores que o deslocamento limite estipulado através da ABNT NBR 6118:2014, esta hipótese demonstra, de forma quantitativa, que a possibilidade de execução desta estrutura pré-moldada com todos os pavimentos, excluindo-se a cobertura, pode ser feita de forma segura.

A Figura 10 traz a representação gráfica do comportamento estrutural deste modelo juntamente com o local de deslocamento máximo.

Figura 10 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 05



Fonte: Autor.

Observa-se que a partir do acréscimo de pavimentos contribuintes à estabilidade global, o deslocamento da estrutura apresenta-se com maior número de nós próximo ao deslocamento máximo. Isto se dá devido ao fato de a estrutura estar trabalhando em conjunto, fazendo com que ao deslocar um maior número de pontos o deslocamento total máximo seja menor.

5.1.6 Hipótese 06

Para análise, a hipótese 06 apresenta o edifício em sua fase final, onde todos os pavimentos, incluindo a cobertura, estão finalizados. Desta forma, excluindo-se fases construtivas não estruturais, este é o modelo final da edificação.

Dada as evoluções citadas nas hipóteses anteriores e a partir dos dados apresentados na Tabela 11, pode-se afirmar que, caso necessário, há a possibilidade, com segurança, de manter toda a estrutura do edifício montada.

A Tabela 11 apresenta os dados de deslocamento estrutural para a hipótese 06.

Tabela 11 – Dados obtidos para Hipótese 06

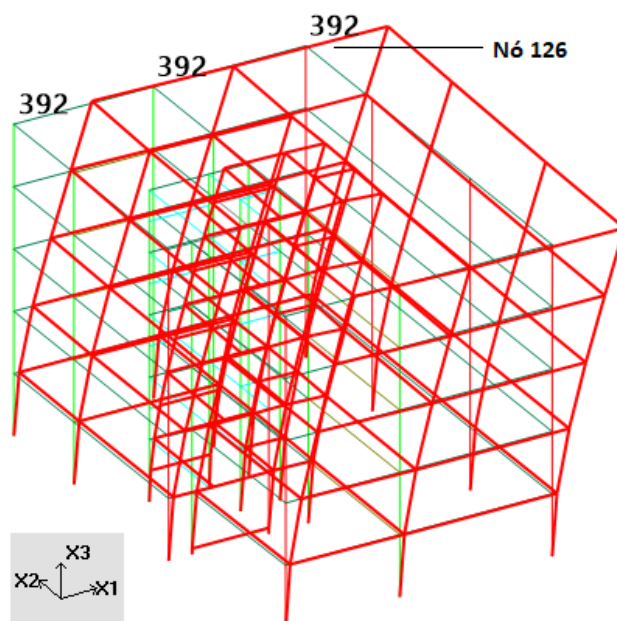
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	3,913	2,097
Nó Crítico	126	126
Combinação Crítica	2	3

Fonte: Autor.

Analisando os dados obtidos, observa-se que entre a hipótese 04 e a hipótese 06 há uma redução de deslocamento em torno de 5%. Desta maneira, se comparada a diferença percentual de deslocamento entre as primeiras hipóteses, é notável a redução de deslocamento a partir do travamento de um maior número de pavimentos do edifício, mostrando de forma numérica a importância das lajes para a estabilidade global da estrutura.

A Figura 11 mostra a representação gráfica da estrutura totalmente executada e a envoltória de carregamentos máxima.

Figura 11 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 06



Fonte: Autor.

Através da Figura 11 e comparando-a com a Figura 6, observa-se a diferença do comportamento estrutural, onde todos os elementos estruturais trabalhando de forma conjunta impõe à estrutura um sentido único de deslocamento.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA A ETAPA 02

Esta etapa de análise estrutural apresenta modelos e resultados que visam trabalhar o desenvolvimento da obra como um todo, ao contrário das hipóteses anteriores que tinham como objetivo a análise apenas da execução estrutural. Desta forma, todas as hipóteses citadas a seguir apresentam, além de toda a estrutura devidamente montada, a execução da alvenaria de fechamento nos pavimentos e o uso de ligações semirrígidas entre vigas e pilares.

No desenvolvimento do projeto de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado, é necessário aumentar a rigidez estrutural de forma que os deslocamentos máximos não ultrapassem os limites definidos em norma. Desta forma, devido ao aumento de cargas causado pela incidência de vento sobre a alvenaria de vedação, definiu-se algumas ligações semirrígidas entre vigas e pilares. Foram aplicadas ligações

semirrígidas nas junções entre viga-pilar nas regiões externas da estrutura onde há pilares intermediários e em pilares de canto no sentido do eixo de menor inércia da estrutura.

