

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

Tiago Oliveira Alves

**ANÁLISE NUMÉRICA DE LAJES EM BALANÇO MACIÇAS
E NERVURADAS**

Guarapuava

Julho 2019

TIAGO OLIVEIRA ALVES

**ANÁLISE NUMÉRICA DE LAJES EM BALANÇO MACIÇAS
E NERVURADAS**

Trabalho de conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Engenharia Civil (COECI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Edson Florentino de Souza
Co-orientador: Prof. Me. Rodrigo Scoczynski Ribeiro

Guarapuava

Julho 2019

TIAGO OLIVEIRA ALVES

**ANÁLISE NUMÉRICA DE LAJES EM BALANÇO MACIÇAS E
NERVURADAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Engenharia Civil (COECI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Guarapuava, 04 de julho de 2019.

Prof. Edson Florentino de Souza, Mestre
Coordenador de Curso de Engenharia Civil

Prof. Petronio Rodrigo Mello Montezuma, Doutor
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Civil do COECI

ORIENTAÇÃO

Prof. Me. Edson Florentino de Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Me. Rodrigo Scoczynski Ribeiro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edson Florentino de Souza (UNESP)

Prof. Me. Carlos Francisco Pecapedra Souza (UFSC)

Prof. Me. Dyorgge Alves Silva (UnB)

Dedico este trabalho a meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe e meu pai que com muito esforço conseguiram me proporcionar uma oportunidade de cursar o ensino superior.

Agradeço aos amigos que estiveram comigo nesses anos da graduação e que estarão comigo após o término.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Edson Florentino de Souza, ao Co-orientador Rodrigo Scoczynski Ribeiro e todos os outros professores pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

RESUMO

ALVES, Tiago Oliveira. **Análise Numérica de Lajes em Balanço Maciça e Nervurada**. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

Tendo em vista que uma melhor concepção de um projeto estrutural pode melhorar o desempenho dos elementos estruturais, proporcionar um aumento nos vãos dos mesmos e diminuir insumos que tem maior significância no custo final da obra, através de materiais com menor peso para compensar materiais sem função estrutural e pesquisa sobre o comportamento e a interação entre lajes em balanço e as adjacente a mesma, a fim de determinar as dimensões limites dos vãos para lajes maciças e nervuradas e como conceber as lajes adjacente para proporcionar melhor desempenho na laje em balanço. Para tanto, é necessário estabelecer valores máximos de esforços para o dimensionamento em função do vão e das lajes adjacentes, comparar as taxas de armadura por metro construído estabelecer qual a influência gerada no elemento quando se tem um variações de dimensões nas lajes adjacentes e no comprimento em balanço. Realiza-se, então, uma pesquisa de natureza descritiva no que diz respeito aos objetivos e quantitativa com relação aos resultados, pois será feito um comparativo entre os consumo de insumos, esforços e deformações máximas de elementos estruturais executados em duas tecnologias, valores que serão obtidos a partir dos cálculo realizados em um software de dimensionamento de concreto armado, CypeCad. Diante disso, verifica-se que as lajes maciças apresentam comprimento máximo em balanço de 3,00 m com uma espessura de 15 cm e as nervuradas 4,00 m com 35 cm, as lajes apresentaram as mesmas características de curvatura após as deformações, mas com valores distintos, as lajes nervuradas atenderam os limites máximos prescritos as normas brasileiras e as maciças tiveram poucos casos que atendiam esses limites, os esforços máximos ocorreram sempre nas lajes maciças quando comparado as mesmas plantas de forma e os esforço, independente da região, tiveram comportamento semelhante a curvas de 2º ordem conforme aumentava o comprimento do balanço com poucos pontos que fugiam desse padrão, lajes com comprimento inferiores na direção y (perpendicular ao balanço) apresentaram menores consumos de aço para a execução das lajes e que o alongamento no sentido do balanço favorece ainda mais para diminuir o consumo, o que impõe a constatação de que as lajes nervurada apresentaram vários benefícios para ser tomada como técnica a ser utilizada e que a melhor disposição da laje associada à um balanço é dimensões maiores no sentido do balanço e menores na direção perpendicular.

Palavras-chave: Concepção. Laje. Maciça. Nervurada. Numérica.

ABSTRACT

ALVES, Tiago Oliveira. Numerical Analysis of Slabs in Massive and Ribbed Balance. 2019. 53 f. Completion of a Bachelor's Degree in Civil Engineering - Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2019.

Considering that a better design of a structural project can improve the performance of the structural elements, provide an increase in the spans of the same and reduce inputs that have greater significance in the final cost of the work, through materials with lower weight to compensate materials without function structural analysis and research on the behavior and interaction between adjacent and adjacent slabs in order to determine the boundary dimensions of spans for solid and ribbed slabs and how to design the adjacent slabs to provide better performance on the slab. To do so, it is necessary to establish maximum values of effort for the design according to the span and adjacent slabs, to compare the armature rates per meter constructed to establish the influence generated in the element when there is a variation of dimensions in the adjacent slabs and in the length on balance sheet. A research of a descriptive nature with regard to the objectives and quantitative with regard to the results is carried out, since a comparison will be made between the consumption of inputs, efforts and maximum deformations of structural elements executed in two technologies, values that will be obtained from the calculation performed in a software of sizing of reinforced concrete, CypeCad. In view of this, it can be verified that the massive slabs have a maximum balance length of 3.00 m with a thickness of 15 cm and the ribs 4,00 m, the slabs presented the same curvature characteristics after the deformations, but with different values , the ribbed slabs met the maximum limits prescribed by the Brazilian norms and the massive ones had few cases that met these limits, the maximum efforts always occurred in the massive slabs when compared to the same shape plants and the effort, independent of the region, had similar behavior to second-order curves as the balance length increased with few points that deviated from this standard, slabs with lower lengths in the y direction (perpendicular to the balance) presented lower steel consumption for the slabs execution and that the elongation in the balance direction favors even more so as to reduce consumption, which makes it necessary to note that the ribbed slabs the benefits to be taken as the technique to be used and that the best arrangement of the slab associated with a balance sheet is larger in the direction of the balance and smaller in the perpendicular direction.

Keywords: Conception. Slab. Massive. Ribbed. Numerical.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	9
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	9
1.2.1	Objetivo principal	10
1.2.2	Objetivos Secundários	10
2	ESTRUTURAS DE CONCRETO	11
2.1	ELEMENTOS ESTRUTURAIS (SUPRA ESTRUTURA).....	11
2.1.1	Elementos lineares	11
2.1.2	Elementos de superfície	12
2.2	TIPOS DE CONCRETO.....	15
2.2.1	Concreto Armado	15
2.3	ETAPAS DE PROJETO	15
2.4	MATERIAIS INERTE PARA PREENCHIMENTO	16
2.5	CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	17
2.6	ARMADURAS COMPLEMENTARES	20
2.7	COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	21
2.7.1	Combinações últimas normais.....	22
2.7.2	Quase permanentes	22
2.8	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	22
2.8.1	Análise linear:.....	22
2.8.2	Análise linear com redistribuição:	23
2.8.3	Análise não linear:	23
2.8.4	Análise através de modelos físicos:	24
2.8.5	Análise plástica:.....	24
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	TIPOLOGIA DE PESQUISA	25

3.2	ESPESSURA DAS LAJES	26
3.3	NERVURAS DAS LAJES	27
3.4	DIMENSÕES DAS VIGAS E PILARES	27
3.5	CARREGAMENTOS	29
3.6	TRATAMENTOS DOS DADOS	31
4	DISCUSSÕES E RESULTADOS	32
4.1	COMPRIMENTOS MÁXIMO DOS BALNÇOS	32
4.2	DEFORMAÇÕES	32
4.3	ESFORÇOS DE DIMENSIONAMENTO	40
4.4	CONSUMO E TAXA DE AÇO	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.1	CONCLUSÃO	58
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
6.	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Para KIMURA (2007) a análise estrutural é a etapa mais importante para a elaboração do projeto estrutural, pois através dessas análises é possível determinar os deslocamentos e esforços solicitantes (necessários para as verificações dos estados-limites últimos, ELU, e de serviço, ELS) nos elementos estruturais de forma mais precisa e condizente com real.

Pinheiro (2007) aborda que a escolha do sistema estrutural depende de fatores técnicos e econômicos, dentre eles atender os ELU e ELS, mão de obra, equipamentos necessários para execução e exequibilidade do projeto.

Segundo Terec (2013), a inserção de material de enchimento gera uma redução peso morto, peso de componente da laje sem função estrutural, de até 30%, proporcionando menores carregamentos, aumento de características que reduzem as deformações na estrutura e as taxas de armadura.

Uma melhor concepção de um projeto estrutural pode melhorar o desempenho dos elementos estruturais, pode proporcionar um aumento nos vãos dos mesmos e diminuir insumos que tem maior significância no custo final da obra. Deve-se fazer a utilização de materiais leves em regiões onde o concreto não tenha função estrutural para melhorar o desempenho da estrutura. Realizar uma análise numérica dos elementos de superfície pode auxiliar na elaboração das plantas de forma dos elementos de superfícies através dos parâmetros de dimensionamento obtidos na análise. Portanto, ter uma análise numérica de lajes em balanço pode definir qual sistema construtivo adotar, quais são os vãos máximos que é possível para cada técnica e qual disposição dos elementos estruturais pode diminuir o consumo de materiais de alto custo.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A pesquisa será delimitada em elementos de superfície em balanço (com bordas engastadas), onde as lajes adjacentes tenham dimensões adequadas para a ancoragem das armaduras negativas conforme recomendações da literatura.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é determinar as dimensões limites dos vãos para lajes maciças e nervuradas e como conceber as lajes adjacentes para proporcionar melhor desempenho na laje em balanço.

1.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- estabelecer valores máximos de esforços para o dimensionamento em função do vão e das lajes adjacentes;
- comparar as taxas de armadura por metro construído;
- verificar os deslocamentos máximos e comparar com os limites prescritos na norma;
- estabelecer qual a influência gerada no elemento quando se tem um variações de dimensões nas lajes adjacentes e no comprimento em balanço.

2 ESTRUTURAS DE CONCRETO

“Concreto é um material de construção proveniente da mistura, em proporção adequada, de: aglomerantes, agregados e água” (PINHEIRO, 2007).

A Norma Brasileira 6118 (2014) define o concreto estrutural como aquilo que se refere ao concreto como material estrutural na integridade de suas aplicações. Além disso, aborda que os elementos estruturais preparados com concreto não contém nenhuma espécie de carcaça e apresentam uma quantidade pequena quando comparada ao determinado para concreto armado.

Figura 1 - Estrutura de concreto armado



(fonte: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural, 2014)

2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS (SUPRA ESTRUTURA)

Segundo ABNT (2014), os elementos estruturais são classificados através de sua geometria e incumbência estrutural, os principais elementos são elementos lineares, subdivididos em vigas, pilares, tirante e arco, elementos de superfície, esses subdividido em placas (lajes), cascas e pilares parede.

2.1.1 Elementos lineares

ABNT (2014), as vigas são elementos tridimensionais, onde duas (base e altura) das suas três dimensões (largura, altura e comprimento) são significativamente inferiores. Predominantemente solicitada à flexão e cisalhamento, mas, dependendo do emprego, pode ser solicitada também a torção. “Vigas: são barras horizontais que delimitam as lajes, suportam

paredes e recebem ações das lajes ou de outras vigas e as transmitem para os apoios” (PINHEIRO, 2007).

Segundo ABNT (2014), os pilares são elementos tridimensionais usualmente com eixo reto e empregados na vertical, onde duas (base e altura) das suas três dimensões (largura, altura e comprimento) são significativamente inferiores. Predominantemente solicitados à compressão. “Pilares: são barras verticais que recebem as ações das vigas ou das lajes e dos andares superiores as transmitem para os elementos inferiores ou para a fundação” (PINHEIRO, 2007). Ainda de acordo com ABNT (2014), os tirantes são elementos tridimensionais usualmente com eixo reto. Predominantemente solicitados à tração. E os arcos são elementos curvilíneos geralmente predominantemente solicitados a compressão e flexão, suas ações geralmente estão em um único plano.

Figura 2 - Elementos lineares, vigas e pilares, com alvenarias em execução



(fonte: Residencial Espelho das Águas, 2014)

2.1.2 Elementos de superfície

ABNT (2014), as lajes são elementos tridimensionais com uma de suas dimensões (espessura) irrisória comparada as outras duas, superfícies planas, onde as ações são predominantemente perpendiculares à superfície.

Segundo Pinheiro (2007), lajes são placas que, além do carregamento invariável, recebem também o desempenho de uso e o transfere para os sustentáculos. Além de deterem os pilares e partilharem os esforços horizontais entre os elementos de contraventamento.

O autor também delimita lajes maciças como

elementos planos, em geral horizontais, com duas dimensões muito maiores que a terceira, sendo esta denominada espessura. A principal função das lajes é receber os carregamentos atuantes no andar, provenientes do uso da construção (pessoas, móveis e equipamentos), e transferi-los para os apoios. Apresenta-se, neste capítulo, o procedimento para o projeto de lajes retangulares maciças de concreto armado, apoiadas sobre vigas ou paredes. Nos edifícios usuais, as lajes maciças têm grande contribuição no consumo de concreto: aproximadamente 50% do total (PINHEIRO, 2007).

Figura 3 - Trabalhadores dispoindo e armando uma laje maciça



(fonte: Atex, 2017)

Sobre laje nervurada, Pinheiro (2007) coloca que “uma laje nervurada é constituída por um conjunto de vigas que se cruzam, solidarizadas pela mesa. Esse elemento estrutural terá comportamento intermediário entre o de laje maciça e o de grelha” (PINHEIRO, 2007).

Pinheiro (2007) ainda aborda que laje nervurada é resultado da eliminação do concreto abaixo das linhas neutras com intuito de reduzir o peso próprio e melhorar o aproveitamento do concreto e do aço. As nervuras têm como função resistir os esforços de tração e o enchimento substituir o concreto sem influenciar na resistência do elemento.