Nesta etapa, para efeito comparativo, diferindo das hipóteses restantes, a hipótese 07 apresenta a estrutura totalmente executada, juntamente com a alvenaria de vedação, porém com o uso de ligações articuladas entre vigas e pilares.

5.2.1 Hipótese 07

Como citado anteriormente, esta é uma hipótese para fins comparativos da eficiência do uso das ligações semirrígidas entre vigas e pilares aplicadas à estrutura. Nesta hipótese a estrutura está totalmente montada e com toda sua alvenaria de fechamento executada, porém, somente com as lajes trabalhando como elementos de travamento dos pavimentos e com o uso de ligações articuladas entre todas as ligações entre vigas e pilares

Observa-se um grande deslocamento estrutural se comparado a hipótese 06, pois a estrutura continua com a mesma rigidez e a carga lateral aplicada aumenta consideravelmente. Os resultados críticos de deslocamentos podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados obtidos para Hipótese 07

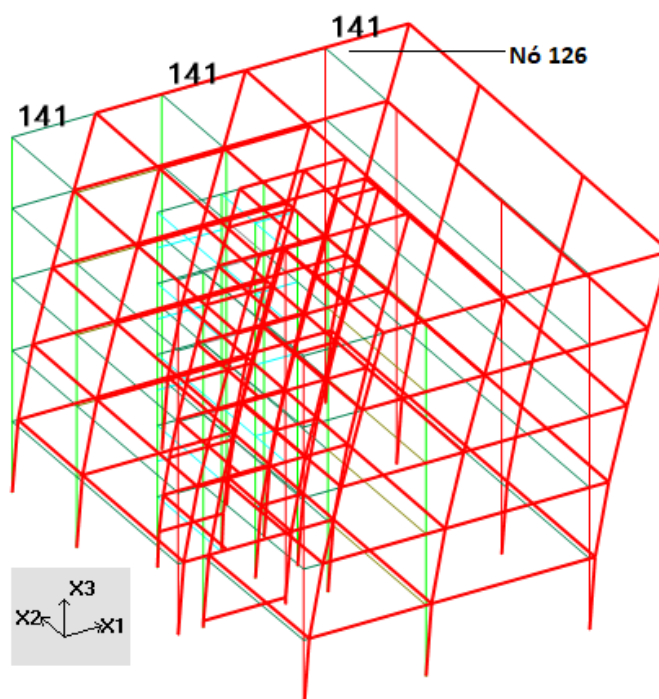
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	14,077	-8.613
Nó Crítico	126	126
Combinação Crítica	2	5

Fonte: Autor.

Com um deslocamento máximo em X1 de 14,077 cm e em X2 de -8,613 cm e realizando a comparação com a Equação 02 e com todas as hipóteses listadas anteriormente, é possível definir esta hipótese como a mais crítica em relação aos deslocamentos e segurança do edifício.

A Figura 12 apresenta a configuração da estrutura segundo a envoltória de combinações máxima.

Figura 12 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 07



Fonte: Autor.

5.2.2 Hipótese 08

Diferentemente da hipótese 07, a hipótese 08 é uma possibilidade construtiva real, onde é analisada a fase de projeto com a necessidade de utilizar ligações semirrígidas, estas já são aplicadas à estrutura conforme concretam-se os pavimentos.

Esta hipótese analisa a possibilidade de uma estrutura com todos seus pavimentos e ligações semirrígidas devidamente finalizados e com a execução da alvenaria de vedação executada nos dois primeiros andares do edifício.

A Tabela 13 apresenta os resultados de deslocamentos críticos para a situação analisada.

Tabela 13 – Dados obtidos para Hipótese 08

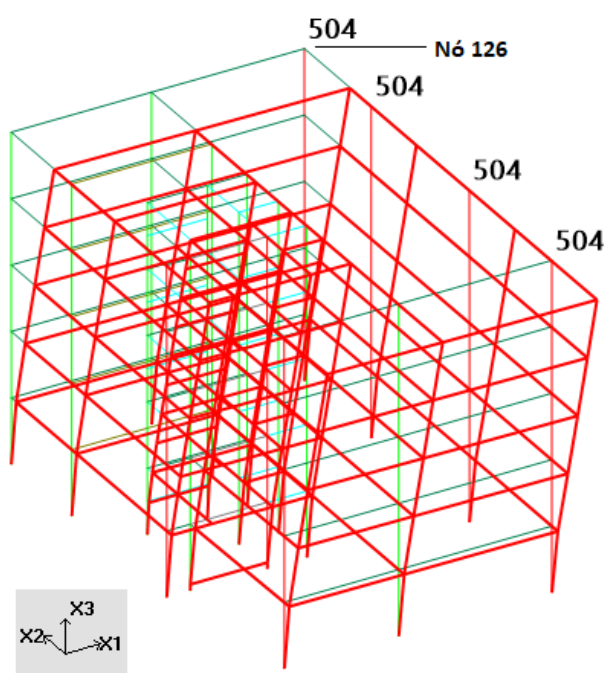
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	0,349	-0,504
Nó Crítico	126	126
Combinação Crítica	2	5

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos apresentam deslocamentos mínimos se comparados a qualquer hipótese analisada anteriormente. Isto é possível devido à grande rigidez gerada pelas ligações semirrígidas aplicadas e pelo pequeno aumento de forças devido ao vento, já que somente nos dois níveis inferiores foram executadas as alvenarias.

A Figura 13 apresenta o comportamento estrutural segundo a envoltória de combinações máximas.

Figura 13 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 08



Fonte: Autor.

5.2.3 Hipótese 09

Analisando uma nova possibilidade de execução estrutural, a hipótese 09 apresenta uma estrutura totalmente montada, assim como na hipótese 08, porém com a alvenaria de vedação totalmente executada nos seus três primeiros pavimentos.

Para esta hipótese, a Tabela 14 apresenta os resultados de deslocamentos críticos.

Tabela 14 – Dados obtidos para Hipótese 09

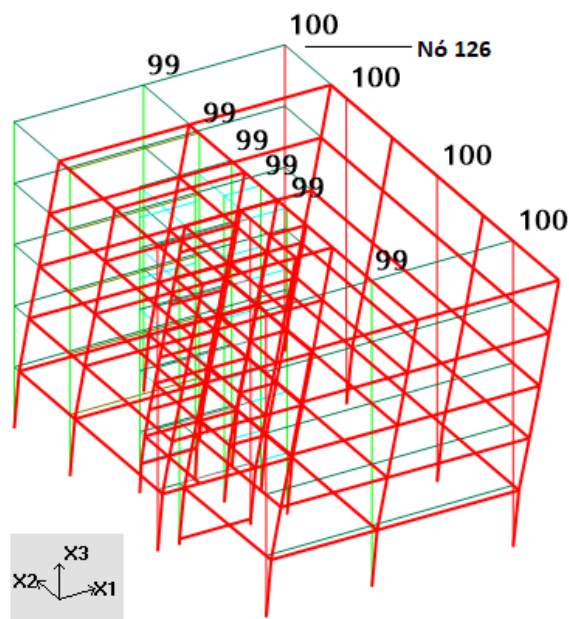
Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	0,832	-1,00
Nó Crítico	126	126
Combinação Crítica	2	5

Fonte: Autor.

Através da análise de dados da Tabela 14, em comparação com a Tabela 13, é possível observar um grande aumento no deslocamento estrutural. Este resultado é esperado devido ao aumento da área de alvenaria que contribuí com a ação de vento atuante sobre a estrutura. Apesar do aumento, os deslocamentos são inferiores aos deslocamentos máximos definidos por norma e apresentados nas Equações 01 e 02.

A Figura 14 ilustra o deslocamento estrutural a partir da envoltória de combinações máximas para a hipótese 09.

Figura 14 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 09



Fonte: Autor.

5.2.4 Hipótese 10

A última análise estrutural feita é relacionada ao comportamento da estrutura totalmente executada, onde são aplicados todos os dispositivos de enrijecimento estrutural e executadas todas as alvenarias. Nesta hipótese as ações devido ao vento são máximas.

A Tabela 15 apresenta os dados referentes aos deslocamentos críticos encontrados para a hipótese 10.

Tabela 15 – Dados obtidos para Hipótese 10

Direção	X1	X2
Deslocamento Máx. (cm)	2,329	-2,511
Nó Crítico	126	131
Combinação Crítica	2	5