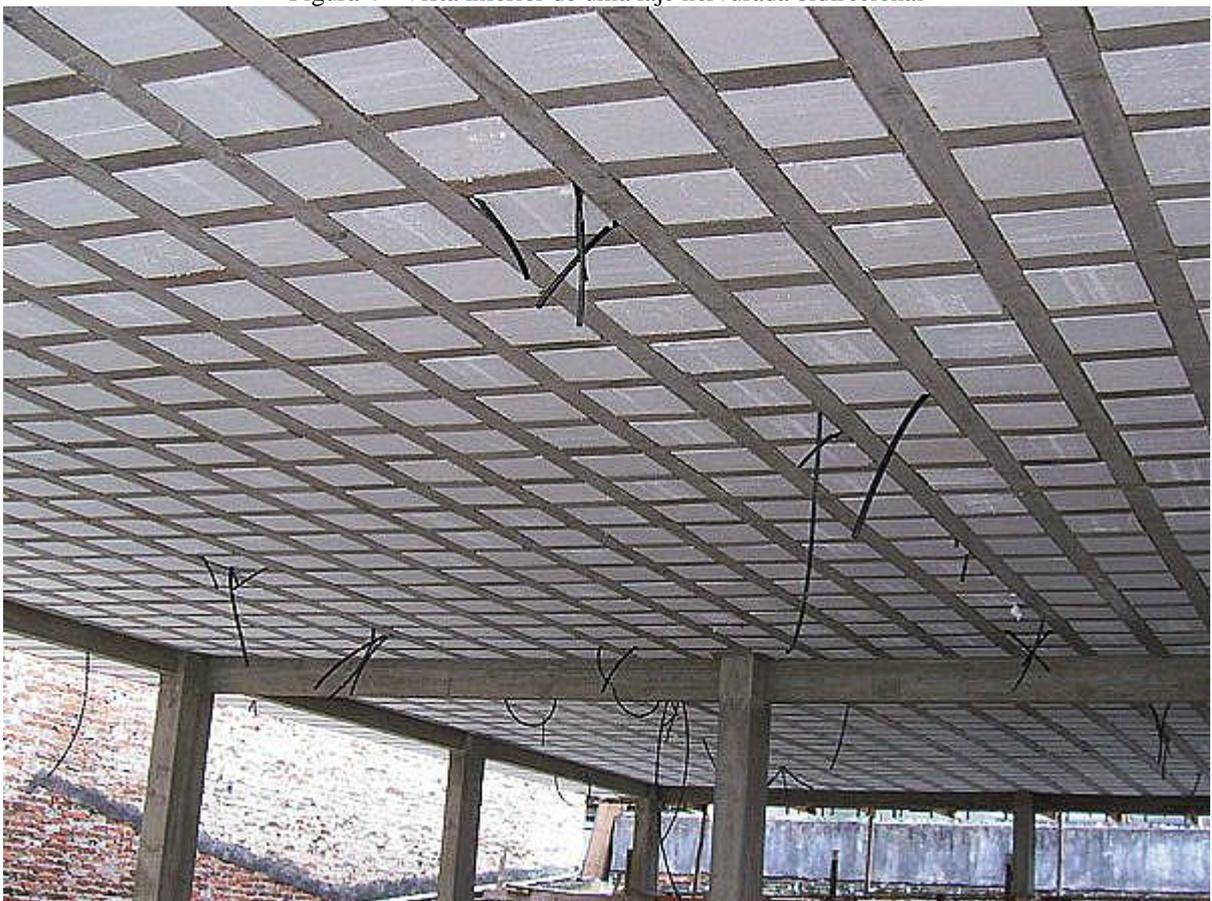
Além disso, de acordo com Pinheiro (2007), quando todas as etapas de execução são realizadas na obra com auxílio de formas, escoramentos, material de enchimento, ou formas no lugar do enchimento são classificadas como moldadas em loco.

Segundo Pinheiro (2007), as lajes nervuradas pré-moldadas são compostas por vigotas moldadas na indústria composta pela armadura positiva parcialmente concretada capaz de resistir o peso próprio quando executada, necessitado apenas de cimbramento, material de enchimento, escoramento e concreto moldado no local.

Pinheiro (2007) também coloca que as lajes lisas acorrem quando são apoiadas diretamente nos pilares, não há vigas. Se forem feitos capitéis nos pilares a laje é denominada laje cogumelo.

“Nas lajes lisas, há casos em que, nos alinhamentos dos pilares, uma determinada faixa é considerada como viga, sendo projetada como tal – são as denominadas vigas-faixa” (PINHEIRO, 2007).

Figura 4 - Vista inferior de uma laje nervurada bidirecional



(fonte: Santos, 2013)

2.2 TIPOS DE CONCRETO

2.2.1 Concreto Armado

Pinheiro (2007) define concreto armado como a combinação de concreto simples e aço que trabalhando simultaneamente tem como função resistir aos esforços, a base da eficiência do concreto armado é a aderência entre os elementos constituintes.

Elementos de concreto armado aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência (ABNT NBR 6118, 2014).

Segundo ABNT (2014), a armadura passiva é qualquer armadura que não seja previamente alongada para produzir forças de protensão.

2.3 ETAPAS DE PROJETO

De acordo com ABNT (2014), as principais etapas de um projeto são: os dimensionamentos, as verificações e os detalhamentos. É a partir da análise estrutural que são estabelecidos os esforços característicos para se iniciar essas etapas de projeto. Nessas etapas são feitas verificações com relação aos estados-limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS) de cada elemento estrutural individualmente e da estrutura como um todo.

ABNT (2014) define o Estado-limite de utilização (ELU), como estado-limite relacionado com a perda da função estrutural, que acarreta a interrupção do uso da edificação. E o Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F), é estado-limite que determina se o elemento estrutural entrou no Estágio II de deformações. Isso acontece quando o elemento atinge ou ultrapassa a tensão máxima de tração na seção transversal.

Ainda segundo ABNT (2014), o Estado-limite de abertura de fissuras (ELS-W), é estado-limite em que o elemento estrutural apresenta aberturas igual ou superior ao estipulado. E o Estado-limites de deformações excessivas (ELS-DEF), é estado-limite em que o elemento estrutural apresenta deslocamentos iguais ao estipulado. Vale ressaltar que os deslocamentos visíveis

em elementos estruturais têm aceitabilidade quando o deslocamento é inferior ao comprimento do elemento por 250.

2.4 MATERIAIS INERTE PARA PREENCHIMENTO

“O material de enchimento deve ser o mais leve possível, mas com resistência suficiente para suportar as operações de execução” (PINHEIRO, 2007).

Segundo Pinheiro (2007), os elementos para enchimento são utilizados nas regiões onde o concreto está solicitado com esforços de tração e os principais tipos de material de enchimento utilizados são: blocos cerâmicos, blocos vazados de concreto, blocos de EPS.

De acordo com Santos e Piana (2011), um dos materiais de preenchimento mais utilizados são os blocos de EPS (poliestireno expandido), conhecidos como isopor.

Segundo NBR (2016), os diversos elementos industrializados constituídos de materiais inertes, com suas diversas formas, são utilizados para reduzir o volume de concreto e o peso da estrutura quando dispostos sobre painéis ou intercalados entre vigotas.

Conforme NBR (2016), os elementos de enchimento tem suas dimensões estabelecidas pelo projetista e com caracterizados pela ruptura frágil.

Figura 5 - Material de enchimento para diminuir os peso próprio da laje



(fonte: Puma Lajes Alveolares, 2018)

2.5 CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

A Norma Brasileira 6118 (2014) aponta que a barbaridade do meio ambiente é relativa às influências físicas e químicas que agem nas estruturas de concreto, autonomamente das influências mecânicas, das variações de volume que possuem derivação térmica, do retraimento hidráulico e outras prenunciadas no dimensionamento de estruturas.

Em projetos de estruturas correntes, ainda segundo a Norma Brasileira 6118 (2014), a agressividade do ecossistema necessita de classificação a partir da Tabela de Classes de agressividade ambiental (CAA) e pode ser avaliada, sucintamente, de acordo com as circunstâncias de exposição da estrutura e suas partes.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a,b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a,c}	Elevado
		Respingo de maré	
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).			
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.			
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

(fonte: NBR 6118, 2014).

Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $D_c = 10$ mm

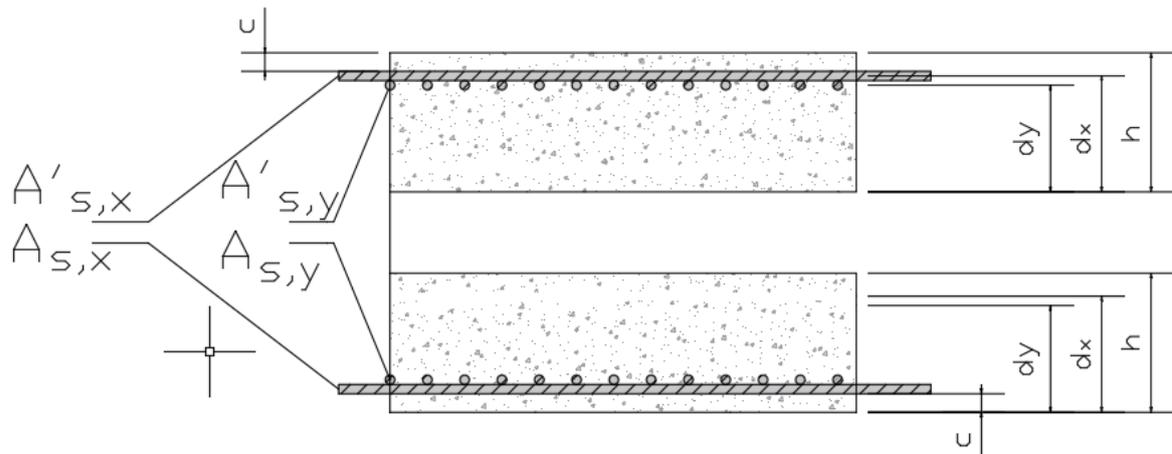
Tipo de estrutura	Componentes ou elementos	Classe de agressividade ambiental (Tabela 1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

(fonte: NBR 6118, 2014)

Segundo ABNT (2014), é responsabilidade do projetista estrutural ter conhecimento do ambiente a qual efetuará o projeto estrutural para determinar a classe de agressividade compatível e a com essas informações determinar os cobrimentos dos elementos estruturais e definir as alturas úteis para o dimensionamento das armaduras.

Figura 6 - Alturas úteis e cobrimento das lajes



(fonte: Do Autor, 2019)

Figura 7 - Espaçadores de lajes garantem os cobrimentos de forma adequada



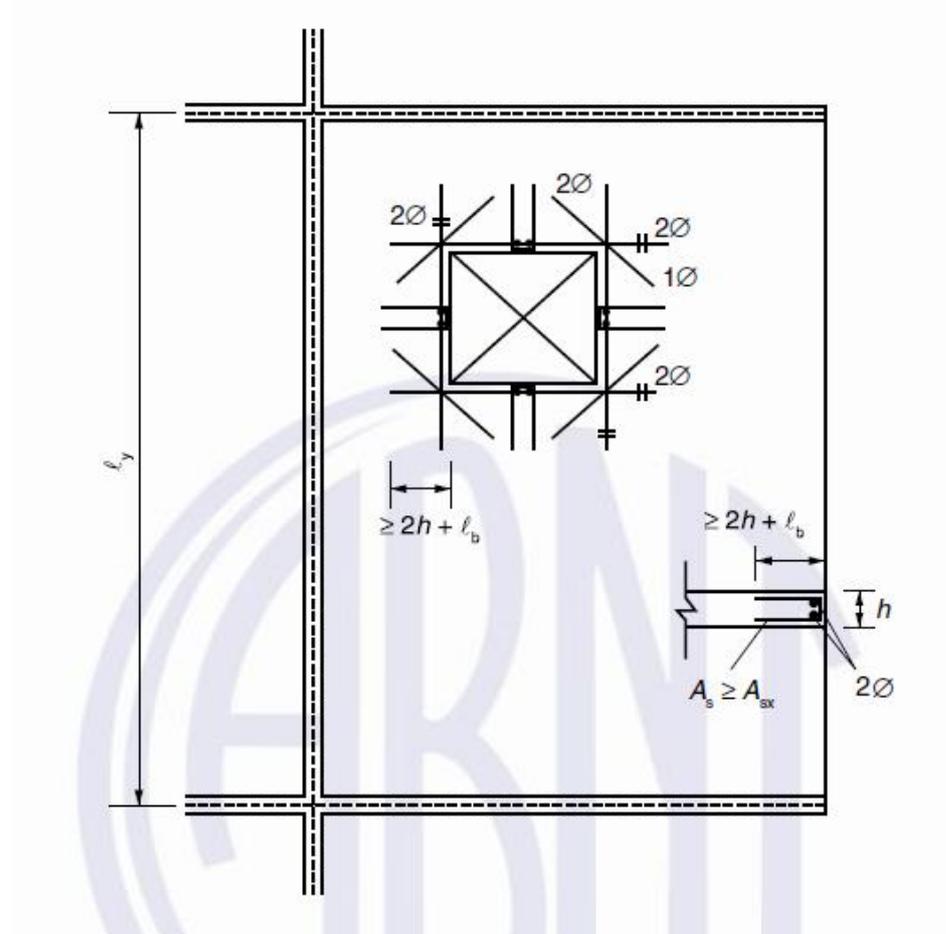
(fonte: Juruel Plásticos, 2019)

2.6 ARMADURAS COMPLEMENTARES

De acordo com a Norma Brasileira 6118 (2014), as bordas livres e as faces das lajes maciças conjuntamente às aberturas precisam ser apropriadamente protegidas por armaduras transversais e longitudinais. Os detalhes representativos recomendados para armadura

complementar são indicativos e necessitam de apropriação para cada circunstância, levando em consideração a dimensão e o posicionamento das aberturas, o carregamento empregado nas lajes e a quantidade de barras que são interrompidas pelas aberturas.

Figura 3 - Disposição das armaduras para lajes sem vigas



(fonte: ABNT, 2014)

2.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Um carregamento, segundo a Norma Brasileira 6118 (2014), pode ser considerado uma combinação de ações que possuem probabilidades não desprezíveis de trabalharem sincronicamente na estrutura, no decorrer de um tempo predeterminado. A combinação de ações precisa ser construída de maneira que permita determinar os resultados mais desvantajoso para a estrutura. Além disso, a conferência da segurança quanto aos estados-limites últimos e aos

estados-limites de serviços deve ser exercida segundo as combinações últimas e combinações de serviço, na devida ordem.

2.7.1 Combinações últimas normais

A Norma Brasileira 6118 (2014) coloca que em cada combinação é necessário incluir as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

2.7.2 Quase permanentes

As combinações quase permanentes, de acordo com a Norma Brasileira 6118 (2014), podem agir no decorrer de grande parte do período de vida da estrutura e sua consideração pode ser indispensável na verificação do estado-limite de deformações excessivas.

Segundo a Norma Brasileira 6118 (2014), “nas combinações quase permanentes (CQP) de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_{2j}F_{qi,k}$ ” (NBR 6118, 2014).

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_{2j}F_{qi,k}$$

Onde,

$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;

$F_{gi,k}$ é o valor característico das ações variáveis principais diretas;

ψ_{2j} é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

2.8 ANÁLISE ESTRUTURAL

De acordo com ABNT (2014), para efetuar um projeto a análise da estrutura pode ser diferenciada pelo comportamento dos materiais quando estão associados sem esquecer de cada limitação dos materiais.

2.8.1 Análise linear:

Admite-se comportamento elástico-linear para os materiais.

Na análise global, as características geométricas podem ser determinadas pela seção bruta de concreto dos elementos estruturais. Em análises locais para cálculo dos deslocamentos, na eventualidade da fissuração, esta deve ser considerada (ABNT, 2014).

2.8.2 Análise linear com redistribuição:

De acordo com a ABNT (2014)

Na análise linear com redistribuição, os efeitos das ações, determinados em uma análise linear, são redistribuídos na estrutura, para as combinações de carregamento do ELU. Nesse caso, as condições de equilíbrio e de ductilidade devem ser obrigatoriamente satisfeitas. Todos os esforços internos devem ser recalculados, de modo a garantir o equilíbrio de cada um dos elementos estruturais e da estrutura como um todo. Os efeitos de redistribuição devem ser considerados em todos os aspectos do projeto estrutural, inclusive nas condições de ancoragem e corte de armaduras e nas forças a ancorar (ABNT, 2014).

A ABNT (2014) ainda aborda que a análise estrutural é denominada plástica quando as não linearidades puderem ser consideradas, admitindo-se materiais de comportamento rígido-plástico perfeito ou elastoplástico perfeito. Este tipo de análise deve ser usado apenas para verificações de ELU.

2.8.3 Análise não linear:

Segundo ABNT (2014), deve levar em consideração o comportamento não linear geométrico e de materiais na análise não linear. Além disso, é necessário que toda a geometria da estrutura, bem como todas as suas armaduras sejam conhecidas para que a análise não linear consiga ser efetuada, visto que a resposta da estrutura deriva de como ela foi armada.

[...] existem dois principais fatores que geram o comportamento não linear de uma estrutura à medida que o carregamento é aplicado:

- Alteração nas propriedades dos materiais que compõem a estrutura, designada “não-linearidade física” (NFL).
- Alteração da geometria da estrutura, designada “não-linearidade geométrica” (NLG).

[...] ambas, NFL e NFG, geram uma resposta desproporcional da estrutura à medida que um carregamento é aplicado (KIMURA, 2007).