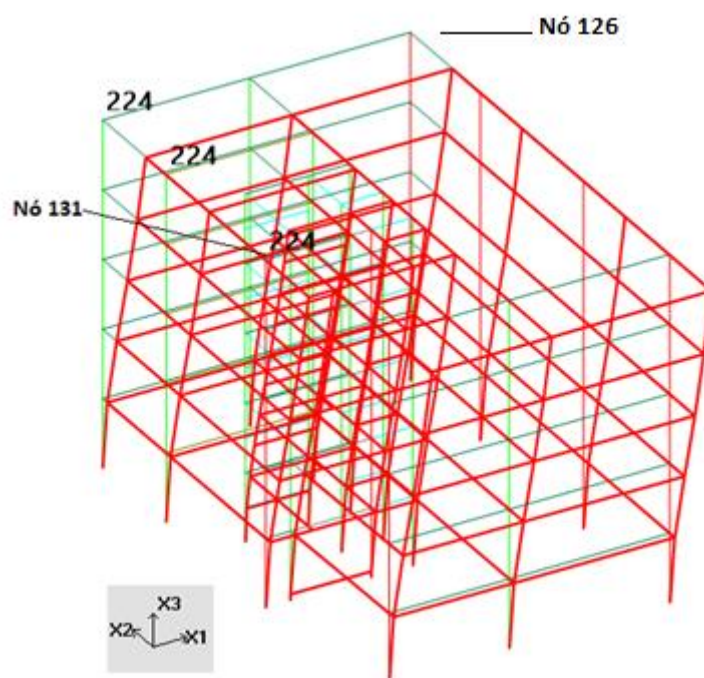
Fonte: Autor.

Os deslocamentos encontrados nesta etapa de análises são satisfatórios e apresentam um valor inferior ao deslocamento limite expresso na Equação 02. Desta forma conclui-se que a estrutura possui a rigidez necessária, quantos aos deslocamentos, para estar em conformidade a ABNT NBR 6118:2014.

Realizando uma comparação entre os efeitos de deslocabilidade gerados na estrutura da hipótese 07 e hipótese 10, é possível observar uma redução de movimento estrutural de aproximadamente 11,7 cm no deslocamento máximo de ambas. Através deste dado é explícita a influência da utilização das ligações semirrígidas entre vigas e pilares.

O comportamento de deslocamento estrutural gerado na estrutura completa pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Deslocamentos máximos para a envoltória de combinações máximas na hipótese 10



Fonte: Autor.

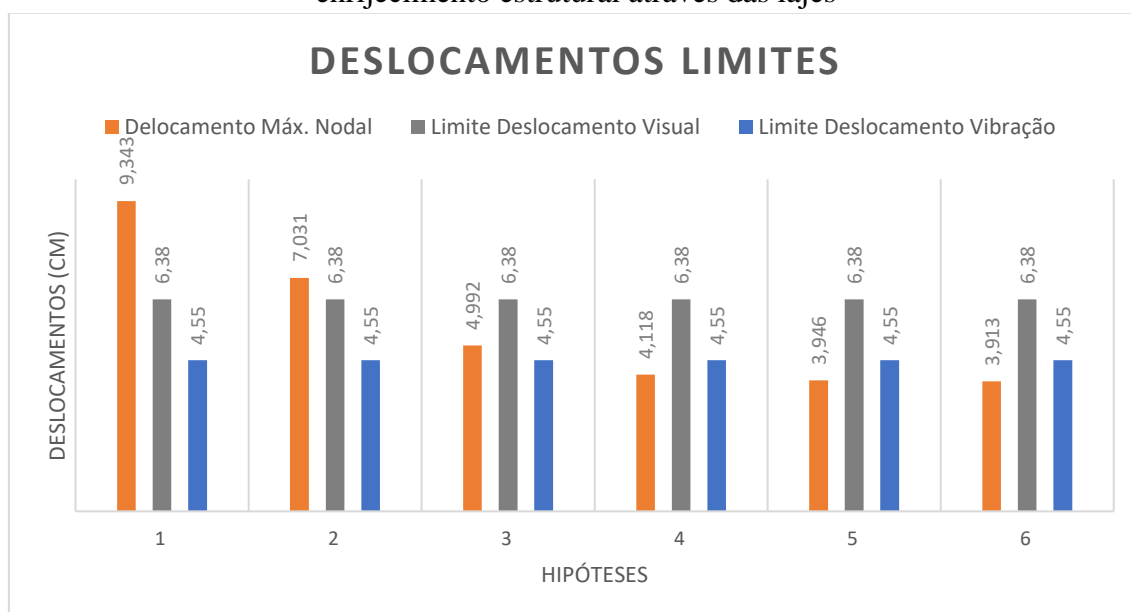
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos dados obtidos das dez hipóteses construtivas criadas e do uso de ligações semirrígidas ou não, é possível determinar que alguns modelos construtivos não

devem ser executados de modo que seja possível garantir a total segurança e caso seja necessário ocorrer a interrupção do empreendimento, antes do abandono da obra, deve-se realizar um estudo verificando se ela está segura e estável.

Quanto aos deslocamentos, é possível verificar que a execução de somente os elementos de vigas e pilares e de até dois pavimentos de lajes não garantem estabilidade ao edifício. Desta forma, deve-se evitar os modelos de execução apresentados nas primeiras três hipóteses citadas. A Figura 16 apresenta os dados de limites e deslocamentos encontrados para cada uma das hipóteses iniciais.

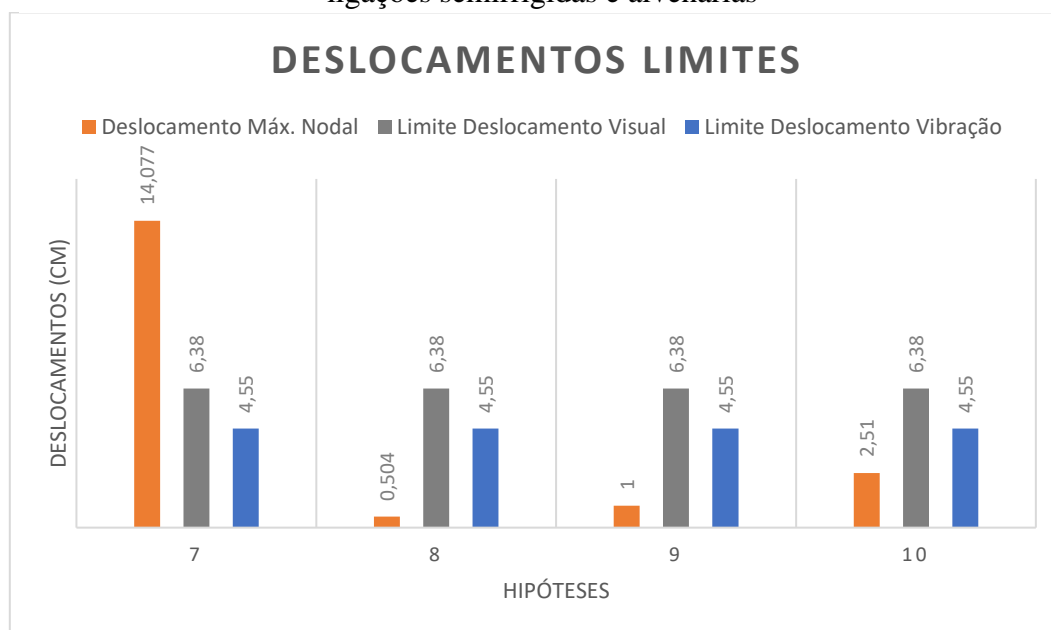
Figura 16 – Resultados para os deslocamentos das hipóteses considerando o enrijecimento estrutural através das lajes



Fonte: Autor.

Em relação à segunda etapa de análises, os dados obtidos diferem dos anteriores, dada a grande estabilidade gerada pelas ligações semirrígidas na estrutura. Nesta etapa é possível observar que a estrutura possui estabilidade suficiente para atender todos os limites de deslocamento. A Figura 17 apresenta os dados de limites e deslocamentos encontrados para cada uma das hipóteses analisada na segunda etapa.

Figura 17 – Resultados para os deslocamentos das hipóteses considerando ligações semirrígidas e alvenarias



Fonte: Autor.

Observando a relação entre os deslocamentos gerados na hipótese 07 e nas demais, é possível destacar a grande influência das ligações semirrígidas entre vigas e pilares aplicadas à estrutura. Inicialmente, a estrutura está sujeita a um maior deslocamento, dentre todas as hipóteses analisadas e, ao final, a estrutura apresenta-se completamente dentro dos limites aceitáveis em norma, tendo uma redução de aproximadamente 560% no deslocamento entre os nós críticos de ambas as hipóteses.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos em todas as hipóteses apresentadas neste trabalho foi possível determinar os deslocamentos gerados em cada modelo de execução estrutural de uma estrutura pré-moldada, realizando variações estruturais em relação às suas ligações semirrígidas e cargas aplicadas à estrutura.

Conforme apresentado durante o decorrer do trabalho, tendo como parâmetro de avaliação os limites de deslocamentos finais à um edifício, dispostos na norma regulamentadora ABNT NBR 6118:2014, existem modelos de execução estrutural que não atendem os requisitos de deslocamentos máximos para a estrutura, portanto estes

métodos executivos não devem ser executados sem um prévio estudo da estrutura a ser desenvolvida.