Segundo Kimura (2007), a não-linearidade física é inerente do material concreto armado, além de ser não-linear, no concreto a fissuração entra como mais um fator que corrobora a não linearidade, e através de uma modelagem e análise de uma edificação de concreto armado com a NLF e NLG a estrutura apresenta resultados mais próximos ao real, o que influencia diretamente nos resultados obtidos para deslocamentos e solicitações. E como

arquiteticamente cada vez mais necessita-se de elementos mais esbeltos, usar essa metodologia para a ser preponderante.

Ainda de acordo com Kimura (2007), “análise em segunda ordem” é fazer estudar o equilíbrio de uma estrutura na sua posição deformada. E suas consequências, tais como deslocamentos e esforços resultantes são denominadas de “efeitos de 2ª ordem”.

2.8.4 Análise através de modelos físicos:

A ABNT (2014) aponta que

Na análise através de modelos físicos, o comportamento estrutural é determinado a partir de ensaios realizados com modelos físicos de concreto, considerando os critérios de semelhança mecânica. A metodologia empregada nos experimentos deve assegurar a possibilidade de obter a correta interpretação dos resultados (ABNT, 2014).

2.8.5 Análise plástica:

De acordo com ABNT (2014), a análise estrutural pode ser considerada plástica quando as não linearidades forem consideradas, reconhecendo materiais de comportamento rígido-plástico perfeito ou elastoplástico perfeito. Esta espécie de análise tem de ser utilizada somente para verificações de ELU.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados todos os parâmetros necessários para o desenvolvimento do projeto, juntamente com o tratamento necessário para o desenvolver dos protótipos para as análises computacionais, os softwares utilizados para o cálculo estrutural, para obter e tratar os resultados.

3.1 TIPOLOGIA DE PESQUISA

O projeto é de natureza descritiva no que diz respeito aos objetivos. No que diz respeito aos resultados, a pesquisa é quantitativa, pois será feito um comparativo entre os consumos de insumos, esforços e deformações de duas tecnologias empregadas para a execução de um elemento estrutural, valores que serão obtidos a partir dos cálculos realizados em um software de dimensionamento de concreto armado, chamado CypeCad.

O concreto utilizado será o C30 usinado a rigor, o aço das armaduras positivas e negativas das lajes, pilares e vigas será o CA-50. O material de enchimento adotado será o EPS (isopor). Inicialmente, foi estabelecido uma planta de forma para a estrutura (Figura 8) e estabelecido as variações das dimensões das lajes em balanço e das lajes adjacentes (Quadro 1). Para a criação dos pórticos foi feita a locação dos pilares um em cada encontro de viga, as vigas foram inseridas apenas no contorno das lajes adjacentes e nas bordas livre das lajes em balanço foram inseridas vigas de borda livre com a mesma espessura da laje.

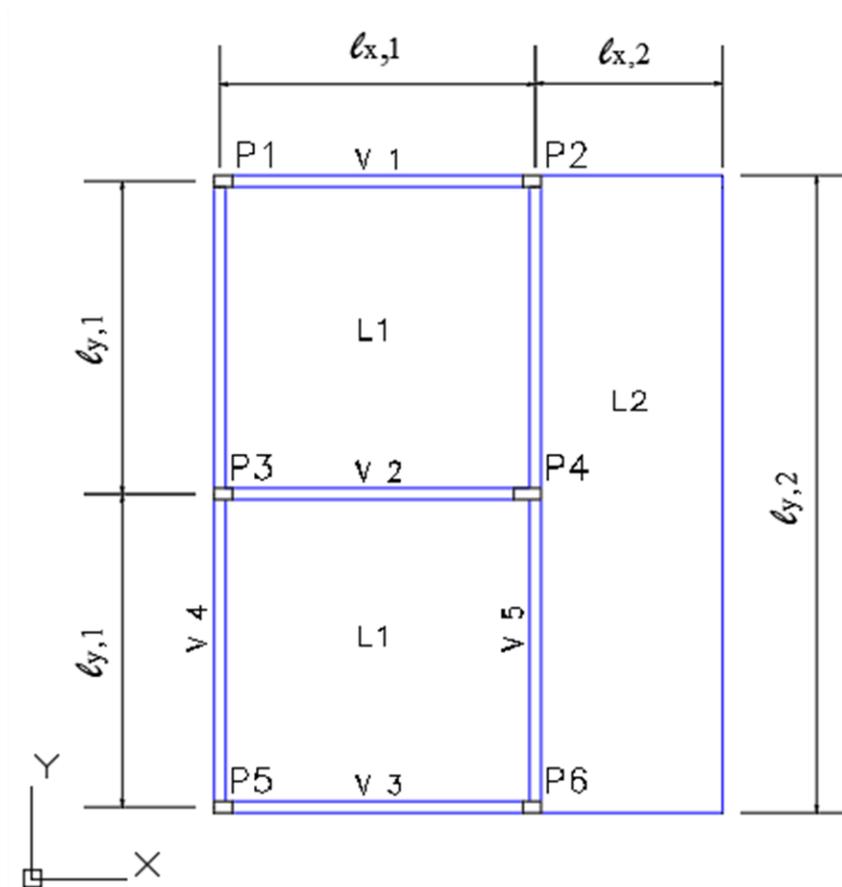
Foram feitos dois pavimentos por pórtico para manter a continuidade dos pilares e rigidez próxima ao real de uma vigas.

Quadro 1 – Dimensões para elaboração das lajes maciça e nervurada

L1 - laje adjacente		L2 - laje em balanço		
Dimensão	Variação	Dimensão		Variação
$\ell_{x,1}$ de 4,00 m a 6,00 m	1,00 m	$\ell_{x,2}$	de 1,50 m 4,00 m	0,50 m
$\ell_{y,1}$ de 4,00 m a 6,00 m	1,00 m	$\ell_{y,2}$	2 vezes $\ell_{y,1}$	0,50 m

(fonte: Do autor, 2019)

Figura 8 – Planta de forma genérica da estrutura



(fonte: Do autor, 2019)

Será feito o dimensionamento dos pórticos com 2 tipos de lajes, lajes maciças e lajes nervuradas moldadas no local com EPS. O preenchimento, EPS, foi arbitrado por ser o material de peso específico baixo e por ser muito utilizado nas edificações. Com as variações nas dimensões das lajes foram desenvolvidos 108 pórticos, 54 com laje maciça e 54 com laje nervurada.

3.2 ESPESSURA DAS LAJES

Segundo Pinheiro (2007), a altura estimada para lajes maciça pode ser determinada pela equação:

$$\text{dest} = \frac{l}{\psi_2 \psi_3} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

l é a menor dimensão das lajes;

ψ_2 e ψ_3 são parâmetros tabelados. ψ_2 é 1,80 e 0,5, respectivamente, para a laje com duas bordas apoiadas e duas engastadas e a laje em balanço, para todos os casos de lajes ψ_3 tem valores de 17 e 25, respectivamente, para as lajes nervuradas e maciça.

Pelas equações, as espessuras das lajes maciças ficaram no intervalo de 9 a 32 cm e as nervuradas 20 à 47. Como o peso próprio das estruturas são o tipo de carregamento que mais afeta as dimensões dos elementos onde as lajes apoiam são adotados valores específicos para todas as lajes maciças e todas as lajes nervuradas. As seguintes dimensões foram adotadas:

- 15 cm para as lajes maciças;
- 35 para as lajes nervuras.

Nas lajes nervuradas a dimensão adotada é de 30 cm nas duas direções, pois o λ da laje é 1 para diversos casos ou está sempre próximo e é a dimensão comercialmente com mais saída. O capeamento será adotado 7,5 centímetros (mínimo + diâmetro de um eletroduto).

3.3 NERVURAS DAS LAJES

As nervuras das lajes foram adotadas bidirecionais, com distância entre seus eixos de 40 centímetros, nervura de 10 centímetros, o material de enchimentos tem em projeção as dimensões 30 cm x 30 cm e altura de 27,5 cm, capeamento de 7,5 cm (cobrimento mínimo mais o diâmetro de um eletroduto de 1 pol.) totalizando uma altura total de 35 cm de laje.

3.4 DIMENSÕES DAS VIGAS E PILARES

“A seção transversal de pilares e pilares-parede maciços, qualquer que seja a sua forma, não pode apresentar dimensão menor que 19 cm” (ABNT, 2014).

Foram adotados pilares com 19 cm na menor dimensão para aproveitar as dimensões comerciais de madeiras para forma. A outra dimensão será de 30 centímetros para diminuir os momentos positivos, com exceções dos pilares que não verificarem os estados limites, ou 40, caso não atenda as verificações normativas.

“A altura tramos externos ou vigas biapoiadas: $h_{\text{est}} = l_0/10$ ” (PINHEIRO, 2007).

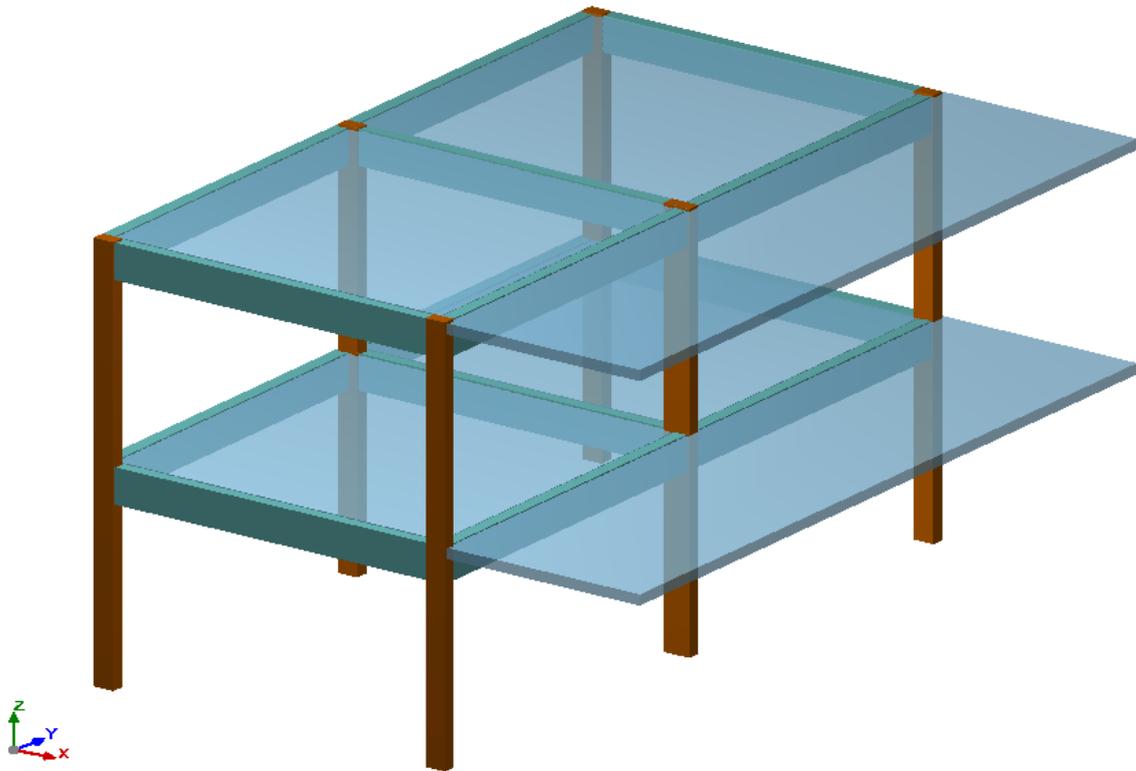
A base das vigas são de 19 centímetros para apoiar nos pilares e a altura de 50 para os pórticos com vigas com comprimento entre 4 e 5 metros. As de 6 metros serão de 60 cm.

Figura 9 – Visão 3D de um pórtico genérico de laje nervurada



(fonte: Do autor, 2019)

Figura 10 – Visão 3D de um pórtico genérico de laje maciça



(fonte: Do autor, 2019)

3.5 CARREGAMENTOS

Foram considerados os seguintes carregamentos: peso próprio da estrutura, carga permanente correspondente ao peso de paredes, sobrecarga de utilização, carga permanente correspondente a revestimento argamassado do teto, contrapiso e revestimento e carga permanente para parapeito. “Ao longo dos parapeitos e balcões devem ser consideradas aplicadas uma carga horizontal de 0,8 kN/m na altura do corrimão e uma carga vertical mínima de 2kN/m” (ABNT, 2014).

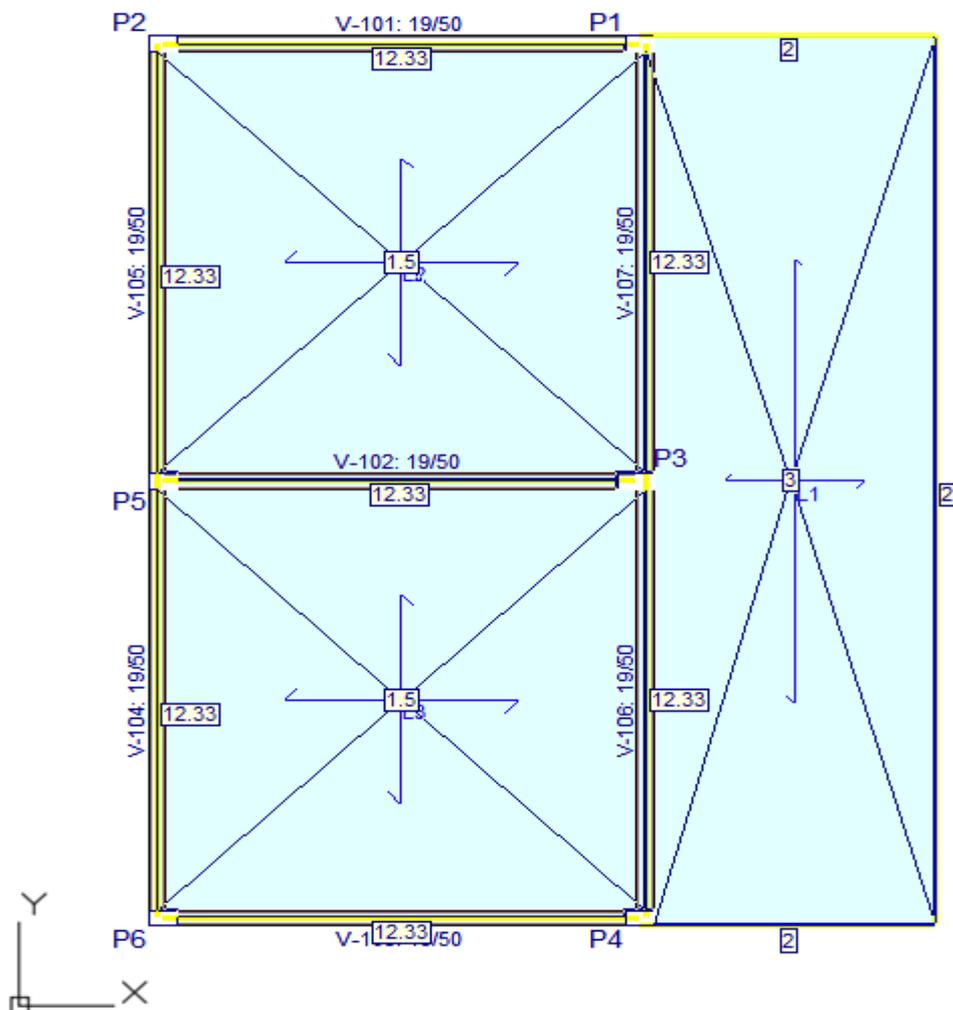
Segundo ABNT (1980), as cargas de utilização para edifícios residenciais estão entre 1,5 kN/m² e 2,0 kN/m², já os terraços com acesso ao público tem 3,0 kN/m².

As cargas adotadas foram:

- Sobrecarga das lajes adjacente (dormitório, ou sala, ou copa, ou cozinha ou banheiro), 1,5 kN/m²;
- sobrecarga da laje em balanço, 3,0 kN/m²;
- peso de paredes (tijolo 19x19x29), 12,325 kN/m;
- carga vertical, 2kN/m.