Em geral, para a estrutura analisada, somente o enrijecimento estrutural via o uso das lajes, não é capaz de gerar estabilidade global quanto ao deslocamento, em relação ao edifício finalizado. Porém, para etapas intermediárias de construção, conforme apresentado, as lajes conseguem prover o travamento estrutural necessário para a estrutura quando se trabalha com lajes finalizadas em no mínimo dois pavimentos.

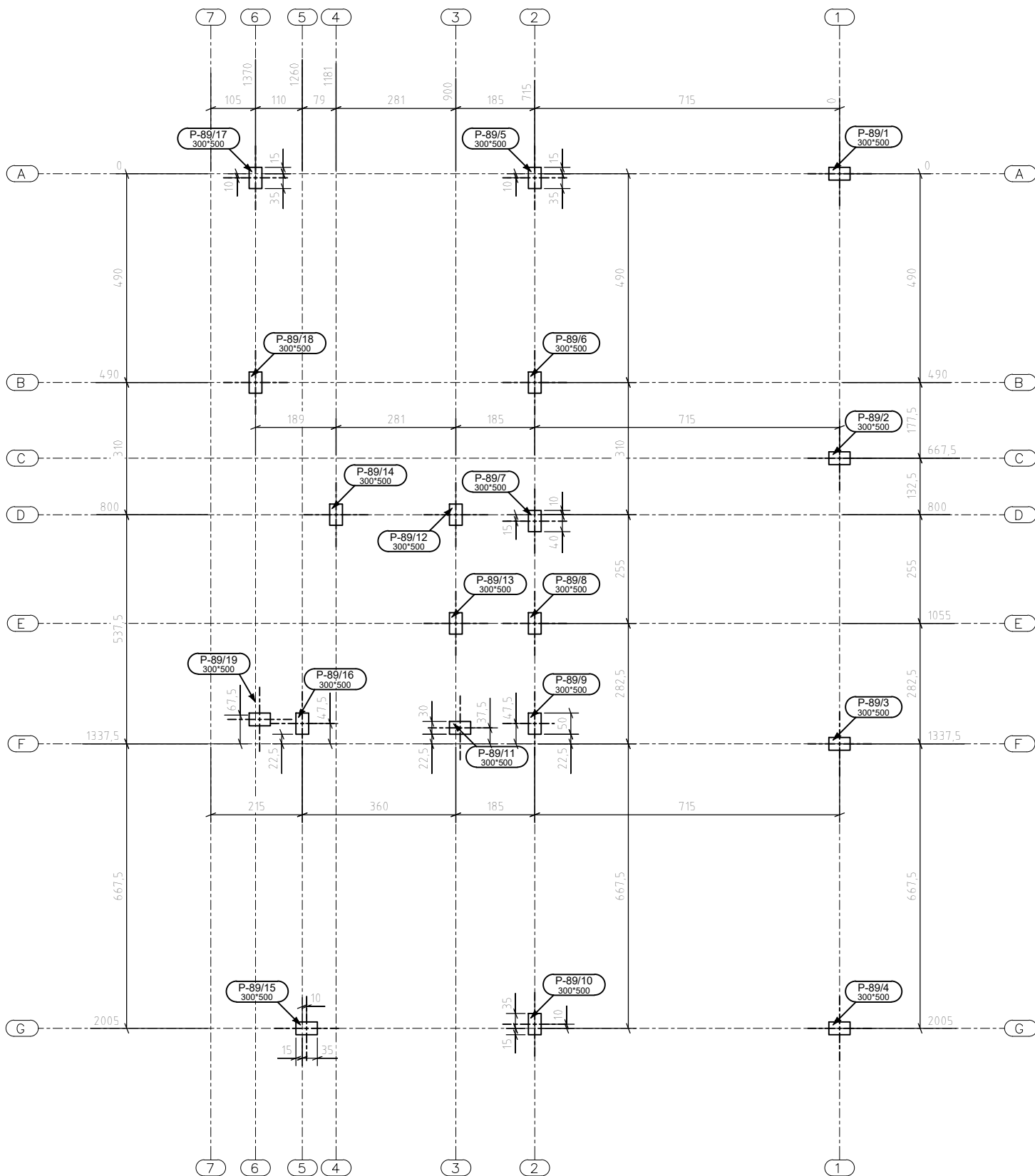
A segunda etapa do trabalho apresenta dados referentes ao uso de ligações semirrígidas entre vigas e pilares, de modo a deixar claro o grande impacto gerado por estas ligações, onde no modelo final, hipótese 10, há uma folga em relação ao deslocamento estrutural e os limites estabelecidos via norma.