A carga do peso próprio da estrutura de concreto armado, os revestimentos argamassados e revestimento cerâmico não aparece nos carregamentos abaixo.

Figura 11 – Planta de forma da estrutura com carregamento



(fonte: Do autor, 2019)

3.6 TRATAMENTOS DOS DADOS

O cálculo foi realizado pelo software CYPECAD, na versão 2017, na entrada de dados é possível escolher as normas para serem utilizadas nas verificações, foi adotada a norma de projeto de estrutura de concreto ABNT 6118 (2014) para serem feitas as verificações. Foi calculada apenas a supraestrutura de cada planta de forma, pois não serão analisados ou comparados os efeitos na infraestrutura (fundação). A princípio os dados coletados serão: deslocamentos máximo das lajes em balanço da combinação quase permanente e serão comparados com os limites máximos, momentos fletores nas direções principais das regiões com maiores taxas de aço (negativos e positivos), quantidade de aço para a execução das lajes adjacentes e as em balanço e as taxas de aço por metro quadrado de laje executada e o máximo balanço possível de ser executado com as dimensões especificadas em itens anteriores.

Com relação a todos os parâmetros citados acima, serão analisados conforme o comportamento das lajes quando alterada a dimensão do balanço para cada laje adjacente adotada e para cada balanço quando você altera a laje adjacente. E serão feitos comparativos entre as lajes maciças e nervuradas para determinar qual técnica tem melhor desempenho com relação aos esforços e deformações.

Após determinar a melhor planta de forma, será feito o levantamento das principais composições e insumos para a execução duas lajes, uma maciça e nervurada, e, com auxílio dos bancos de dados de composições para orçamento, será estabelecido o custo aproximado de cada laje para definir qual técnica é mais econômica.

4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

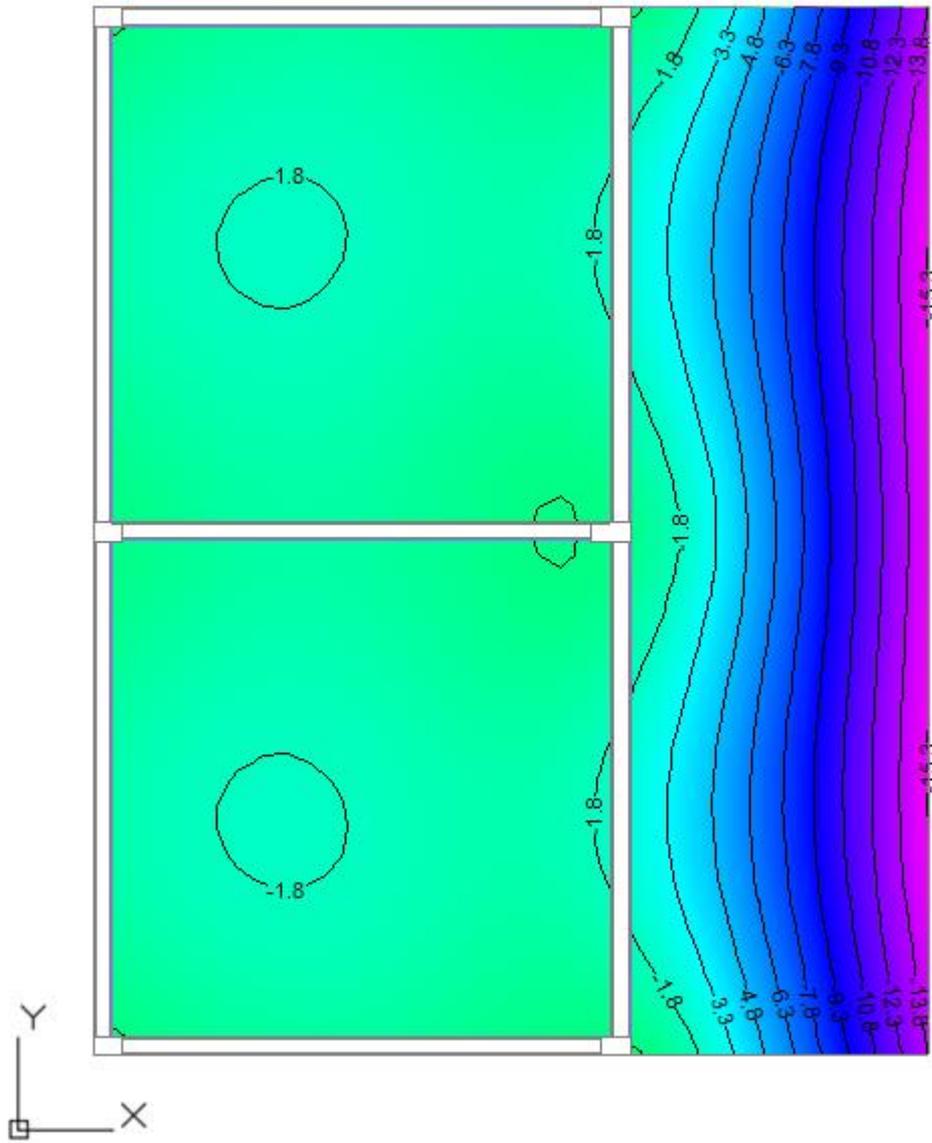
4.1 COMPRIMENTOS MÁXIMO DOS BALNÇOS

Para este estudo, foram realizadas 108 plantas de formas, com variação de balanço de 1,50m e 4,00m, para serem dimensionadas. Dessas 108, 54 são feitas com lajes maciças e nervuradas. A partir disso, percebeu-se que não foi possível de serem calculados os casos em que a laje maciça continha o balanço de 3,50m e 4,00m.

4.2 DEFORMAÇÕES

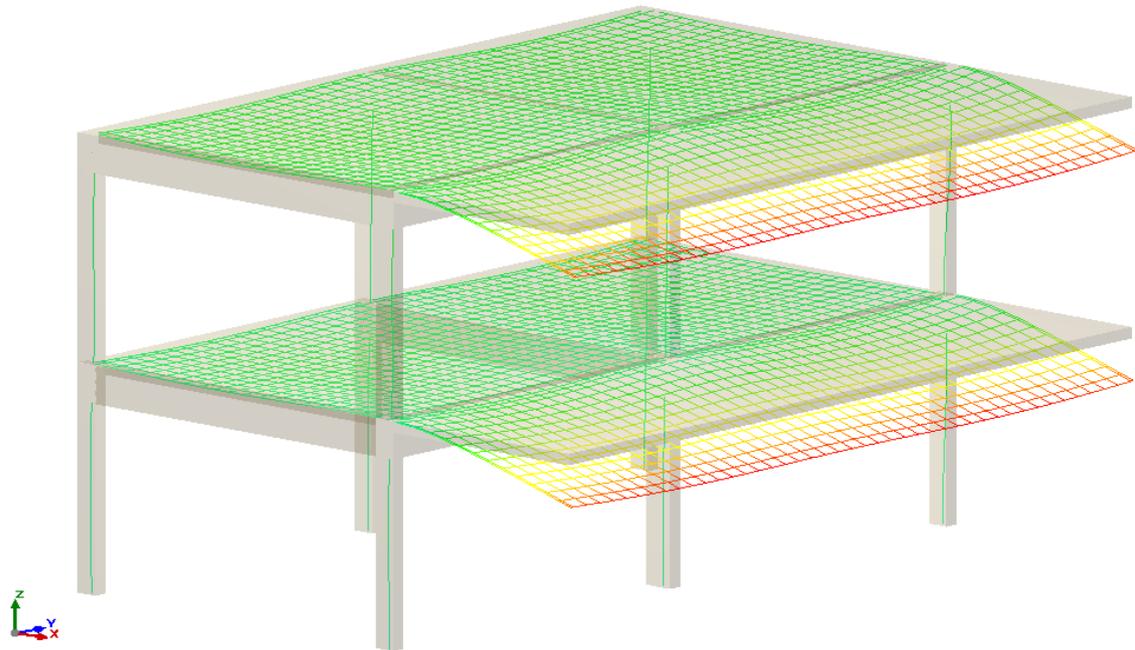
Os deslocamentos das estruturas foram obtidos a partir da planta de forma da estrutura com isovalores para os deslocamentos (Figura 12), com todos os pórticos apresentando a mesma configuração de deformação visto através dos isovalores. Se imaginarmos um corte na direção “y”, pode-se perceber que a região central fica com uma concavidade para baixo e apresenta um deslocamento e ao afastar dessa região o deslocamento aumenta, se trocar a concavidade e chegar próximo as bordas o deslocamento diminui e a concavidade também é alterada. Além das curvas de isovalores foi possível ver o pórtico completo na forma deformada (Figura 13).

Figura 12 – Planta de forma genérica com isovalores de deslocamento direção z – CQP (mm)



(fonte: Do autor, 2019)

Figura 13 – Planta de forma genérica com deformada – CQP (Fator de aumento: 50)



(fonte: Do autor, 2019)

A partir dos dados coletados dos pórticos projetados dos quadros (Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4) foram criados gráficos para melhor interpretação destes dados, disponíveis nos gráficos 1, 2 e 3.

Quadro 2 – Deslocamento das lajes macias e nervuradas com 4 metros na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 4,00 m		Lajes adjacente 5,00 m x 4,00 m		Lajes adjacente 6,00 m x 4,00 m	
NERVURADA		NERVURADA		NERVURADA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	0,62	1,50	0,40	1,50	0,10
2,00	1,11	2,00	0,70	2,00	0,20
2,50	2,02	2,50	1,73	2,50	0,90
3,00	3,51	3,00	3,22	3,00	2,73
3,50	5,72	3,50	5,47	3,50	5,35
4,00	8,70	4,00	9,13	4,00	8,37

Lajes adjacente 4,00 m x 4,00 m		Lajes adjacente 5,00 m x 4,00 m		Lajes adjacente 6,00 m x 4,00 m	
MACIÇA		MACIÇA		MACIÇA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	2,63	1,50	2,00	1,50	1,80
2,00	6,20	2,00	5,48	2,00	5,65
2,50	12,50	2,50	11,89	2,50	12,36
3,00	23,17	3,00	22,61	3,00	23,52
3,50	-	3,50	-	3,50	-
4,00	-	4,00	-	4,00	-

(fonte: Do autor, 2019)

Quadro 3 – Deslocamento das lajes macias e nervuradas com 5 metros na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 5,00 m		Lajes adjacente 5,00 m x 5,00 m		Lajes adjacente 6,00 m x 5,00 m	
NERVURADA		NERVURADA		NERVURADA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	1,01	1,50	0,80	1,50	0,40
2,00	1,54	2,00	1,30	2,00	0,90
2,50	2,51	2,50	2,25	2,50	1,50
3,00	4,08	3,00	3,82	3,00	3,32
3,50	6,41	3,50	6,02	3,50	5,87
4,00	9,57	4,00	9,28	4,00	8,95
MACIÇA		MACIÇA		MACIÇA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	4,02	1,50	3,00	1,50	2,40
2,00	7,66	2,00	6,93	2,00	4,50
2,50	14,58	2,50	13,85	2,50	12,88
3,00	25,95	3,00	25,28	3,00	24,27
3,50	-	3,50	-	3,50	-
4,00	-	4,00	-	4,00	-

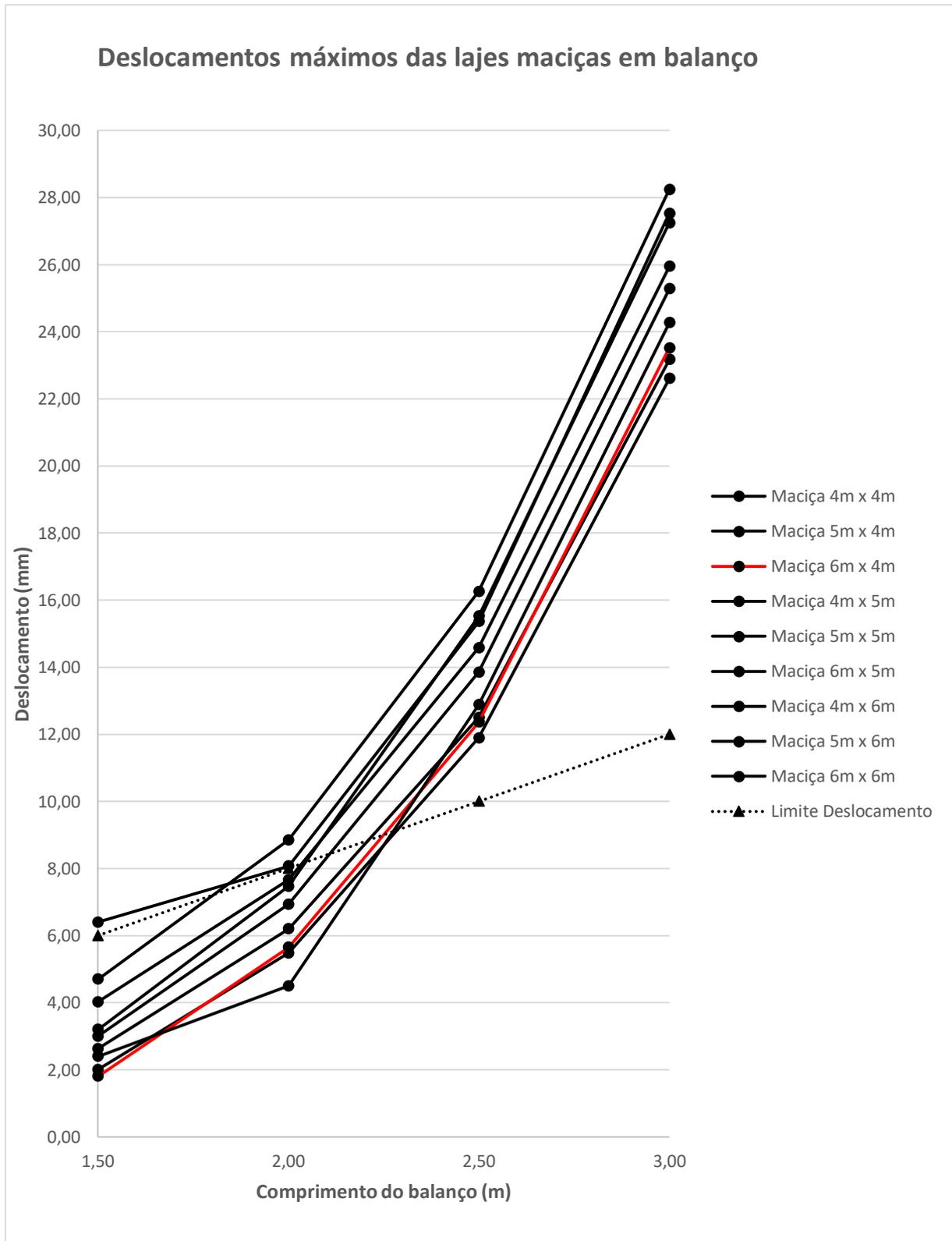
(fonte: Do autor, 2019)

Quadro 4 – Deslocamento das lajes macias e nervuradas com 6 metros na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 6,00 m		Lajes adjacente 5,00 m x 6,00 m		Lajes adjacente 6,00 m x 6,00 m	
NERVURADA		NERVURADA		NERVURADA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	1,45	1,50	1,42	1,50	1,20
2,00	2,02	2,00	1,90	2,00	1,40
2,50	3,02	2,50	2,78	2,50	2,36
3,00	4,64	3,00	4,36	3,00	3,95
3,50	7,06	3,50	6,75	3,50	6,35
4,00	10,31	4,00	9,98	4,00	10,13
MACIÇA		MACIÇA		MACIÇA	
Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)	Balanço (m)	Deslocamento (mm)
1,50	4,70	1,50	6,40	1,50	3,20
2,00	8,85	2,00	8,07	2,00	7,47
2,50	16,26	2,50	15,36	2,50	15,52
3,00	28,24	3,00	27,53	3,00	27,25
3,50	-	3,50	-	3,50	-
4,00	-	4,00	-	4,00	-

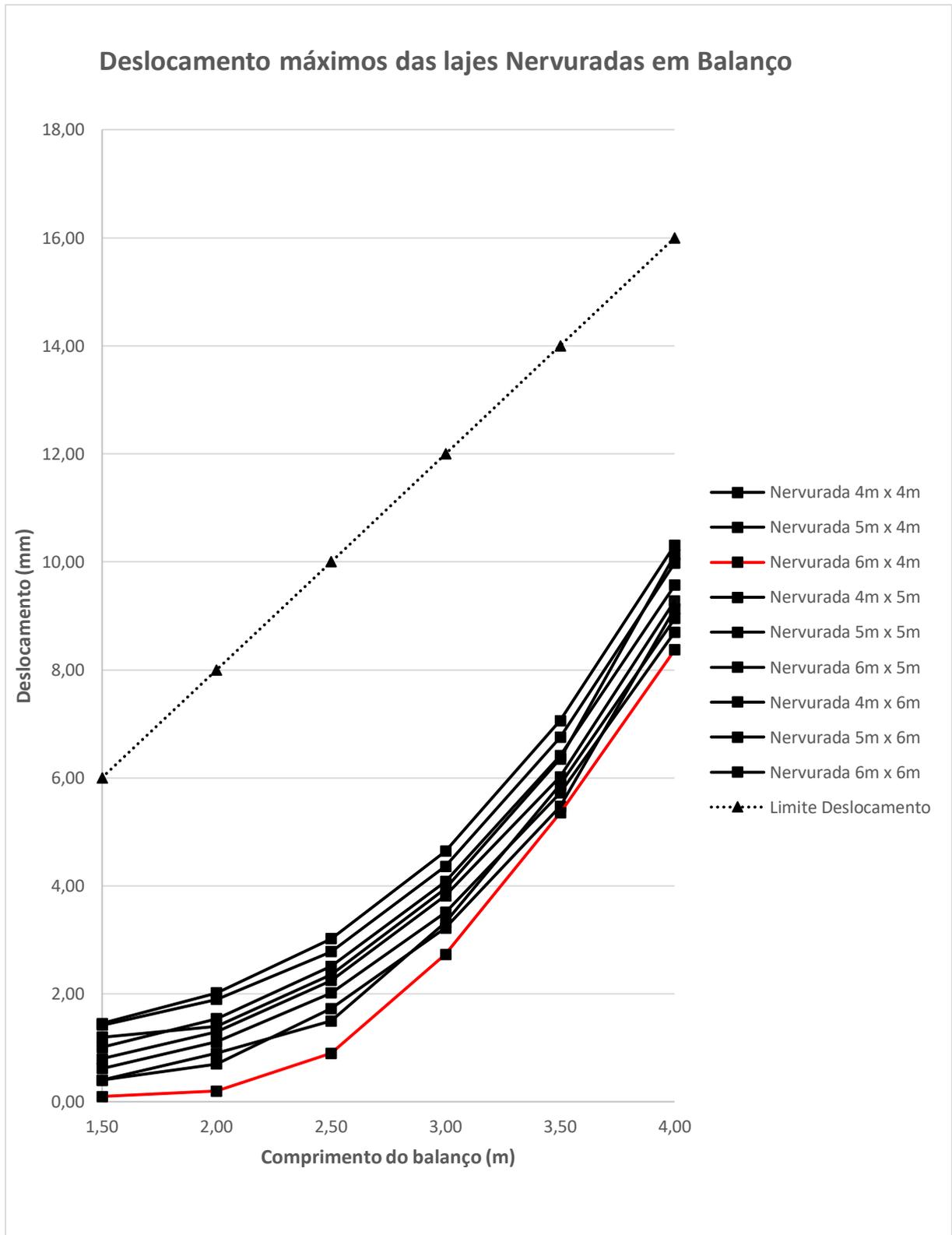
(fonte: Do autor, 2019)

Gráfico 1 – Deslocamento Máximos das Lajes Maciças em Balanço



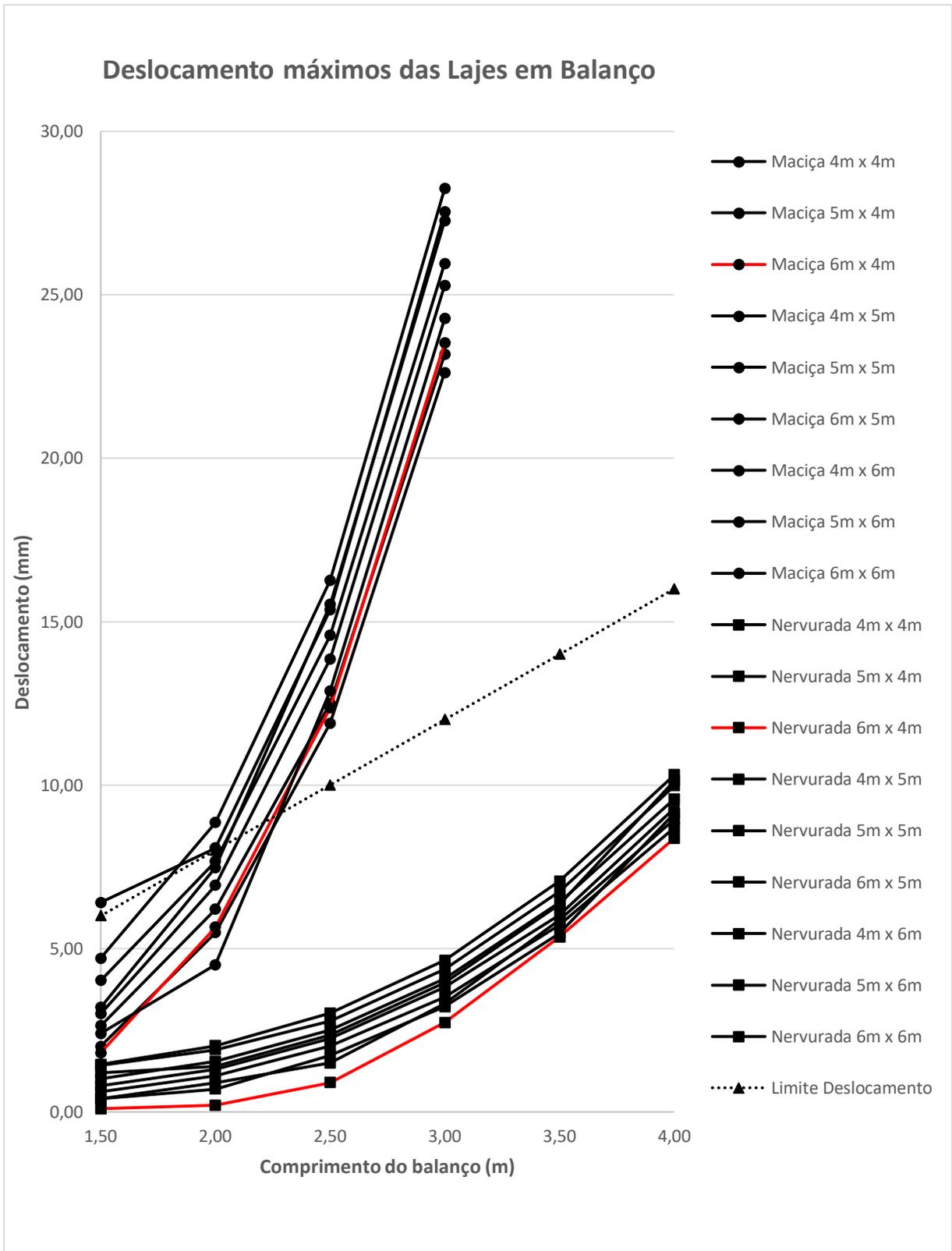
(fonte: Do autor, 2019)

Gráfico 2 – Deslocamento Máximos das Lajes Nervuradas em Balanço



(fonte: Do autor, 2019)

Grafico 3 – Deslocamento Máximos das Lajes em Balanço



(fonte: Do autor, 2019)

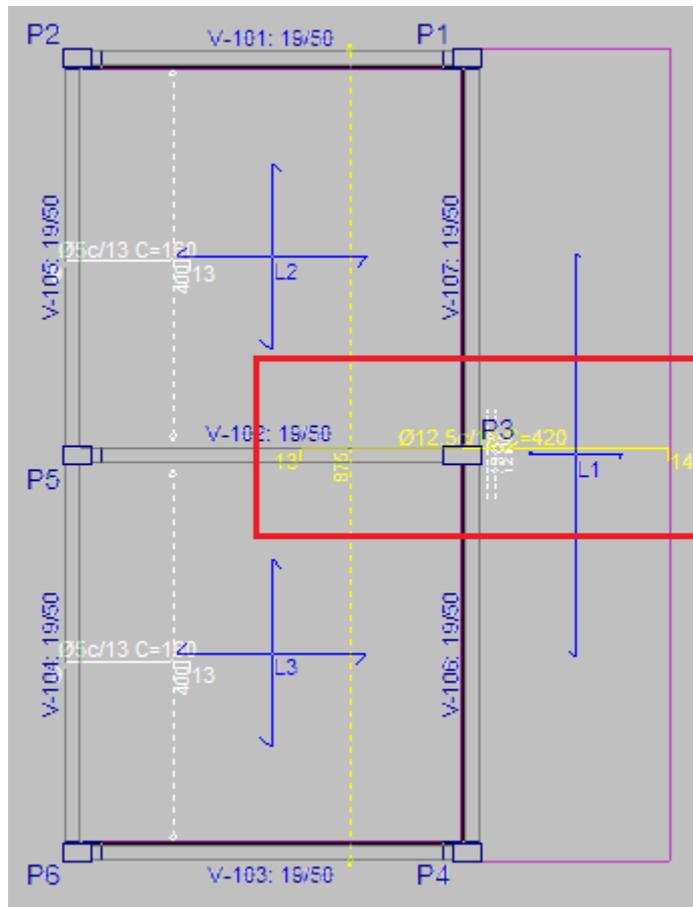
A primeira análise feita foi com relação ao deslocamentos máximos, onde viu-se que apenas casos de laje maciça tem deslocamentos que ultrapassam os permitidos. Dos 21 casos que ultrapassaram, há apenas 1 caso em balanço de 1,50 m e 2 casos com balanço de 2,00 m. Os outros 18 casos estão divididos entre os balanços de 2,50 m e 3,00 m e representa 100% dos pórticos de laje maciça analisados com essas dimensões. Já as lajes nervuradas não apresentaram deslocamentos que ultrapassassem os limites.

Foi visto que as lajes com menor comprimento na direção “y” apresentam menores deslocamentos e que mantendo uma dimensão constante nessa direção e aumentando a dimensão na direção “x”, os deslocamentos também diminuía. De forma geral, com o aumento do comprimento do balanço os deslocamentos da região central das lajes adjacentes diminuem e da mesma forma quando é analisado um comprimento de balanço constante, o aumento dos comprimentos da laje na direção “x” (sentido do balanço) proporciona o mesmo efeito.

4.3 ESFORÇOS DE DIMENSIONAMENTO

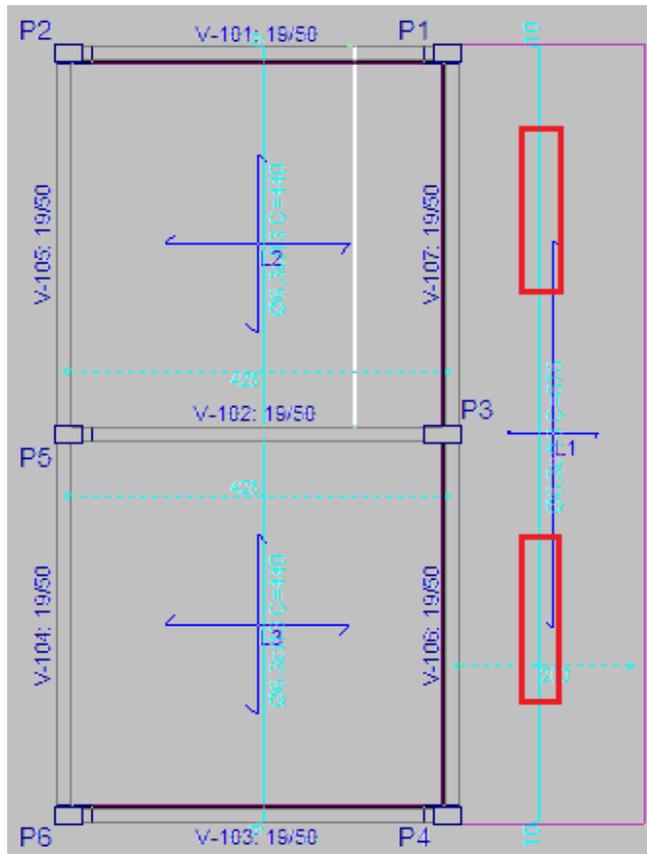
Os esforços mais relevantes na laje em balanço estão na região de ligação entre essa e as lajes adjacentes e, por isso, possuem maior concentração de aço estrutural. A partir desse conceito foi visto para cada pórtico a região com mais concentração de armadura e com maiores bitolas para determinar onde estavam os máximos esforços (Figura 14 e Figura 15).

Figura 14 – Planta de forma com armadura negativa devidos aos momentos na direção x



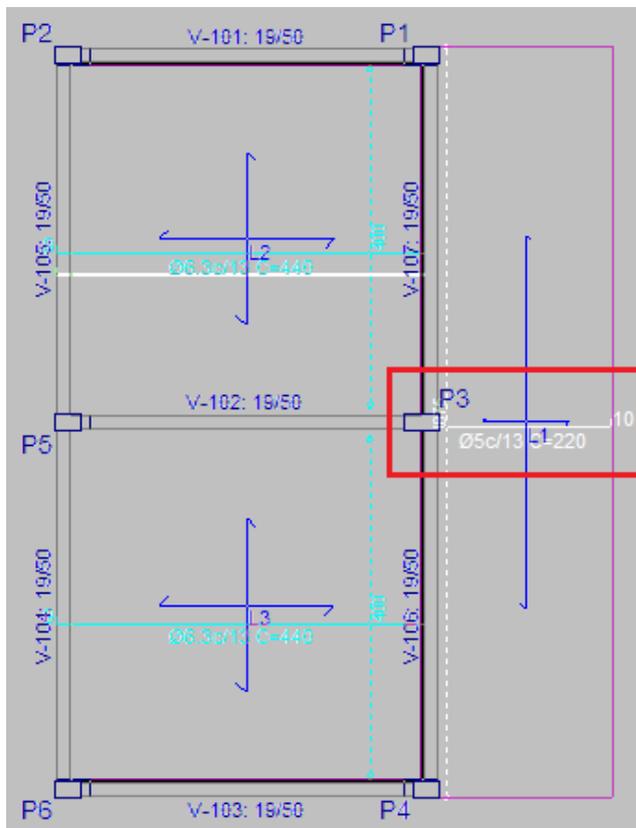
(fonte: Do autor, 2019)

Figura 16 - Planta de forma com armadura positiva devidos aos momentos na direção y



(fonte: Do autor, 2019)