Conclui-se que é necessário haver um alinhamento entre projeto e execução de forma a garantir a maneira mais eficiente e segura para a execução estrutural. Em casos de mudanças no planejamento executivo ou na não possibilidade de execução estrutural como pré-definido, o projeto deve ser analisado e verificado se realmente há a possibilidade de manter a estrutura de forma inacabada com segurança.

REFERÊNCIAS

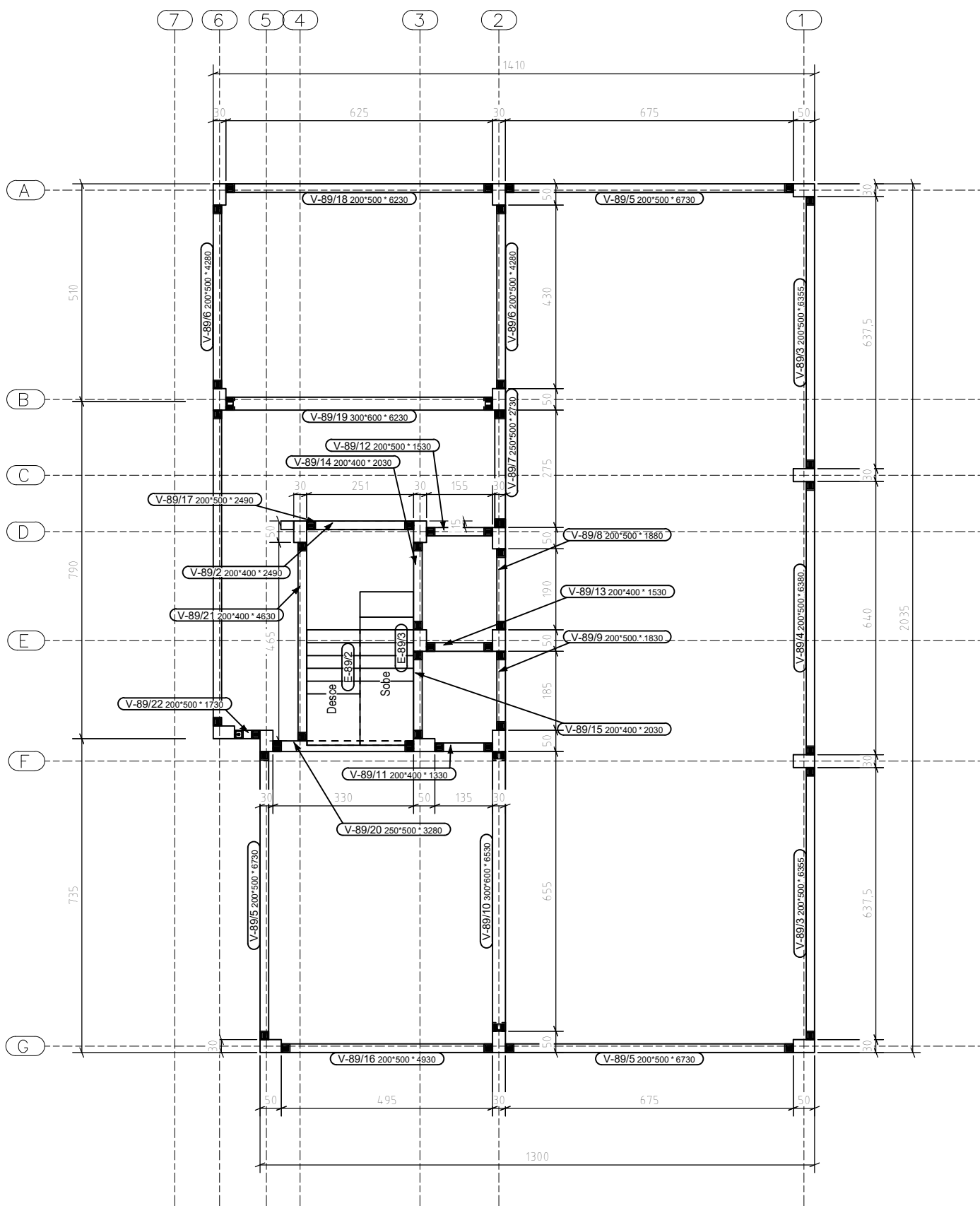
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118-Projetos de estruturas de concreto – Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120-Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6123-Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9062-Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BALDISSERA, A. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor**. São Carlos, 2006.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado - fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2ed, 2017.
- MAROSTEGA, E. B. **Estudo sobre ligações semirrígidas em estruturas de concreto pré-moldado**. Porto Alegre, 2016.
- GUTIERRE, S. M. **Estudo sobre a contribuição das lajes na estabilidade global de edifícios**. Florianópolis, 2016.
- MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado: Análise com ênfase na deformabilidade ao momento fletor**. São Carlos, 2002.

ANEXO A – LOCAÇÃO DE PILARES



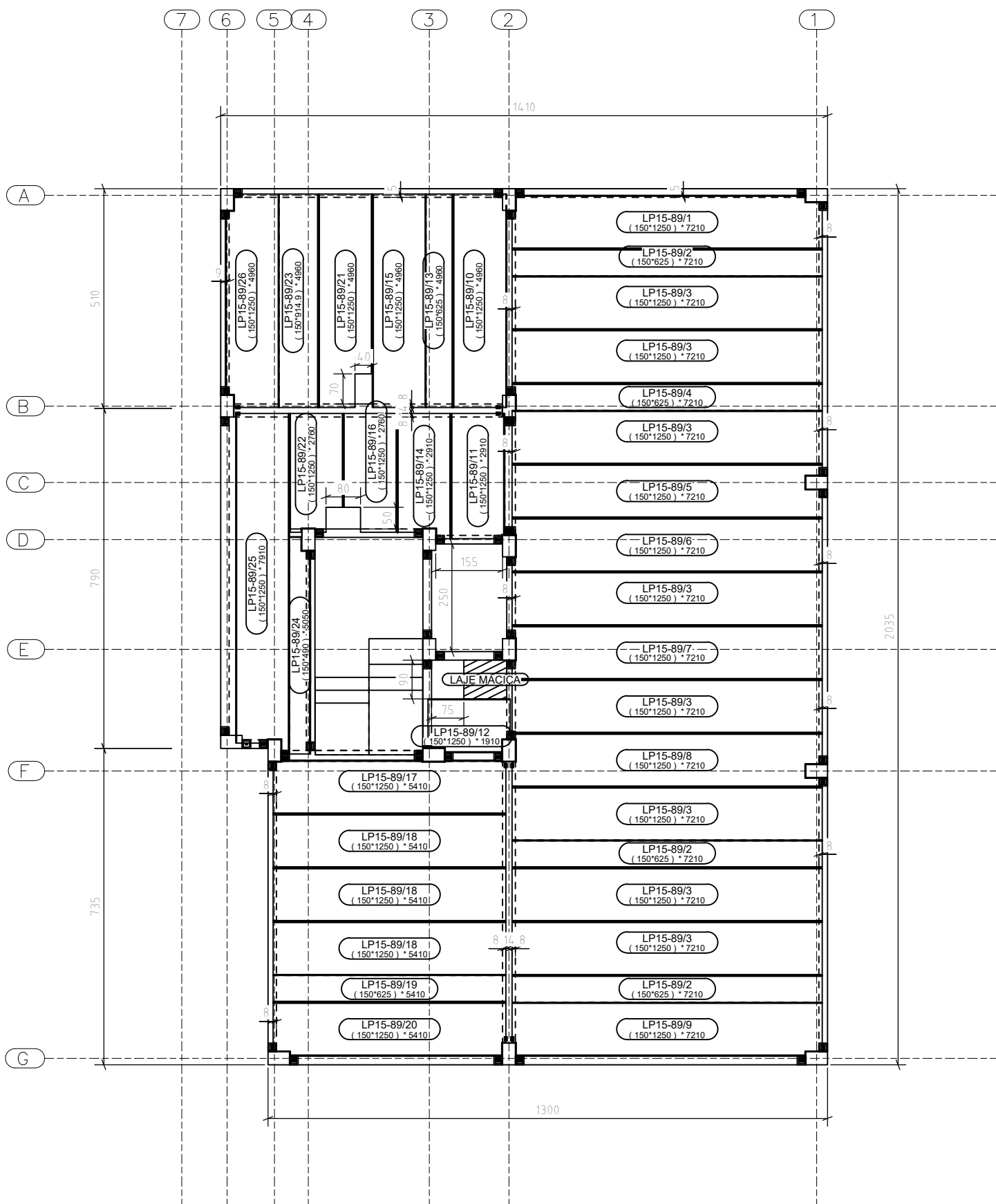
01 LOCAÇÃO DOS PILARES
Escala: 1:75

ANEXO B – PLANTA DE VIGAS PVTO. TIPO



02 FÓRMA DE VIGAS PAVT. TIPO
Escala: 1:75

ANEXO C – PLANTA DE LAJES PVTO. TIPO



03 PLANTA DE LAJES PVTO. TIPO
Escala: 1:75