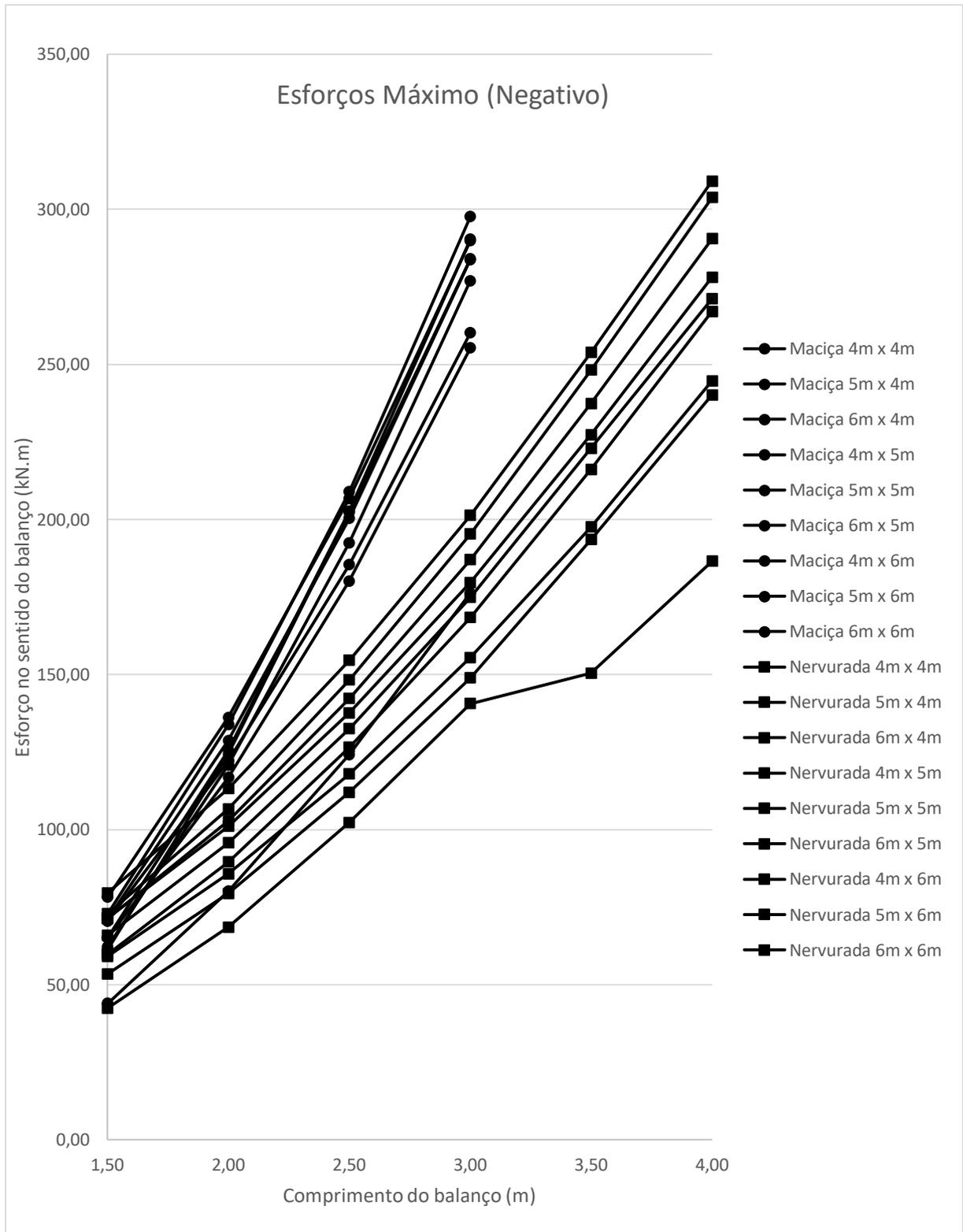
Figura 17 - Planta de forma com armadura positiva de distribuição



(fonte: Do autor, 2019)

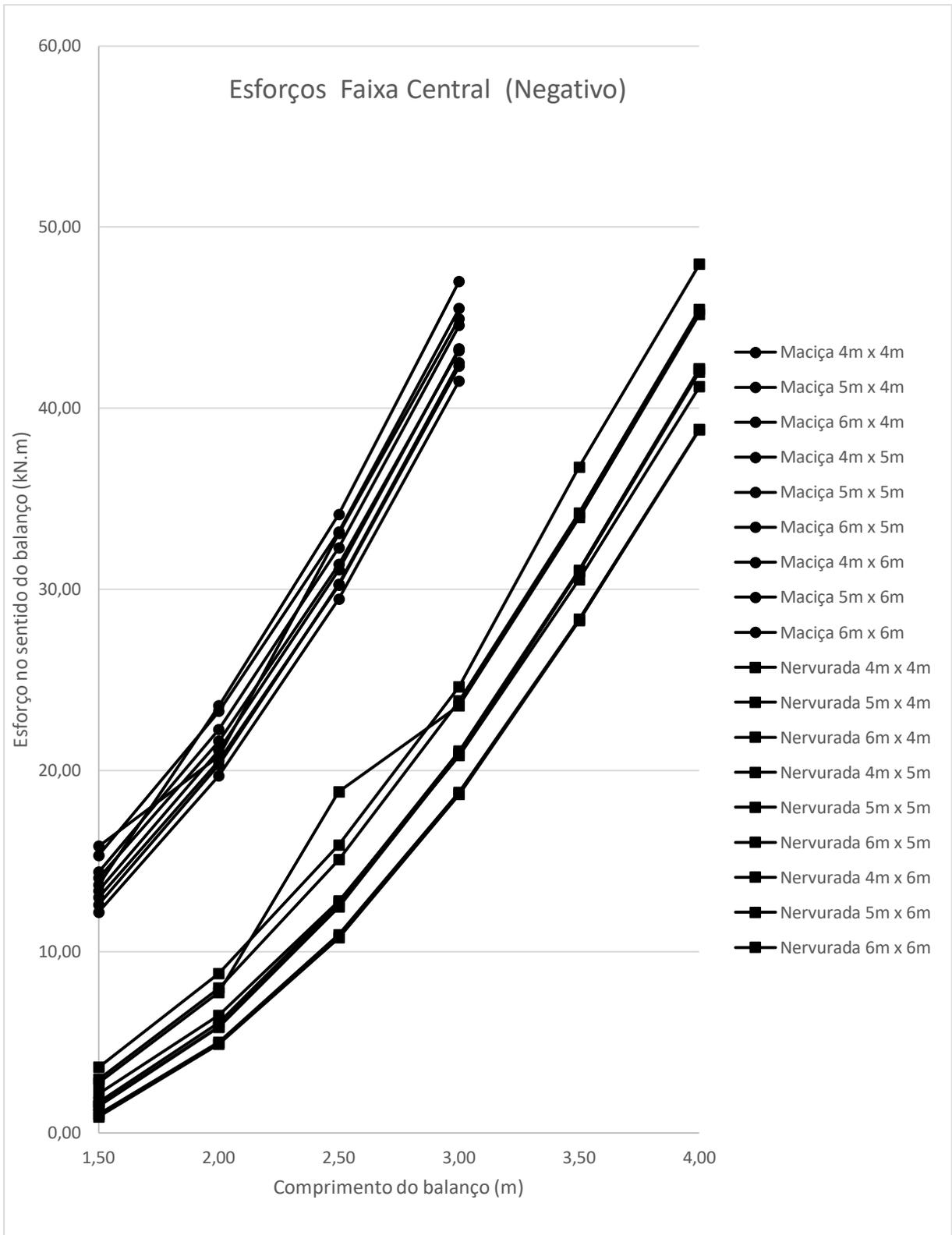
Foi elaborada uma coleta de dados de tabelas fornecidas pelo software, a partir das regiões de maiores tensões e, então, foram esboçados gráficos (Gráfico 4, Gráfico 5, Gráfico 6 e Gráfico 7) para melhor interpretação dos dados coletados.

Grafico 4 – Esforços Máximos das Lajes em Balanço



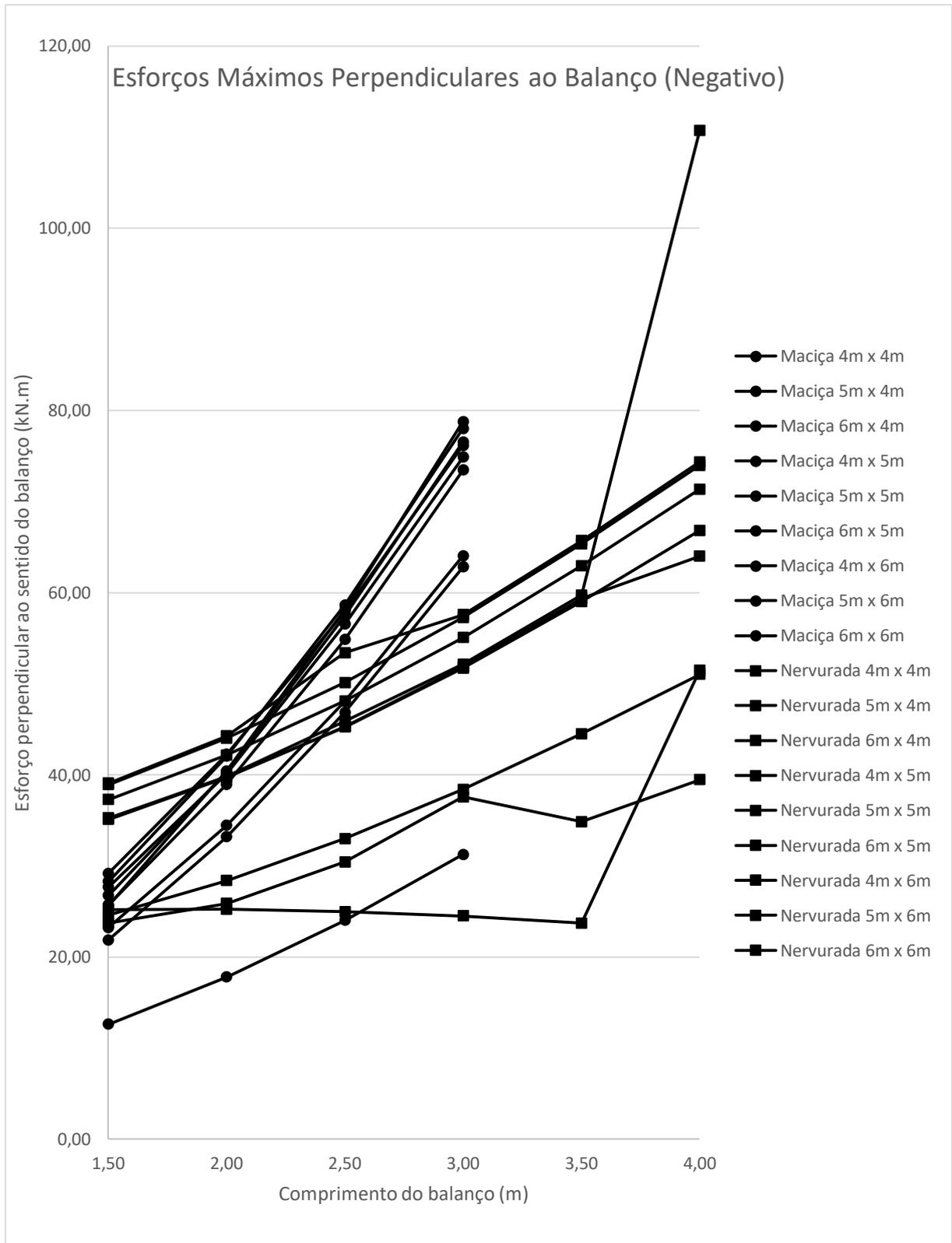
(fonte: Do autor, 2019)

Grafico 5 – Esforços na Faixa Intermediária Entre a Laje Adjacente e a Laje em Balanço



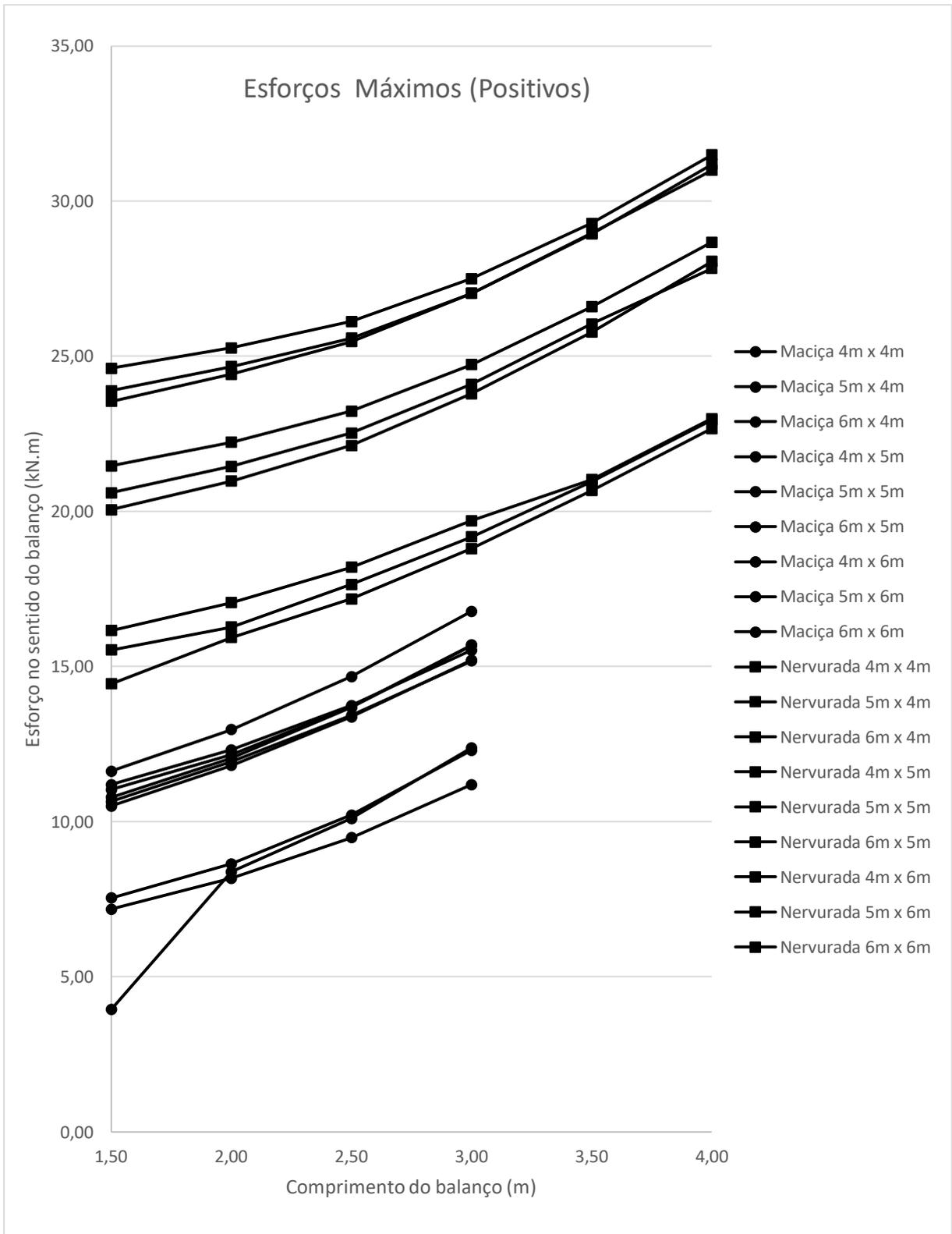
(fonte: Do autor, 2019)

Grafico 6 – Esforços Máximos Perpendiculares ao Sentido do Balanço



(fonte: Do autor, 2019)

Grafico 7 – Esforços Máximos Positivos



(fonte: Do autor, 2019)

Os gráficos de esforços apresentam características muito semelhantes a uma curva polinomial do segundo grau, exceto alguns casos em que, por algum fator não analisado nos estudos, a curva fugiu um pouco do padrão obtido. Isso ocorre no Gráfico 4, na curva que apresenta os menores esforços (Laje adjacente de 4,00 m x 6,00 m); no Gráfico 6, nas lajes de 4,00 m x 4,00 m e 4,00 m x 5,00 m; e no Gráfico 7, na laje 4,00 m x 4,00 m.

A partir dos gráficos, é possível fazer diversas interpretações, inclusive muitas delas similares as feitas anteriormente com relação aos deslocamentos das lajes, em que todas as lajes nervuradas apresentam valores menores de esforços máximos.

Seguindo o mesmo raciocínio, as lajes com menores dimensões na direção “y” apresentam melhor desempenho, conseqüentemente, as que tem um aumento da laje adjacente na direção “x”, diminuirão os esforços.

As discrepâncias, citadas anteriormente nos gráficos, podem ser justificadas pelo fato de que os pontos que fugiram da resta apresentam algumas características. Em um dos casos, os dois fatores que proporcionam diminuição dos esforços no balanço. No outro caso, o balanço possui as mesmas dimensões que as lajes adjacentes na direção “x” e, portanto, as mesmas massas apoiadas na viga e a outra em balanço, um acréscimo no balanço poderia acarretar a ineficiência da laje.

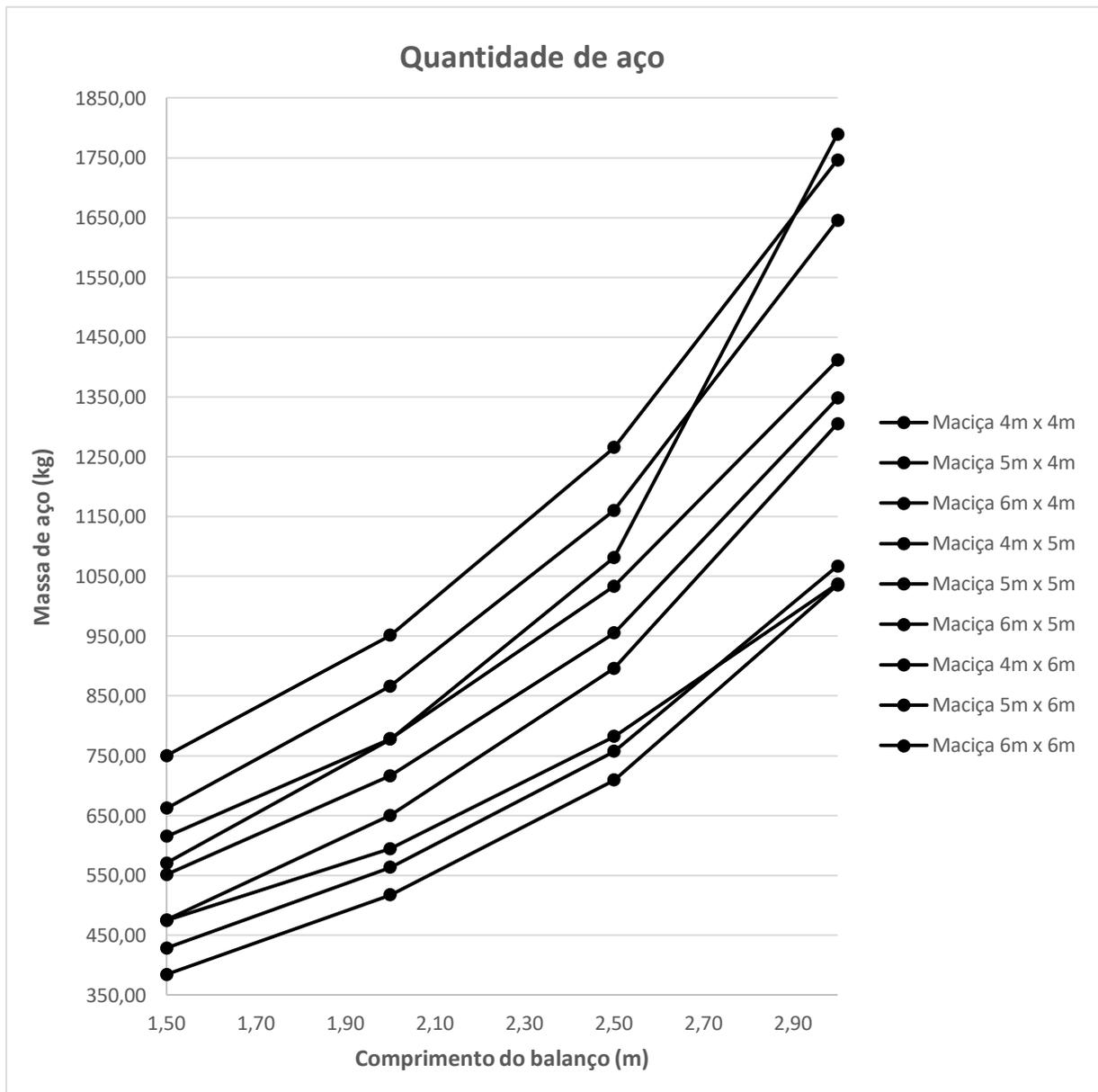
Esforços na faixa central têm comportamentos diferentes, os menores esforços foram notados quando as lajes tinham maiores dimensões nas duas direções, principalmente na direção “y”. As lajes nervuradas tiveram menores valores para todos os casos. Mas, se analisarmos o percentual de redução do máximo para o trecho intermediário, é possível ver que nas lajes maciças o percentual fica próximo em comprimentos menores de balanço, entretanto com o aumento do balanço diminuem e tendem a valores constantes. Já as nervuradas apresentam valores menores na região central e a taxa de redução aumenta com o aumento do balanço. Essa maior redução nos esforços explica o fato das lajes nervuradas terem os maiores valores de momentos positivos, onde qualquer pórtico criado em laje maciça tem esforços positivos menores que todas as laje nervuradas.

Na faixa perpendicular ao balanço temos esforços menores nas lajes maciças para todos os balanços de 1,50 m e, na maioria dos casos com 2,00 m, uma faixa intermediária com 2,50 metros, tendendo a uma inversão de 100% com 3 metros.

4.4 CONSUMO E TAXA DE AÇO

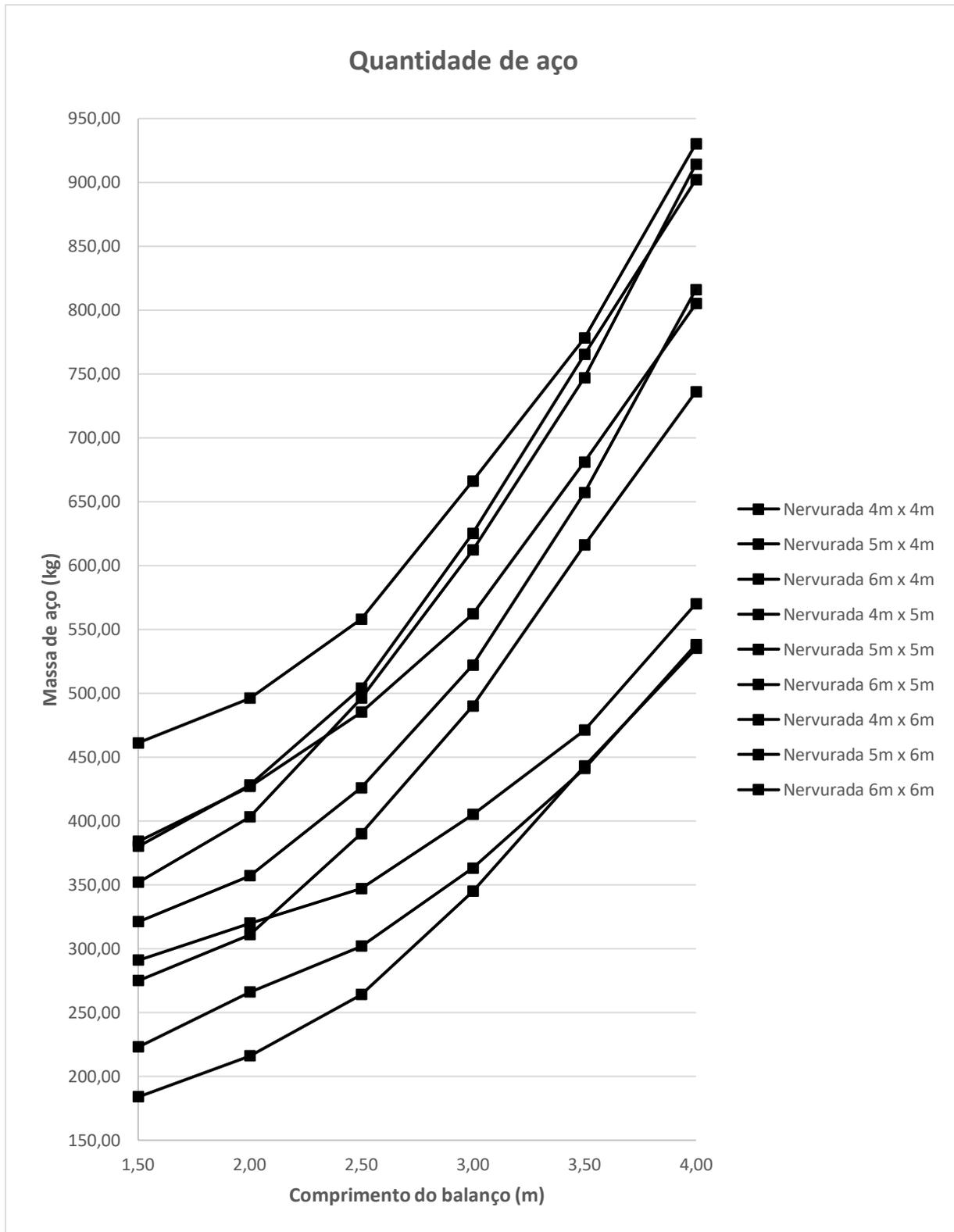
Como os maiores esforços foram localizados na faixa de transição da laje em balanço com a adjacente, acabam interferindo nos consumos de aços (Gráfico 8) para as todas as lajes, além da área construída. Portanto, é necessário analisar cada formato de laje individualmente e todas com as taxas de consumo de aço por metro quadrado (Gráfico 9) construído.

Gráfico 8 – Quantidade de Aço Lajes Maciças



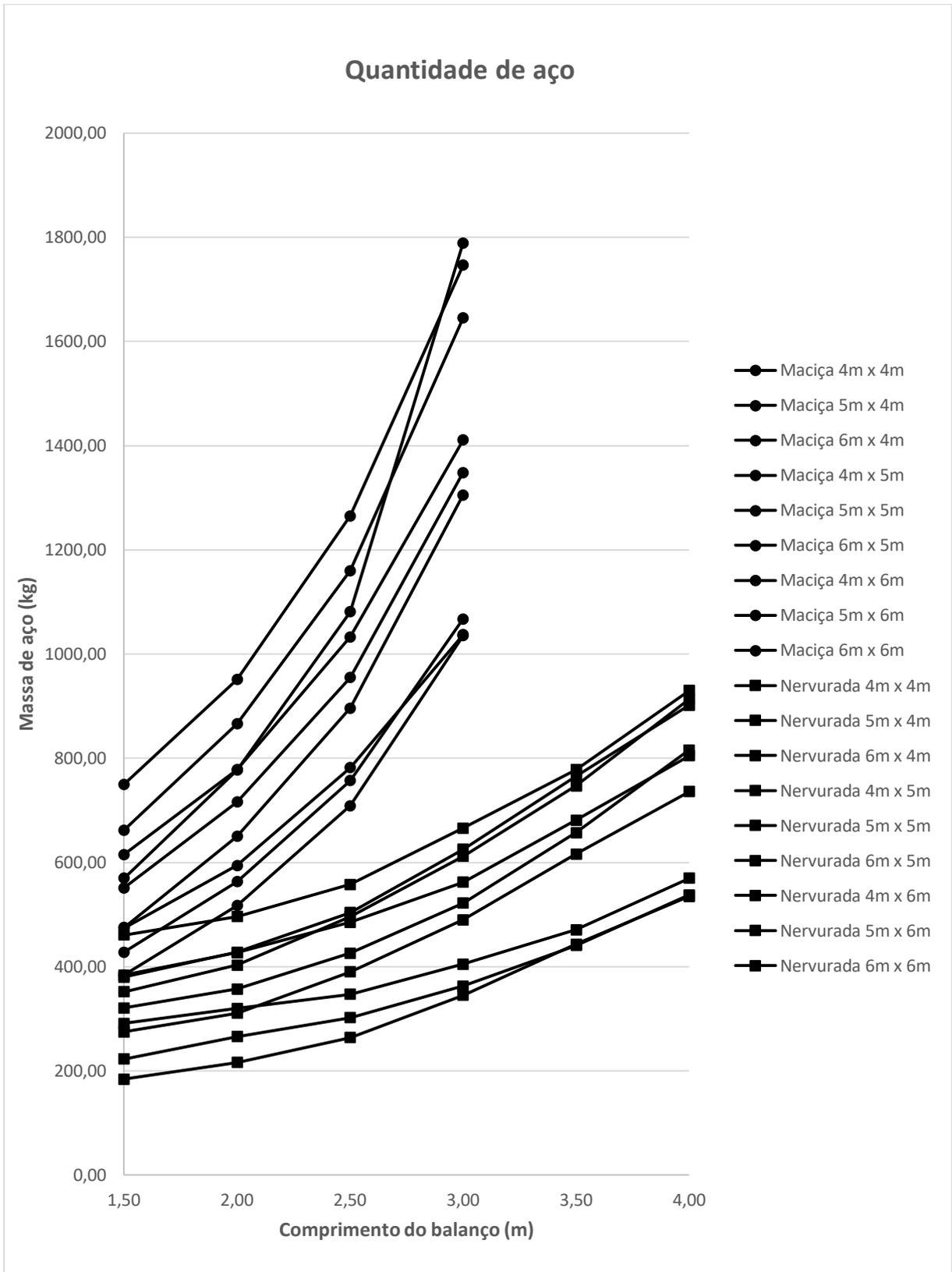
(fonte: Do autor, 2019)

Gráfico 9 – Quantidade de Aço Lajes Nervuradas



(fonte: Do autor, 2019)

Grafico 10 – Quantidade de Aço Lajes



(fonte: Do autor, 2019)

Quadro 5 – Quantidade e taxa de aço por metro quadrado das laje com 4,00 m na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 4,00 m			Lajes adjacente 5,00 m x 4,00 m			Lajes adjacente 6,00 m x 4,00 m		
NERVURADA			NERVURADA			NERVURADA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	184,00	7,94	1,50	223,00	7,80	1,50	291,00	7,89
2,00	216,00	7,92	2,00	266,00	7,84	2,00	320,00	7,85
2,50	264,00	8,21	2,50	302,00	7,90	2,50	347,00	7,79
3,00	345,00	8,97	3,00	363,00	8,33	3,00	405,00	8,15
3,50	443,00	9,71	3,50	441,00	8,95	3,50	471,00	8,88
4,00	535,00	10,41	4,00	538,00	9,76	4,00	570,00	9,66
MACIÇA			MACIÇA			MACIÇA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	384,00	12,00	1,50	428,00	11,46	1,50	474,00	11,94
2,00	517,00	13,44	2,00	563,00	12,80	2,00	594,00	12,97
2,50	709,00	15,87	2,50	757,00	15,07	2,50	782,00	14,70
3,00	1035,00	20,13	3,00	1067,00	18,87	3,00	1037,00	17,19
3,50	-	-	3,50	-	-	3,50	-	-
4,00	-	-	4,00	-	-	4,00	-	-

(fonte: Do autor, 2019)

Quadro 6 – Quantidade e taxa de aço por metro quadrado das laje com 5,00 m na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 5,00 m			Lajes adjacente 5,00 m x 5,00 m			Lajes adjacente 6,00 m x 5,00 m		
NERVURADA			NERVURADA			NERVURADA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	275,00	8,12	1,50	321,00	7,90	1,50	384,00	7,80
2,00	311,00	8,02	2,00	357,00	7,84	2,00	427,00	7,84
2,50	390,00	8,67	2,50	426,00	8,20	2,50	485,00	8,04
3,00	490,00	9,39	3,00	522,00	8,86	3,00	562,00	8,48
3,50	616,00	10,33	3,50	657,00	9,86	3,50	681,00	9,25
4,00	736,00	11,04	4,00	816,00	10,98	4,00	805,00	10,12
MACIÇA			MACIÇA			MACIÇA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	475,00	12,01	1,50	551,00	12,13	1,50	615,00	12,57
2,00	650,00	13,84	2,00	716,00	13,36	2,00	778,00	13,48
2,50	896,00	16,54	2,50	955,00	15,75	2,50	1033,00	15,62
3,00	1305,00	21,03	3,00	1348,00	19,56	3,00	1411,00	18,68
3,50	-	-	3,50	-	-	3,50	-	-
4,00	-	-	4,00	-	-	4,00	-	-

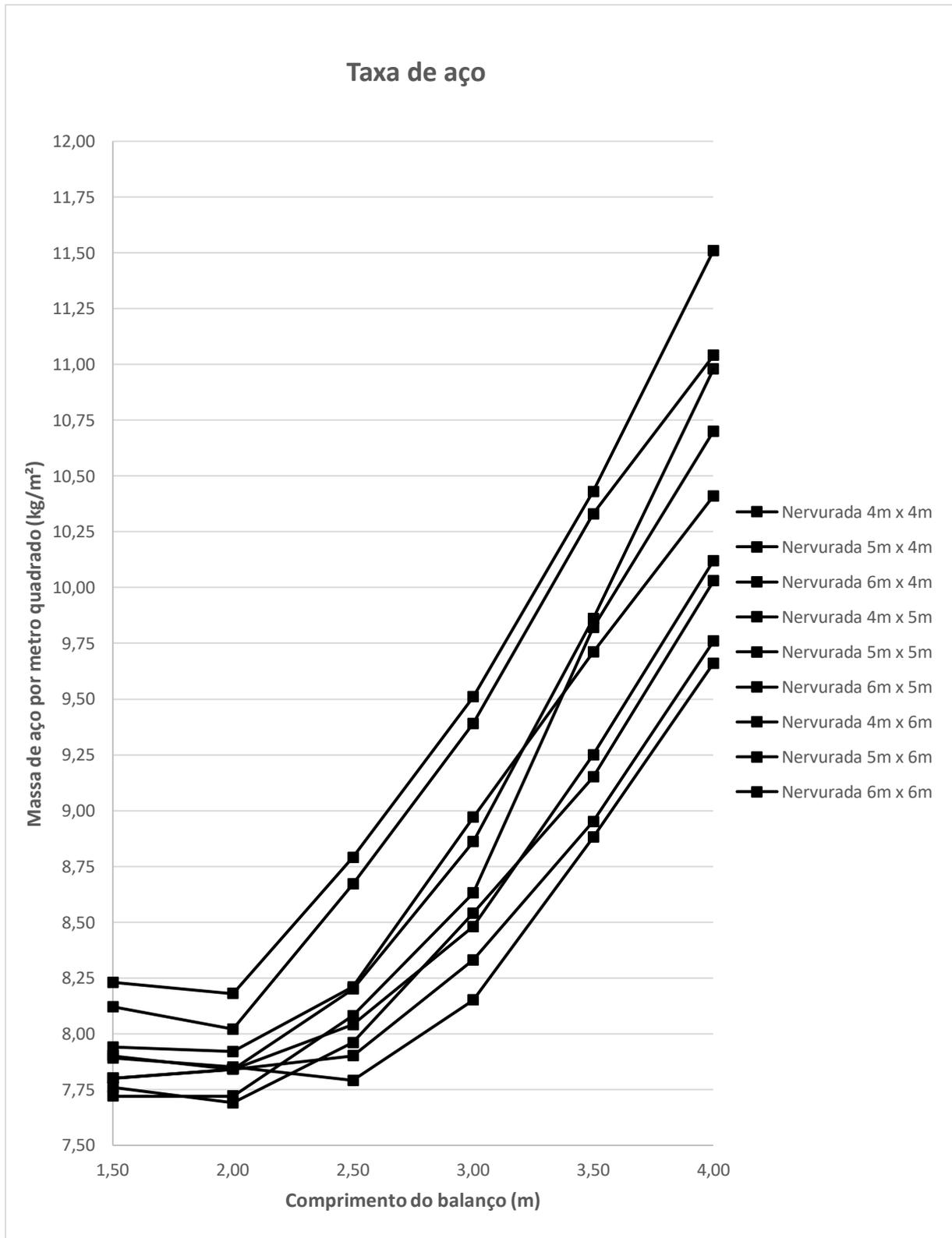
(fonte: Do autor, 2019)

Quadro 7 – Quantidade e taxa de aço por metro quadrado das laje com 4,00 m na direção y

Lajes adjacente 4,00 m x 6,00 m			Lajes adjacente 5,00 m x 6,00 m			Lajes adjacente 6,00 m x 6,00 m		
NERVURADA			NERVURADA			NERVURADA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	352,00	8,23	1,50	380,00	7,72	1,50	461,00	7,76
2,00	403,00	8,18	2,00	428,00	7,72	2,00	496,00	7,69
2,50	496,00	8,79	2,50	504,00	8,08	2,50	558,00	7,96
3,00	612,00	9,51	3,00	625,00	8,63	3,00	666,00	8,54
3,50	747,00	10,43	3,50	765,00	9,82	3,50	778,00	9,15
4,00	914,00	11,51	4,00	902,00	10,70	4,00	930,00	10,03
MACIÇA			MACIÇA			MACIÇA		
Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)	Balanço (m)	Aço (kg)	Aço (kg/m ²)
1,50	570,00	12,72	1,50	662,00	15,30	1,50	750,00	11,44
2,00	777,00	14,63	2,00	866,00	14,73	2,00	951,00	12,77
2,50	1081,00	17,56	2,50	1160,00	17,31	2,50	1265,00	14,98
3,00	1789,00	24,94	3,00	1645,00	21,59	3,00	1746,00	18,55
3,50	-	-	3,50	-	-	3,50	-	-
4,00	-	-	4,00	-	-	4,00	-	-

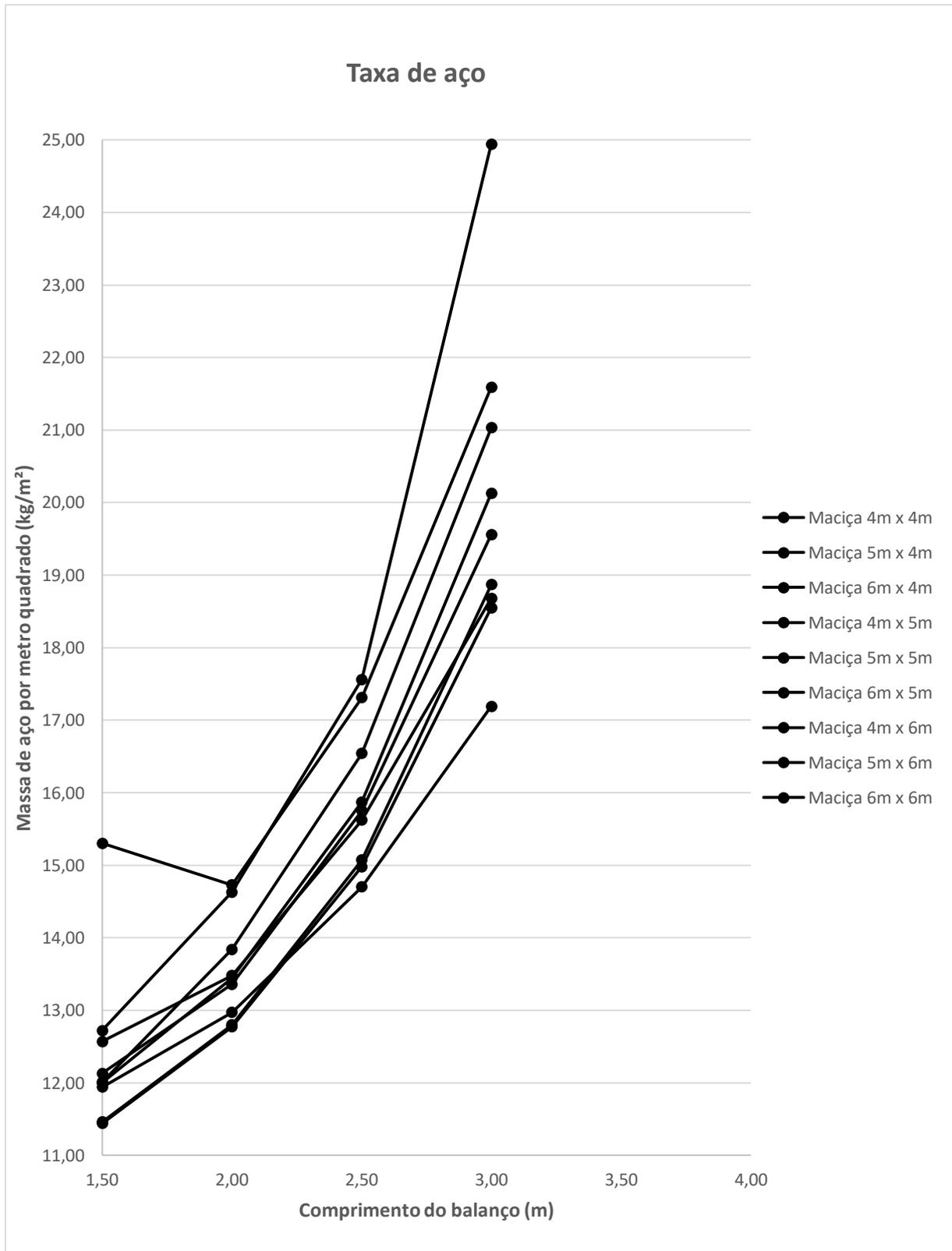
(fonte: Do autor, 2019)

Gráfico 11 – Taxa de aço Lajes Nervuradas



(fonte: Do autor, 2019)

Gráfico 12 – Taxa de aço Lajes



(fonte: Do autor, 2019)

Conforme se prolongava o balanço, todos os gráficos tiveram um comportamento semelhante e, quando havia alteração da laje adjacente, apenas os gráficos positivos e alguns pontos fogem do padrão de comportamento comparado à todos os gráficos construídos.

Os gráficos de consumo de aço quando versus alongado o balanço tem características de uma curva polinomial do segundo grau com um aumento considerável a cada incremento que era inserido de balanço para o outro. Assim como nos outros resultados, lajes com comprimento inferiores na direção y (perpendicular ao balanço) apresentaram menores consumos de aço para a execução das lajes e que o alongamento no sentido do balanço favorece ainda mais para diminuir o consumo. Mas, em uma edificação, tem que ser considerada a área construída e mesmo assim as lajes tiveram taxas de aço por metro quadrado com o mesmo comportamento do consumo, apenas em dois casos (balanço de 1,50 m - nervurada) houve uma pequena alteração.

Conforme a configuração da planta de forma, os valores de deslocamentos, esforços e aço, independente do tipo de laje, tiveram sempre melhor desempenho. E uma laje em balanço associada a uma laje em uma configuração adequada (boa disposição dos elementos de suporte da laje) pode fazer com que os momentos fletores causados pelo balanço diminuam o momento positivo e esse diminua o momento negativo, acontecendo um contrabalanceamento que melhora o desempenho da estrutura como um todo.

As lajes nervuradas apresentaram diversos benefícios para serem tomadas como técnica a ser utilizada. Um fator que não entrou no projeto de pesquisa foram as espessuras das lajes, fator esse que beneficia imensamente na quantidade de aço, pois quanto maior a espessura mais o aço resiste devido aos momentos resistentes dos materiais ter relação direta com a espessura adotada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

São vários os fatores que podem definir o uso de laje maciça ou nervurada, são eles: pé direito estrutural, espessura da laje, custo de insumos e equipamentos, mão de obra (custos diretos para a execução da laje), mas, além disso, o aumento dos custos causados pela escolha da laje, por ter que aumentar as dimensões dos elementos suporte (vigas, pilares e fundação) devido ao aumento da carga permanente (peso próprio) resultante da laje. E, com a pesquisa, foi possível determinar as dimensões possíveis para cada tipo de técnica construtiva para executar uma laje em balanço. Dessa forma, determinou-se como a melhor disposição de vigas para gerar uma planta de forma (laje) que favoreça a laje em balanço e as que estão ligadas a mesma. Qual tipo de laje utilizar, dependendo dos requisitos técnicos para que seja atendido o projeto arquitetônico.

Na pesquisa, fica inviável analisar todos os fatores que possam beneficiar a estrutura de forma econômica, a quantidade de protótipos quando você altera apenas 4 parâmetros (técnica utilizada, dimensões do balanço e aos dois comprimentos das lajes adjacente). Caso fossem analisadas espessuras diferentes de laje, o número de pórticos seria alterado proporcionalmente ao aumento de espessuras. Outro problema foi ter muitas regiões para analisar e especificar apenas na região em balanço.

Concluiu-se que a laje não é usual com relação a tabelas de composições unitárias mais usuais, TCPO (Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos), SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e no Informativo SBC.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tomar como base os resultados atingidos e utilizar as lajes com mais eficiência, determinando quais são as influências causadas pela alteração na espessura das lajes, espessuras das nervuras, dimensões dos elementos de enchimento, os custos para a execução de casa técnica através de banco de dados de orçamento, influencia na fundação custo para formas e escoramento. Diminuir os prolongamentos feitos no balanço para ter uma curva com mais pontos, estudar como é o comportamento dos esforços positivos das lajes adjacentes com esses mesmos protótipos, pois as lajes adjacentes são grandes e, como as armaduras positivas não podem ser cortadas, o consumo dela é elevado e sabendo o comportamento tem-se mais parâmetros para conceber um projeto estrutural com melhor desempenho.

Outras sugestões para futuras pesquisas seria montar uma composição de custo unitária para a laje estudada, ou alterar o estudo para lajes nervuradas com formas recuperáveis ou com treliça pré-fabricada, pois há diversas composições nos bancos de dados.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Abnt, 1980. 5 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-2**: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma — Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 1980. 18 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **ABECE promove curso “Projeto de Estruturas de Concreto”**. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/ent/cont/n/abece-promove-curso-projeto-de-estruturas-de-concreto_17_14263>. Acesso em: 05. 07. 2019.

ATEX. **Conheça os principais tipos de laje**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.atex.com.br/blog/laje/conheca-os-principais-tipos-de-laje/>>. Acesso em: 05. 07. 2019.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto Protendido: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2016.

KIMURA, Alio. **Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado**: Cálculo de edifício com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: Pini, 2007.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **Fundamentos do Concreto e Projeto de edifício**. São Carlos: Edusp, 2007.

PUMA LAJES ALVEOLARES. **Laje Nervurada Protendida**. 2018. Disponível em: <<http://engenharia-construcao.cotanet.com.br/lajes-nervuradas/laje-nervurada-protendida>>. Acesso em: 05. 07. 2019.

RESIDENCIAL ESPELHO DAS ÁGUAS. **Andamento da Obra 22.01.2016**. Florianópolis, 2016. Disponível em: <<http://residencialespelhodasaguas.com.br/acompanhe/andamento-da-obra-22-01-2016>>. Acesso em: 05. 07. 2019.

SANTOS, Altair. **EPS amplia desempenho termoacústico do concreto**. Curitiba, 2013. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/eps-amplia-desempenho-termoacustico-do-concreto>>. Acesso em: 05. 07. 2019.

SANTOS, Altevir Castro dos; PIANA, Roberto Cesar. Análise numérica e experimental de vigotas pré-moldadas em concreto armado para emprego em lajes nervuradas. **Acta Scientiarum. Technology**, [s.l.], v. 33, n. 3, p.253-258, 25 jul. 2011. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i3.5189>.

TEREC, L. R. – TEREC, M. A. **The Bubbledeck Floor System: A Brief Apresentation**. 2013 – Faculty of Civil Engineering. Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca.