



CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISAAC OLIVEIRA DE CARVALHO

**COMPARATIVO NO USO DE LAJES MACIÇAS E NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES.**

FORTALEZA

2022

ISAAC OLIVEIRA DE CARVALHO

COMPARATIVO NO USO DE LAJES MACIÇAS E NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES.

Trabalho de Conclusão de
Curso (TCC) apresentado ao curso de
Engenharia Civil do Centro Universitário
Christus, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Francisco
Rosendo Sobrinho.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C331c Carvalho, Isaac Oliveira de.
Comparativo no uso de lajes maciças e nervuradas
unidirecionais em edificações residenciais unifamiliares. / Isaac
Oliveira de Carvalho. - 2022.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Administração,
Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho.

1. Concreto armado. 2. Laje maciça. 3. Laje nervurada. 4.
Estruturas. 5. Comparativo. I. Título.

CDD 658

ISAAC OLIVEIRA DE CARVALHO

COMPARATIVO NO USO DE LAJES MACIÇAS E NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES.

Trabalho de Conclusão de
Curso (TCC) apresentado ao curso de
Engenharia Civil do Centro Universitário
Christus, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Francisco
Rosendo Sobrinho.

Aprovada em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Francisco Rosendo Sobrinho (UNICHRISTUS)

Prof. Erivano Lúcio Passos (UNICHRISTUS)

Prof. Agérbon César Cunha da Nóbrega (UNICHRISTUS)

RESUMO

No contexto da engenharia civil do Brasil é evidente o apelo ao concreto armado. Grande parte das edificações são executadas com esse material. Diante disso, se destacam as lajes maciças e as nervuradas unidirecionais. Elas são dois tipos de soluções estruturais de lajes em concreto armado amplamente utilizadas. Por esse fato, é evidente a importância de um estudo comparativo entre esses dois tipos de lajes. Para cada solução estrutural foi pré-dimensionada uma seção a ser realizado o dimensionamento. Foram utilizadas as definições normativas presentes na NBR 6118:2014 e na NBR 6120:2019 para determinação de aspectos, como carregamento, combinação de ações, momento fletor, área de aço, deflexão, dentre outros. Além disso, o software Excel foi utilizado como auxílio para os cálculos. De acordo com os resultados obtidos, as seções foram alteradas a fim de determinar a seção mais econômica que garantia a segurança estrutural. Após isso, os resultados das duas soluções escolhidas foram comparadas. Foi observado que a laje nervurada proporcionou a redução do momento fletor e da deflexão em comparação à laje maciça, além de economia no volume de concreto e no peso de aço. Portanto, a solução com nervuras apresentou ser a mais adequada, dentre as duas, para o caso em estudo.

Palavras chave: Concreto Armado. Laje Maciça. Laje nervurada. Estruturas. Comparativo.

ABSTRACT

In the context of civil engineering in Brazil, the appeal to reinforced concrete is evident. Most buildings are made with this material. In view of this, solid slabs and unidirectional ribbed slabs stand out. They are two types of widely used reinforced concrete slab structural solutions. For this fact, it is evident the importance of a comparative study between these two types of slabs. For each structural solution, a section was pre-dimensioned to be dimensioned. The normative definitions present in NBR 6118:2014 and NBR 6120:2019 were used to determine aspects such as steel area, bending moment, deflection, loading, combination of actions, among others. In addition, Excel and TQS software were used as an aid for the calculations. According to the results obtained, the sections were changed in order to determine the most economical section that guaranteed structural safety. After that, the results of the two chosen solutions were compared. It was observed that the ribbed slab provided the reduction of bending moment and deflection compared to the solid slab, in addition to savings in the volume of concrete in the weight of steel. Therefore, the ribbed solution proved to be the most suitable, among the two, for the case under study.

Keywords: Reinforced Concrete. Massive slab. Ribbed slab. Sizing. Comparative.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Objetivos de Pesquisa	5
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	5
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.2 Justificativa	5
2 REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Histórico	7
2.2 Concreto Armado	7
2.3 Concreto	7
2.4 Aço	11
2.5 Lajes	12
2.6 Lajes Nervuradas	12
2.7 Cobrimento	15
2.8 Ações	17
2.8.1 Ações Permanentes	18
2.8.2 Ações Variáveis	18
2.8.3 Ações Excepcionais	18
2.9 Concepção Estrutural em Lajes Nervuradas	18
2.9.1 Ações Atuantes	19
2.9.2 Combinação de ações (ELU)	19
2.9.3 Momento Fletor	21
2.9.4 Área de aço	22
2.9.5 Estado Limite de Serviço	23
2.10 Concepção Estrutural em Lajes Maciça	26
2.10.1 Pré-dimensionamento	26
2.10.2 Carregamento	28

2.10.3 Momento Fletor	29
2.10.4 Estado Limite de Serviço	29
3. METODOLOGIA	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Laje maciça	33
4.1.2 Estado Limite Último	34
4.1.3 Estado Limite de Serviço	38
4.2 Laje Nervurada	42
4.2.1 Estado Limite Último	43
4.2.2 Estado Limite de Serviço	46
4.3 Refinamento dos Resultados	50
4.4 Comparativo	52
5 CONCLUSÃO	57

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil vem evoluindo constantemente há séculos. Obras de extrema importância foram realizadas com o passar dos anos. Exemplo disso são as barragens realizadas no Egito antigo, para conter as enchentes; os castelos medievais na idade média, proporcionando segurança ao povo e as imensas catedrais na idade moderna, a fim de atender às necessidades religiosas de parte da população.

Com isso, fica evidente a importância da engenharia civil na história da humanidade, pois por intermédio dela, foi possível proporcionar inúmeras soluções e atender às demandas do cotidiano da população.

O concreto vem sendo utilizado há séculos. A criação desse material foi um grande avanço tecnológico na área da construção civil, pois proporcionou uma série de vantagens, se comparado a outros tipos de materiais construtivos.

Materiais como pedra e madeira eram amplamente utilizados antes da popularização desse material. Porém, por intermédio de estudos pode se fazer um comparativo entre esses elementos. A pedra, por exemplo, apresenta alta resistência a compressão, porém alta rigidez e baixa deformabilidade. No caso da madeira, era evidente a baixa resistência a pragas, a fungos e à umidade.

Diante disso, o concreto surgiu como um meio de suprir muitas das carências dos outros materiais. Atualmente, é amplamente utilizado, principalmente o concreto armado, que tem a presença de aço. Inúmeras soluções estruturais são concebidas com a presença desse material, tão popular no Brasil e na maior parte do mundo.

Atualmente, com a urbanização da sociedade e o intenso êxodo rural que ocorre há décadas, é perceptível uma disputa por espaços que são cada vez menores nos grandes centros urbanos, levando as construções a se verticalizarem.

Além disso, a tecnologia evoluiu e gerou implicações diretas na engenharia civil. A utilização de *softwares*, cada vez mais avançados, têm proporcionado mudanças, principalmente no dimensionamento estrutural das edificações. Com esse avanço, houve inúmeras mudanças no dimensionamento estrutural, nas técnicas construtivas e nos tipos de materiais utilizados, sempre buscando maior economia, maior segurança e soluções inovadoras para as construções.

Ao longo dos anos, foi possível reduzir o consumo de material nas obras. Com a evolução do estudo de estruturas, foi possível projetar edificações menos

robustas e com menor número de elementos estruturais, como pilares, proporcionando maior economia e soluções que favoreçam a arquitetura e a estética do local, porém sempre se atentando à segurança estrutural.

Dentre os inúmeros elementos construtivos, estão presentes as lajes, que são de fundamental importância para as construções em geral, pois elas recebem as cargas do pavimento e distribuem para as vigas (concepção estrutural mais usual), estas transmitem as cargas para os pilares, e, por fim, para a fundação e solo.

Desta forma, foram pensadas inovações para atender às novas demandas do mercado. Com isso, surgiram inúmeros tipos de lajes, como as maciças, nervuradas, treliçadas, pré-moldadas, dentre outras.

Para o projeto de lajes é importante definir as características do material utilizado. Diante disso, é necessário definir a resistência característica do concreto (f_{ck}), o tipo de aço, dentre outros aspectos.

As lajes de concreto armado são amplamente utilizadas, pois podem ser aplicadas em diversos tipos de soluções estruturais, além de apresentarem uma modelagem simples (MARQUES, 2017).

Um dos principais tipos, são as lajes de concreto armado nervuradas. Nestas predominam nervuras ao longo de sua estrutura. Apresentam uma parte maciça (mesa) e uma parte nervurada, onde se intercalam os vazios e o concreto. Na região do concreto, estão presentes a armação, responsáveis por suportar os efeitos de tração da estrutura.

Uma das vantagens da laje nervurada é sua utilização em locais com grandes vãos, gerando uma maior economia de concreto, se comparado a lajes maciças, além de reduzir o peso da estrutura.

Outro tipo de solução estrutural para lajes, é o uso de laje maciça. Essa solução, atualmente, é amplamente utilizada no Brasil. Em relação às suas vantagens, ela apresenta, por exemplo, simplicidade construtiva, melhor distribuição de cargas lineares (MARQUES, 2017).

Diante disso, este trabalho visa realizar um estudo de lajes maciças e lajes nervuradas unidirecionais em concreto armado para edificações residenciais unifamiliares. Fazendo um comparativo entre as duas soluções estruturais, observando seu comportamento no pré-dimensionamento, na concepção estrutural e nos diagramas de momentos e deflexões.

1.1 Objetivos de Pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar o dimensionamento e análise estrutural de uma laje em duas soluções estruturais: laje maciça e laje nervurada unidirecional em concreto armado em um modelo de edificação residencial unifamiliar.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar um estudo sobre as soluções estruturais em lajes maciças e nervuradas;
- b) Elaborar planilhas para o cálculo estrutural, dimensionamento e verificação de lajes maciças e nervuradas unidirecionais;
- c) Aplicar concepção estrutural com lajes maciças e lajes nervuradas unidirecionais em concreto armado em um estudo de caso de uma laje modelo;
- d) Fazer um comparativo entre soluções, observando aspectos do comportamento no Estado Limite Último, Estado Limite de Serviço e quantitativo de aço e concreto;

1.2 Justificativa

A engenharia civil vem evoluindo há séculos. As constantes inovações são evidentes na construção civil brasileira. No âmbito da engenharia estrutural, sempre são concebidas novas soluções, além de aprimoramento de soluções pré-existentes, com o intuito de suprir as novas demandas do mercado, que ficam mais complexas com o passar do tempo.

Nesse contexto estão presentes, as lajes nervuradas em concreto armado, que surgiram com o intuito de suprir algumas demandas que outros tipos de lajes não conseguiam lidar. Esse tipo de laje permite ao pavimento apresentar grandes vãos, além de proporcionar economia de concreto. Isso, somado a outros fatores, têm levado vários engenheiros a optarem por esse processo de construção em seus projetos (HOLANDA FILHO, 2013).

Ademais, vários estudos foram realizados com lajes maciças. E pode-se observar características desse tipo de solução que se sobrepuseram a outros tipos de lajes. Vantagens como simplicidade construtiva, possibilitando a execução desse tipo de laje em localidades remotas e elevada resistência a trincas e fissuras.

Diante disso, para atender às necessidades do mercado, permitir uma maior economia de material e proporcionar maior segurança às estruturas, são necessários estudos para observar as vantagens e desvantagens dessas soluções estruturais, além de dimensionamentos em situações reais e realização de comparativos de resultados para se obter a melhor solução estrutural para determinadas situações de projeto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico

O concreto é o principal material construtivo utilizado no mundo, seu uso vem passando por modificações ao longo dos séculos e, atualmente, pode-se perceber vários tipos desse material no mundo. É evidente sua utilização em civilizações antigas, como no império romano. Segundo Mascarenhas (2012), o concreto já era utilizado em obras como os aquedutos romanos, responsáveis por levar água para a população.

2.2 Concreto Armado

O concreto armado é o material construtivo mais importante do Brasil. A maioria das obras utilizam esse elemento, pois apresenta vantagens que o faz se sobressair sobre outros tipos de materiais, como elevada resistência a compressão e ao fogo.

Ademais, o concreto armado é constituído por concreto e aço. O concreto, pode ser moldado *in loco* ou pré-moldado, e é constituído por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água, que, de acordo com sua finalidade e características pré-determinadas em projeto, são dosados e misturados. Além disso, podem fazer parte da mistura aditivos e adições, com o intuito de proporcionar características especiais ao concreto.

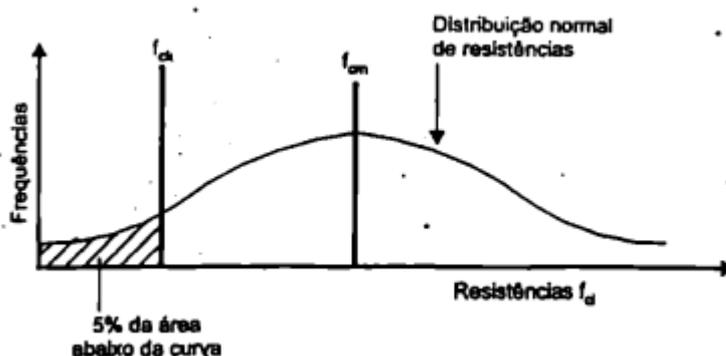
2.3 Concreto

O concreto tem como principal característica a elevada resistência à compressão. O fator que determina essa resistência é o f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão). O ensaio que define esse parâmetro é realizado com corpos de prova específicos, seu molde é definido pela NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Já, a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), define como será realizado o ensaio.

Diante disso, segundo Clímaco (2008), a partir desses ensaios, é possível definir a Curva de Distribuição Normal. Por intermédio dessa, dois importantes

parâmetros são determinados, o ' f_{cm} ' e o ' f_{ck} '. O primeiro é a resistência média à compressão, ou seja, a média aritmética dos valores encontrados com os corpos de prova. Já, o segundo, é a resistência característica à compressão. Por intermédio desse parâmetro é possível concluir que, em uma situação real, os valores de resistência obtidos na produção de concreto têm 95% de chance de serem superiores ao f_{ck} . Esses parâmetros podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 - Curva de distribuição Normal



Fonte: Carvalho e Figueredo Filho (2014)

Diante disso, o f_{ck} é um fator importantíssimo na análise estrutural, pois é utilizado em vários cálculos e permite o dimensionamento eficaz dos elementos estruturais de uma edificação.

Além disso, o concreto é dividido nos grupos I e II, referente à suas resistências. No grupo I estão os concretos C20 ao C50. No grupo II, estão C55 ao C100. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

É interessante ressaltar, que no caso do C20, por exemplo, o 'C' indica o material: concreto. O 20 indica que sua resistência à compressão após 28 dias é de 20MPa. É importante destacar os concretos C20, C25 e C30, que são amplamente utilizados na construção civil.

O concreto é menos resistente à tração, mas seus parâmetros ainda são importantes para a construção civil. Quando não for possível realizar ensaios para determinação dessa resistência, segundo Carvalho e Figueredo Filho (2014), os valores de resistência média à tração (f_{ctm}), pode ser obtido por intermédio do f_{ck} . A partir daí, pode-se definir a resistência característica à tração inferior ($f_{ctk, inf}$) e superior ($f_{ctk, sup}$). Estes parâmetros são calculados pelas equações seguintes:

Para concreto de classe até C50:

$$f_{ctm} = 0,3x f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

Para concreto de classe C55 a C90:

$$f_{ctm} = 2,12 x \ln (1 + 0,11 x f_{ck}) \quad (2)$$

É importante destacar, também, outro fator muito importante no cálculo estrutural, o módulo de elasticidade. Este é definido por intermédio do diagrama de tensão-deformação. Com ensaios realizados em corpos de prova, é possível definir um gráfico que relaciona a tensão (σ) e a deformação (ε).

Além disso, o módulo de elasticidade representa a rigidez do concreto. É um parâmetro, também, muito importante para cálculo de estruturas. Segundo Carvalho e Figueredo Filho (2014), em relação à compressão, podem ser definidos três módulos de elasticidade:

a) Módulo tangente – Seu valor varia de acordo com o ponto determinado, representa a inclinação da reta tangente à qualquer ponto da curva do diagrama.

b) Módulo de deformabilidade inicial (E_{ci}) – Valor da inclinação da reta tangente à curva do diagrama na origem.

c) Módulo secante (E_{cs}) – Inclinação da reta que liga a origem a qualquer ponto. Varia de acordo com o ponto escolhido.

Ainda segundo Carvalho e Figueredo Filho (2014), o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), deve ser definido através da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Para o caso da não realização dos ensaios, este parâmetro pode ser definido pelas expressões seguintes:

Para f_{ck} entre 20MPa e 50Mpa:

$$E_{ci} = \alpha e x 5600 x \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Para f_{ck} entre 55 e 90Mpa:

$$E_{ci} = 21,5 x 10^3 x \alpha e x \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1.25\right)^{1/3} \quad (2)$$

Sendo que:

$\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásio;

$\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_e = 0,9$ para calcário;

$\alpha_e = 0,7$ para arenito.

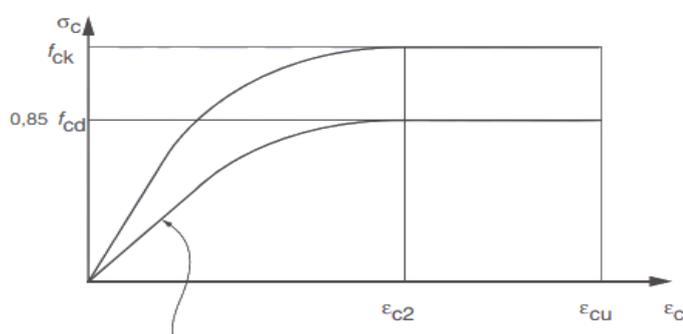
Além disso, o módulo de elasticidade secante pode ser definido por meio de ensaios, quando na ausência destes, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80}\right) \times E_{ci} \leq E_{ci}$$

É interessante ressaltar, também, que na compressão a relação da tensão-deformação é importantíssima, pois por intermédio dela é possível entender melhor a resistência do concreto a diferentes tensões e seu limite de deformação permitido. Esses parâmetros são essenciais para realizar um eficiente dimensionamento de estruturas de concreto armado.

Em meio a isso, foi feito um gráfico que permite relacionar a tensão e a deformação do concreto na compressão. Este será apresentado na Figura 2:

Figura 2 - Gráfico tensão-deformação



Fonte: NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A curva inferior é representada pela equação seguinte:

$$\sigma_c = 0,85 \times f_{cd} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}\right)^n\right]$$

$$\text{Sendo que, } fcd = \frac{fck}{1,4}$$

Em relação à curva superior, a fórmula que a define basta substituir $0,85fcd$ por fck . Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), define os parâmetros do gráfico restantes:

-Para concretos de classe até C50:

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\text{‰}$$

$$\varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$$

$$n = 2$$

-Para concretos de classe C50 a C90:

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} \times (fck - 50)^{0,53} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 35\text{‰} \times [(90 - fck)/100]^{0,53} \quad (2)$$

$$n = 1,4 + 23,4 \times [(90 - fck)/100]^{0,53} \quad (3)$$

2.4 Aço

O aço utilizado no concreto armado é produzido em siderúrgicas, são elementos metálicos que recebem adição de carbono, a quantidade desse elemento pode variar entre 0,4 a 0,6% (ARAÚJO, 2014).

O aço é o material que permite ao concreto armado resistir a elevados valores de tração. Segundo Bastos (2019), este elemento metálico pode ser caracterizado como barra ou fio. As barras apresentam diâmetro nominal de 5mm ou superior, e são produzidos por laminação à quente. Já, os fios, apresentam diâmetro nominal de 10mm ou inferior e são obtidos por trefilação, estiramento ou laminação a frio.

Os tipos de aço utilizados na construção civil são o CA-25, CA-50 e CA-60. 'CA' indica concreto armado, e o número indica sua resistência ao escoamento. O aço CA-50, por exemplo, apresenta resistência ao escoamento de 500MPa, ou seja, até esse valor de tensão o vergalhão deforma sem sair do regime elástico, podendo voltar ao seu estado inicial após a retirada dos esforços.

É importante destacar, também, as inúmeras aplicações do aço como componente estrutural. Esse material pode estar presente em uma construção como

armadura longitudinal, estribo, armadura secundária, tela soldada, ou até como a arame para amarração.

2.5 Lajes

Placas de concreto, são elementos cuja altura é bem menor que sua largura e comprimento e recebem cargas perpendicularmente ao seu plano. Estas podem ser usadas em edificações, juntamente com o aço, caracterizando uma laje. Este elemento, na maioria dos casos, é responsável por suportar as cargas do pavimento, e transmiti-las às vigas. A partir daí as cargas vão para os pilares, fundação e, finalmente, o solo.

Existem vários tipos de lajes de concreto armado, algumas dessas são: lajes maciças, lajes nervuradas e lajes protendidas. Além disso, podem se caracterizar como moldadas no local ou pré-fabricadas.

O tipo de laje a ser escolhido pelo engenheiro projetista para determinada obra deve ser feito segundo alguns critérios, como segurança estrutural, procedimento de execução e economia de material.

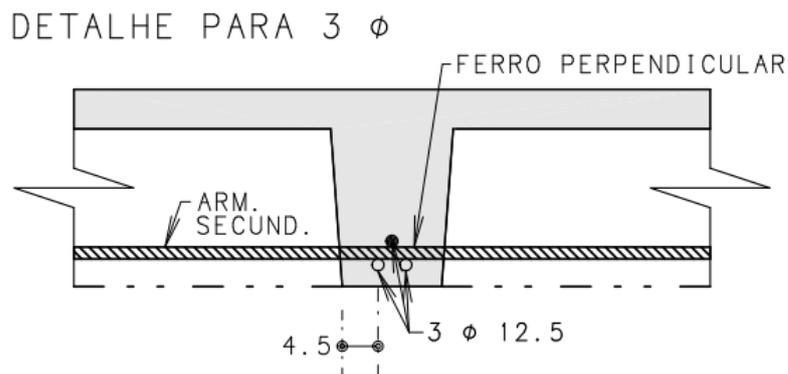
Além disso, esse último fator é muito importante, pois as lajes podem representar grande parcela dos custos de uma obra, pois, durante sua execução, são utilizadas elevadas quantidades de concreto (MARQUES, 2017).

2.6 Lajes Nervuradas

As lajes nervuradas são amplamente empregadas, pois, devido às suas características, é possível executar essas lajes com grandes vãos, fator determinante na escolha dessa solução estrutural na fase de projeto.

Além disso, as lajes nervuradas apresentam, na maioria dos casos, em sua seção, duas regiões: a mesa e a nervura. Esta é onde fica presente a armadura positiva, responsável por suportar os efeitos de tração. O diâmetro do aço e a quantidade de barras por nervura devem ser escolhidos com cautela, a fim de proporcionar segurança à estrutura e economia de material. Um exemplo de disposição de barras de aço em uma nervura serão mostrados na Figura 3:

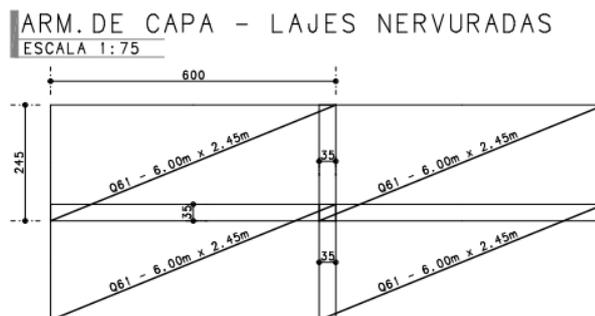
Figura 3 - Corte de uma laje nervurada.



Fonte: do autor (2021).

Ademais, a mesa, geralmente presente na parte superior da seção, é responsável por suportar os efeitos de compressão. Nela, é onde fica presente a armadura negativa (caso seja necessária) e armadura de capa. Um exemplo de representação de armadura de capa pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Armadura de capa para lajes nervuradas.



Fonte: do autor (2021).

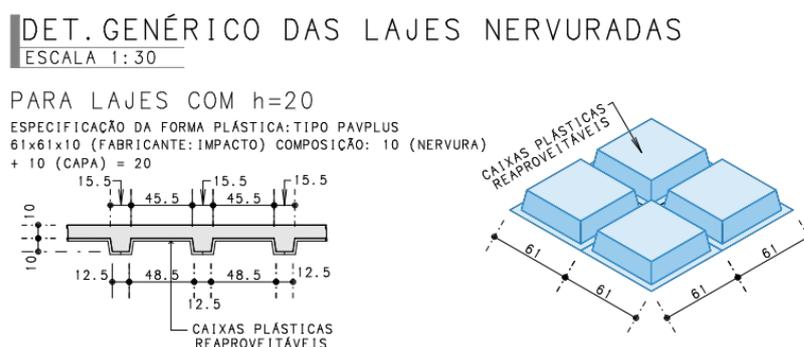
É interessante ressaltar, também, que as lajes nervuradas podem ser unidirecionais ou bidirecionais. As primeiras, apresentam nervuras em uma só direção. Já, no segundo tipo, as nervuras são dispostas nas duas direções, se cruzando perpendicularmente.

Ademais, para ser realizada a execução de uma laje nervurada, se faz necessário as formas e o cimbramento. As formas têm que apresentar um formato que possibilite o molde das nervuras, gerando, assim, os espaços vazios característicos dessa laje.

Um tipo de forma muito utilizado, são as cubetas plásticas de polipropileno. São elementos que, após a cura do concreto, são retirados e reutilizados em outro pavimento.

Além disso, um exemplo muito comum de laje nervurada utilizado no Ceará, em específico, são as lajes “Pavplus”. Estas apresentam cubetas com dimensões 61x61cm e altura total entre 20 e 35cm (IMPACTO, 2018). Um exemplo de representação desse tipo de laje está na Figura 5.

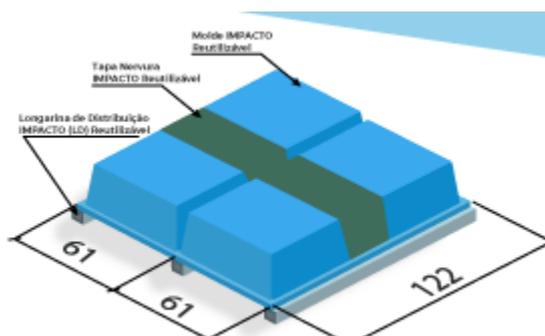
Figura 5 - Detalhe de uma laje nervurada.



Fonte: do autor (2021).

A Figura 6 apresenta um desenho de cubeta plástica para molde de uma laje nervurada bidimensional, se for definido em projeto a execução de uma laje unidirecional será necessário a utilização de um “tapa” nervura, que ocupará os espaços da cubetas em uma direção.

Figura 6 - Cubeta plástica com tapa nervura.



Fonte: Impacto Protensões (2017).

Ademais, um tipo de laje nervurada, apresenta preenchimento entre as nervuras, são as lajes treliçadas. Nesse tipo, a armadura principal fica disposta em forma de treliça e, entre as nervuras, é posto um enchimento não-estrutural, podendo ser de material cerâmico ou EPS (Poliestireno Expansível).

Vale destacar, também, que em uma laje nervurada, pode-se utilizar capitéis, que são responsáveis por combater a punção. Isso ocorre na ligação laje-pilar. Esses esforços são combatidos executando uma parte maciça na área da laje próxima ao pilar. Nessa região é posta uma armadura de punção, que será responsável por assegurar a estabilidade estrutural.

2.7 Cobrimento

A fim de proporcionar durabilidade a uma estrutura, é necessário levar em consideração os cobrimentos pré-estabelecidos por norma. Cobrimento consiste na distância entre a superfície de um elemento estrutural e a parte externa da barra de aço. Além disso, essa distância é responsável por proteger o aço da corrosão e em situações de incêndio (HOLANDA FILHO, 2013).

O cobrimento nominal (c_{nom}) é prescrito por norma e representa o cobrimento mínimo (c_{min}) acrescido da tolerância de execução (Δc). Além disso, deve se atentar para o diâmetro máximo do agregado ($d_{máx}$) não ultrapassar 20% da espessura nominal do cobrimento. Portanto: $d_{máx} \leq 1,2c_{nom}$.

É interessante ressaltar, também, um fator importante na definição dos cobrimentos nominais de uma edificação é a classe de agressividade ambiental (CAA). Esta é classificada de acordo com as características da região onde será localizada uma obra. O grau de agressividade pode variar entre 1 e 4 como mostra na Tabela 1.

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental.

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 ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível 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).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Ademais, com a definição da classe de agressividade ambiental, pode ser definida o fck mínimo que impactará diretamente na resistência dos elementos estruturais de concreto armado, além da relação água/cimento, isso é visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Fck mínimo e Relação água/cimento.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Além disso, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), de acordo com a classe de agressividade, com o elemento

estrutural e tipo de concreto (armado ou protendido), determina o cobrimento nominal a ser considerado. Isso é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Cobrimentos nominais.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ 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 tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

2.8 Ações

Um edifício de concreto, dependendo da sua finalidade, suporta diversos tipos de cargas. Um edifício comercial, além de sua estrutura, alvenaria, revestimento, deve suportar aos esforços das pessoas, dos equipamentos de um consultório, por exemplo; dos veículos da garagem. Um edifício industrial, além de sua estrutura específica, os elementos estruturais devem suportar os pesos do maquinário, dos operários, dos veículos que poderão passar pela indústria.

Com isso, fica evidente que cada tipo de edificação, de acordo com a sua finalidade, apresentará cargas características que deverão ser levadas em consideração na etapa de projeto.

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), as cargas podem ser permanentes, variáveis e excepcionais.

2.8.1 Ações Permanentes

As cargas permanentes, estão presentes ao longo de toda a vida útil do edifício. Elas podem ser diretas ou indiretas. Seus valores são constantes ou de pequena variação durante esse período.

Cargas permanente diretas são o peso da estrutura (lajes, vigas, pilares, por exemplo), do revestimento, da alvenaria e de equipamentos fixos. As indiretas são protensão, retração dos materiais e recalque de apoio.

2.8.2 Ações Variáveis

São cargas que sofrem bastante variação ao longo da vida útil da edificação. Elas podem ser normais ou especiais. As cargas variáveis normais têm grande probabilidade de ocorrer, portanto, no projeto, devem ser consideradas obrigatoriamente de acordo com o tipo de edificação.

Já, as especiais são as que ocorrem em situações especiais, como abalos sísmicos e outras cargas acidentais da natureza.

2.8.3 Ações Excepcionais

São ações que ocorrem devido à choques de veículos na estrutura, incêndio, enchentes e explosões. Embora há poucas chances de ocorrerem devem ser levadas em consideração no projeto de um edifício.

2.9 Concepção Estrutural em Lajes Nervuradas

É importante, para a concepção estrutural, a definição e cotagem do vão da laje a ser analisada. No caso de lajes nervuradas unidirecionais deve ser levado em consideração, principalmente, o menor vão, pois é nessa direção onde vão estar presentes os maiores momentos e deflexões.

Dessa forma, fica evidente o sentido mais crítico das lajes, o de menor dimensão. Por esse motivo, na concepção das cubetas das nervuras para esse tipo de laje devem ser adotadas no sentido da menor direção.

Outro fator importante é o f_{ck} . Esse índice será fundamental para definir a resistência do concreto diante dos esforços. Porém, na sua pré-definição, deve ser levado em conta que, em uma situação real de projeto, um valor elevado de f_{ck} pode implicar em um maior custo de execução.

2.9.1 Ações Atuantes

É parte fundamental da análise estrutural o cálculo da carga atuante sobre a laje. Para o caso de laje unidirecional, o elemento estrutural deve ser analisado como viga de seção 'T'. Portanto, as cargas utilizadas devem ser lineares.

Dois tipos de ações devem ser analisados: ações permanentes e ações variáveis. As permanentes estão presentes ao longo de toda a vida útil da edificação, já as variáveis sofrem bastante variação ao longo dos anos.

Os valores encontrados, serão nominais, porém na definição da carga a ser utilizada no cálculo deverá serem levados em consideração os coeficientes majoradores definidos pela NBR 6118, com o intuito de favorecer a segurança do projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Ademais, devem ser consideradas as ações permanentes, como peso próprio da estrutura e revestimento. Para encontrar o valor do peso próprio deve-se multiplicar a área da seção transversal da nervura pelo peso específico do concreto armado, 2500 kgf/m^3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). O valor encontrado estará em kgf/m .

Ademais, para a carga de revestimento, também caracterizada como carga permanente, deve ser observada a NBR 6120, cujo valor depende do material empregado.

Para o cálculo da carga variável, é necessário encontrar a carga acidental. Segundo a NBR 6120 a carga acidental a ser utilizada deverá depender do tipo de ambiente a ser estudado, como quarto, banheiro, área de serviço, dentre outros. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

2.9.2 Combinação de ações (ELU)

Para o estado de limite último, na definição do carregamento adotado, as cargas consideradas (permanentes e acidentais) devem sofrer majoração, a fim de

proporcionar maior segurança ao projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Diante disso, essa majoração será realizada por intermédio de coeficientes. Estes variam de acordo com o tipo de combinação de ação e a classificação do carregamento. Esses valores podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes para combinação de ações.

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

onde
D é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.
^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Diante do exposto, as combinações de ações podem ser normais, especiais ou excepcionais. Sua classificação dependerá do tipo de edificação projetada. Para o cálculo da carga de projeto será utilizada a seguinte equação:

$$P_d = \gamma_g \times g_k + \gamma_q \times q_k$$

Onde g_k indica a carga permanente característica, q_k a carga variável característica; γ_g coeficiente referente à carga permanente e γ_q referente à carga variável.

2.9.3 Momento Fletor

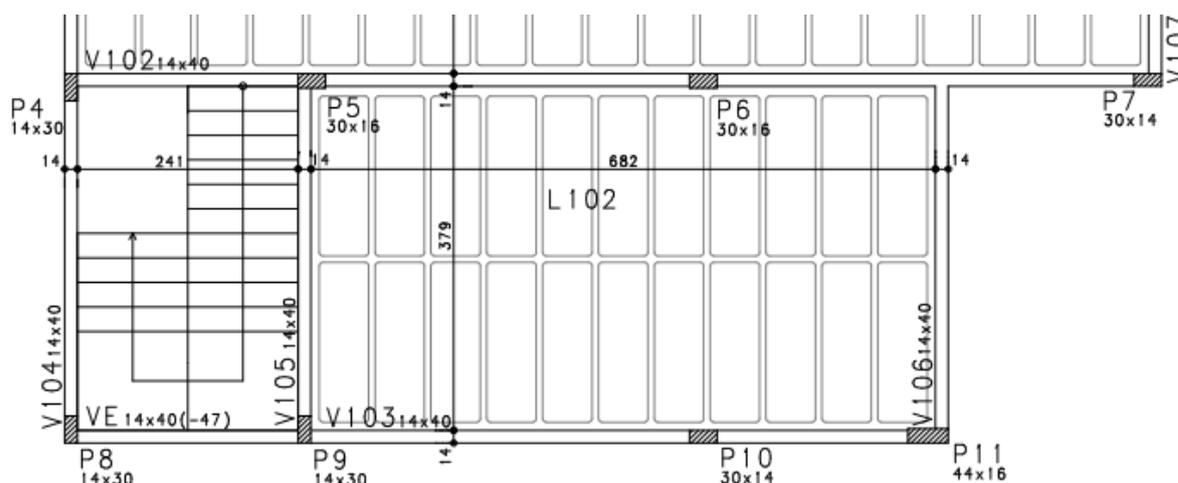
Para o cálculo do momento fletor tem que ser levada em consideração a laje a laje a ser estudada. Fatores como área da seção, carregamento, distância do vão, quantidade de apoios dentre outros.

Em meio a isso, levando em consideração esses fatores o momento fletor deve ser calculado para a definição da armadura que vai conter esses esforços.

Ademais, para a definição do momento, por exemplo, em uma laje nervurada unidirecional deve ser levado em consideração o menor vão, pois será nessa direção que estará presente o maior momento máximo. Conseqüentemente as nervuras devem estar dispostas nessa posição.

Diante disso, em uma laje unidirecional sem balanço, contornada por vigas, a carga da laje será passada para apenas duas vigas. Aquelas que servirão de apoio para a menor dimensão.

Figura 7 – Modelo de Laje nervurada unidirecional..



Fonte: do autor.

No caso da laje L102 da Figura 7, por ser unidirecional as nervuras estão dispostas no menor vão (sentido y). Portanto as vigas que receberão os esforços dessa laje serão as vigas V102 e V103.

Diante disso, a laje deverá ser considerada como viga de seção T biapoiada, cujos apoios serão as vigas V102 e V103. A análise de momento neste caso, será por intermédio da equação a seguir.

$$Mk = \frac{qk \times L^2}{8}$$

Onde Mk é o momento nominal ($kgfm$), q o carregamento considerado (kgf/m), e 'L' o vão (m).

Além disso, essa análise pode ser feita já levando em consideração os carregamentos majorados, ficando como na equação a seguir.

$$Md = \frac{qd \times L^2}{8}$$

Esse valor de momento Md , é definido como momento de projeto, pois será esse valor que vai ser levado em consideração no cálculo da armadura.

2.9.4 Área de aço

Além disso, é necessária a definição da altura efetiva, que consiste na distância do topo da seção ao centro da barra de armadura. Na seção a ser estudada o cálculo de 'd' será da maneira apresentada na equação a seguir:

$$d = ht - \text{cobrimento} - \text{diâmetro}/2$$

Ademais, outro fator importante é a resistência característica de tensão de escoamento. Como o aço a ser utilizado no projeto será o CA-50, sua tensão será de 500MPa.

Diante disso, o método de cálculo da armadura da seção transversal será apresentado na equação mostrada a seguir:

$$As = \frac{Md}{fyd \times (d - 0,4LN)}$$

2.9.5 Estado Limite de Serviço

Outra análise importante a ser feita é a do estado limite de serviço. É nessa etapa que são verificados a deflexão ou ‘flecha’ solicitante e permissível. Deflexão consiste no deslocamento que o elemento estrutural sofrerá ao longo de sua vida útil.

Esse deslocamento depende do tipo de laje escolhida, seu f_{ck} , altura, além do carregamento exercido sobre ela, dentre outros fatores. Além disso, após a conclusão de uma obra é preciso respeitar as definições do projeto estrutural. Por exemplo, o pavimento superior de um galpão que, antes só recebia pequeno fluxo de pessoas e pequenos equipamentos, não pode ser utilizado, posteriormente, para uma biblioteca sem um novo projeto de reforço estrutural.

É importante se atentar a isso, pois a deflexão solicitante, pode se apresentar diferente da de projeto, podendo levar a problemas na edificação ou até a transtornos mais sérios como ruptura.

Diante disso, para se calcular a flecha de um elemento estrutural é importante definir alguns fatores como carregamento para o ELS (Estado Limite de Serviço), vão da estrutura, módulo de elasticidade secante do concreto, dentre outros.

Em meio a isso, primeiramente, deve ser definida a deformação imediata, que levará em consideração os fatores citados anteriormente.

$$W_o = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times E_{cs} \times I_{eq}}$$

Onde W_o é a deflexão imediata. ‘ q ’ o carregamento, ‘ L ’ o vão, E_{cs} o módulo de elasticidade e I_{eq} a inércia de Branson.

Diante disso, o carregamento adotado é o carregamento proveniente da laje levando em consideração um coeficiente de minoração da carga acidental. Ele é evidente na equação a seguir:

$$q_d = g_k + \Psi_2 \times q_k$$

O valor de q_d será utilizado na equação de flecha inicial e o coeficiente Ψ_2 deve ser definido segundo a NBR 6118, a tabela referente a esse coeficiente é mostrada na Tabela 5:

Tabela 5 – coeficientes para combinação de ações no Estado Limite de Serviço.

Ações		γf_2		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.
^b Edifícios residenciais.
^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Ademais, o vão a ser considerado deve ser o menor, pois é nessa situação que ocorrem as maiores deflexões. O módulo de elasticidade secante é definido pela equação a seguir.

$$Ecs = 5600\sqrt{fck}$$

Onde fck e Ecs estão em MPa.

É importante destacar, também, que a fluência, decorrente das cargas de longa duração exercidas sobre a laje, gera uma deformação adicional que deverá ser considerada em projeto.

Diante disso, se faz necessário o cálculo do coeficiente αf , que será multiplicado pela deflexão inicial para ser possível obter a deformação máxima. Isso é feito por intermédio das equações a seguir:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(to) \quad (1)$$

$$\rho' = \frac{As'}{bd} \quad (2)$$

$$\alpha f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50 x \rho'} \quad (3)$$

Onde ξ é um coeficiente dependente do tempo, em meses, que se deseja descobrir a deflexão (t), e do tempo, também em meses, onde se inicia o carregamento de longa duração (t_0). Os valores de ξ podem ser encontrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes para Estado Limite de Serviço.

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Outro coeficiente necessário para definir a deflexão adicional é o ρ' , que depende da possível presença de armadura complementar na seção transversal, e das dimensões da seção. O valor desse coeficiente é nulo, quando durante o dimensionamento no ELU não é adotada armadura complementar.

Diante disso, deve ser encontrada a deflexão total, aquela que será considerada no dimensionamento no ELS, para tanto deve ser utilizada a equação mostrada a seguir:

$$w^\infty = (1 + \alpha f) \times w_0$$

Onde w^∞ deve ser encontrado em centímetros e comparado com a deflexão limite, definida na Tabela 7.

Tabela 7 – Deslocamentos limites.

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	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350+$ contraflecha ^b
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

2.10 Concepção Estrutural em Lajes Maciça

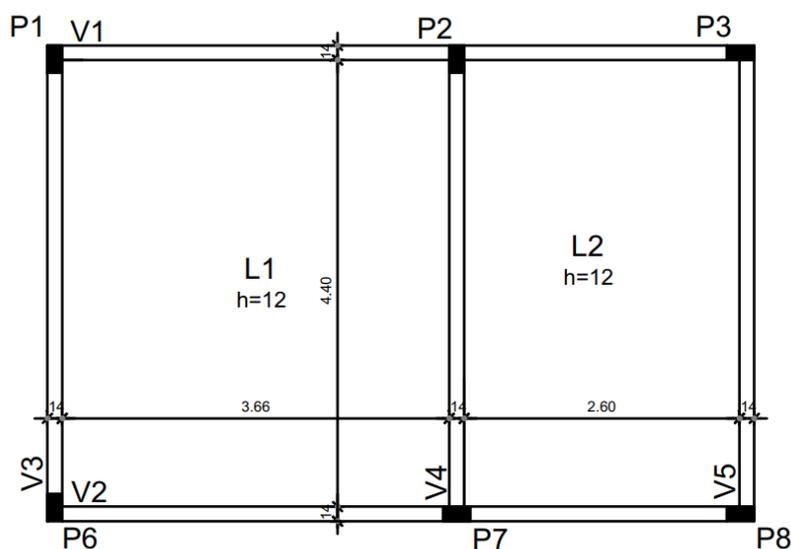
A maneira de analisar lajes maciças é um pouco diferente das lajes nervuradas. No caso de uma laje que esteja ligada à outra sem relação de engastamento, a viga que servirá de apoio provocará uma mudança na configuração do diagrama de momento fletor, se comparada a uma laje simplesmente apoiada. Nesse caso deverá ser analisada a influência da laje vizinha na laje estudada

Diante disso, com a consideração dos carregamentos ficará evidente um momento negativo sobre a viga intermediária. Isso deverá ser levado em consideração no cálculo das armaduras. Além disso, esse momento negativo irá proporcionar uma redução do momento positivo máximo.

2.10.1 Pré-dimensionamento

Além disso, uma etapa importante da concepção estrutural é o pré-dimensionamento.

Figura 8 – Modelo de concepção estrutural.



Fonte: do autor.

Na figura 8 é mostrada uma planta de forma com duas lajes. A fim de ser realizada a verificação de engastamento da laje L1, deve, primeiramente, observar seu contorno. Como três vigas estão livres (V1, V2 e V3), ou seja, não estão fazendo ligação com outras lajes, pode se considerar que a laje nessas três extremidades não apresenta engastamento,

Ademais, no caso do lado esquerdo da L1, é perceptível a viga V4 fazendo a conexão com a laje L2. Diante disso, devem ser consideradas três equações para a verificação do engastamento. Elas serão apresentadas a seguir.

$$h2 \geq h1 \quad (1)$$

$$Lx2 \geq \frac{2}{3}Lx1 \quad (2)$$

$$Ly2 \geq \frac{2}{3}Ly1 \quad (3)$$

É importante destacar, que essas equações só servem para lajes retangulares. Portanto, para que a laje L2 exerça o engastamento sobre a laje L1 essas três equações devem ser satisfeitas.

Diante disso, deve ser realizada a determinação da altura útil da laje. Para isso a equação mostrada a seguir deve ser observada:

$$d = \frac{(2,5 - 0,1 \times n) \times L}{100}$$

Portanto a altura útil depende do número de bordas engastadas (n) e do comprimento do menor vão (L). A partir daí, deve-se levar em consideração o cobrimento mínimo necessário e uma previsão da bitola a ser utilizada, a fim de determinar a altura total da laje. Isso é mostrado na equação a seguir:

$$h = d + c + \frac{\phi}{2}$$

Onde 'd' consiste na altura útil, 'c' o cobrimento mínimo definido de acordo com as características do local e tipo de empreendimento e 'φ' a previsão da bitola utilizada.

É importante destacar, também, que esse é um valor mínimo, consequentemente valores maiores podem ser adotados a critério do projetista.

2.10.2 Carregamento

Diante do analisado na etapa de pré-dimensionamento, é importante definir os carregamentos adotados. O peso próprio dependerá do peso específico do concreto e da altura da laje. Essa definição é mostrada seguinte equação:

$$Pp = 2500 \times hl$$

Onde hl é a altura adotada da laje (cm), e Pp a carga do peso próprio em kgf/m². Além disso, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) devem ser definidas cargas de revestimento, constituindo assim as cargas permanentes.

É importante destacar, também as cargas acidentais que irão ser consideradas do cálculo do carregamento de projeto, que deverão ser encontradas na NBR 6120.

2.10.3 Momento Fletor

Uma etapa importantíssima para a concepção de lajes maciças é a análise do momento fletor, pois a partir dessa etapa pode-se avançar para a definição e detalhamento da armadura.

O momento de uma laje maciça, pode ser descoberto pelo método de Bares. Carvalho e Figueredo Filho (2014), devem ser encontrados dois coeficientes μ_x e μ_y que dependerão da relação entre as dimensões das lajes.

A partir daí, com a definição de outras variáveis, como carregamento e dimensão do menor vão, o momento fletor pode ser definido.

Ademais, para a definição da área de aço a ser empregada na laje o cálculo é realizado da mesma maneira que a laje nervurada, porém o resultado será dado em cm^2/m , pois as barras serão distribuídas uniformemente ao longo de todo o elemento.

2.10.4 Estado Limite de Serviço

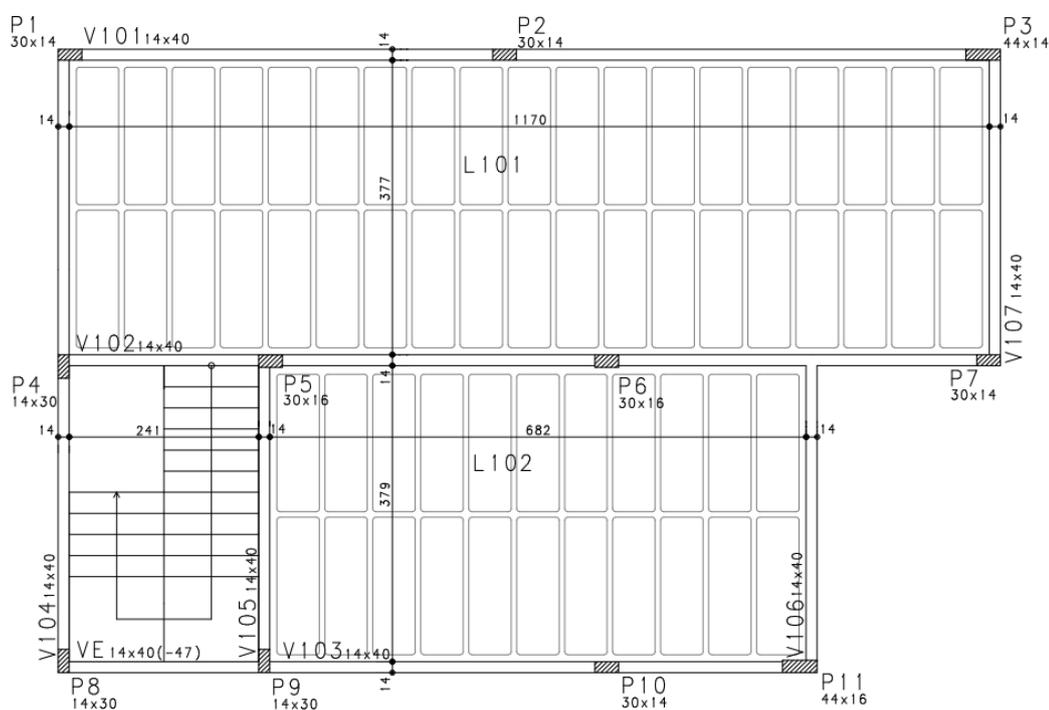
Para o cálculo da deflexão instantânea, máxima e admissível os passos são os mesmos que para a laje nervurada, desde que a laje maciça unidirecional seja analisada como faixa unitária. É interessante ressaltar que a flecha máxima deve ser menor que a admissível, a fim de garantir que a estrutura esteja de acordo com os parâmetros normativos no referente a deslocamentos visíveis.

3. METODOLOGIA

O procedimento de coleta de dados foi por intermédio de estudos bibliográficos. Foram utilizadas pesquisas em monografias, teses, dissertações e artigos, caracterizando a pesquisa como descritiva e quali-quantitativa.

É interessante destacar, também, que o estudo será feito a partir de uma concepção estrutural feita pelo discente, juntamente com o professor orientador. Esse modelo está representado na Figura 9.

Figura 9 – Projeto concebido utilizado como exemplo no trabalho.



Fonte: do autor.

Foi definido que a localização do empreendimento será na cidade de Fortaleza, Ceará. Diante disso, foi escolhida uma laje para ser estudada (laje L101), cujas características da seção serão pré-definidas segundo a bibliografia de referência e, caso necessário, serão feitas mudanças em função dos resultados obtidos, a fim de se obter uma análise robusta a respeito das soluções definidas e suas implicações no estado limite último, no estado limite de serviço e no quantitativo.

Diante disso, inicialmente, serão definidas duas seções para realização do dimensionamento, uma para laje maciça e outra para laje nervurada. Com isso, podem ser definidos a seção transversal e altura útil.

Em meio a isso, primeiramente, serão definidos alguns fatores como como f_{ck} , índice de agressividade ambiental e cobertura que dependerão na localização da edificação

A partir daí, as cargas serão definidas. Primeiramente, as permanentes, em seguida, as acidentais. Para o caso da laje nervurada unidirecional, seus valores serão adaptados da unidade kgf/m^2 para kgf/m , pelo fato de que as lajes nervuradas serão consideradas como vigas de seção 'T', portanto seu carregamento será disposto linearmente.

Ademais, deve haver a combinação de ações com a majoração dos carregamentos a fim de atender aos requisitos da análise do estado limite último (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A partir daí, após essas definições, o momento fletor poderá ser determinado, e em seguida, a área de aço.

Entretanto, deve ser observada, para a laje maciça a relação entre suas dimensões, pois ela pode se apresentar como unidirecional ou bidirecional. Isso implicará diretamente no momento fletor e na forma de se comportar estruturalmente

Além disso, a laje deve ser dimensionada para o Estado Limite de Serviço. Alguns fatores como a combinação de ações, módulo de elasticidade do concreto, comprimento do vão, dentre outros, devem ser considerados para determinação da deflexão.

É importante ressaltar, também, que deve ser feita uma combinação de ações específica para o estado limite de serviço. Com essas variáveis definidas, a deflexão inicial pode ser calculada.

Nesse contexto, alguns parâmetros normativos devem ser considerados a fim de definir a deflexão total, que consiste na movimentação vertical da laje ao longo do tempo. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Com os resultados obtidos, deve ser realizada uma análise a fim de determinar se a seção dimensionada está apresentando desempenho estrutural satisfatório, além de estar de acordo com os parâmetros normativos.

Após isso, deve ser analisada a possibilidade de redução da seção para ambas as soluções, a fim de viabilizar uma economia de material garantindo a segurança da estrutura.

Diante disso, as seções ótimas para laje maciça e laje nervurada devem ser comparadas com o intuito de definir a melhor solução para o caso em estudo, além de observar a diferença dos índices obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Laje maciça

Inicialmente, na etapa de pré-dimensionamento, é importante definir a classe de agressividade ambiental, pois por intermédio dela será definido o cobrimento mínimo para a armadura de aço. A localidade do edifício modelo será adotada na cidade de Fortaleza, em uma região que não sofre influência do mar.

Em meio a isso, o ambiente da edificação será classificado como Urbano de agressividade moderada. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Portanto, de acordo com a tabela 1, sua classe de agressividade ambiental será 2 e, de acordo com a tabela 2 o fck mínimo para execução da obra será 25 MPa.

Ademais, é necessário calcular a altura mínima da laje, com o intuito de definir o menor valor a ser considerado na análise estrutural.

Diante disso, deve-se calcular, primeiramente, valor da altura útil. Isso é mostrado nas equações a seguir:

$$d = \frac{(2,5 - 0,1 \times n) \times L}{100} \quad (1)$$

$$d = \frac{(2,5 - 0,1 \times 0) \times 391}{100} = 9,78 \text{ cm} \quad (2)$$

Onde 'n' corresponde ao número de bordas da laje engastadas, e 'L' o comprimento do menor vão. A partir daí, pode-se calcular a altura total da laje. Para isso, foi considerado o cobrimento de 2,5 cm, devido à classe de agressividade definida e valor da bitola inicial de 10 mm. Isso é evidente nas equações a seguir:

$$h = d + c + \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

$$h = 9,78 + 2,5 + \frac{1}{2} = 12,78 \text{ cm} \rightarrow 13 \text{ cm} \quad (2)$$

Portanto, a altura mínima adotada para a laje estudada deve ser 13 cm. Em meio a isso, na análise estrutural para essa solução será considerado, inicialmente, esse valor para a altura, visando a economia de material. Nos próximos passos será analisado sua capacidade resistente.

4.1.2 Estado Limite Último

A partir daí, devem ser considerados os carregamentos. Como cargas permanentes serão definidos os valores de peso próprio ($g1$), revestimento ($g2$) e forro ($g3$). Isso é mostrado a seguir:

$$g1 = h \times \gamma_{ca} = 0,13 \times 2,5 = 0,325 \text{ tf/m}^2$$

Onde ' h ' está em m e γ_{ca} em tf/m^3 . Para os valores de revestimento e forro foram utilizadas, de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2019), os valores de 100 kgf/m^2 e 25 kgf/m^2 , respectivamente.

Ademais, em relação às cargas variáveis, deve ser observada a função atribuída à laje no contexto arquitetônico. Como no projeto em questão a laje escolhida será utilizada para dormitório e banheiro, segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2019) o valor de carga a ser utilizado deve ser 150 kgf/m^2 .

Em seguida, deve ser feita a combinação de ações, os valores de carregamento característicos encontrados devem ser combinados para serem utilizados para o estado limite último e estado limite de serviço.

Nesse contexto, para a definição da carga de projeto no ELU, os coeficientes de majoração devem ser levados em consideração. Para o caso em estudo, devido às características da edificação será utilizada a combinação normal de ações.

Ademais, é evidente, de acordo com a tabela 3 mostrada anteriormente, que os coeficientes utilizados devem ser 1,4 tanto para a carga permanente, como para acidental. Isso fica evidente na equação seguinte:

$$Pd = 1,4 \times gk + 1,4 \times qk$$

Onde gk consiste no somatório dos carregamentos permanentes e qk o valor de carga acidental característico. Diante disso, é possível a determinação da carga de projeto:

$$Pd = 1,4 \times (0,325 + 0,1 + 0,025) + 1,4 \times 0,15 = \quad (1)$$

$$Pd = 0,840 \text{ tf/m}^2 \quad (2)$$

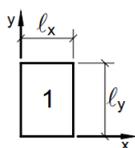
Nesse contexto, deve-se seguir para a análise estrutural. Na análise do estado limite último, será utilizada a tabela de bares. Primeiramente deve-se considerar a relação entre as dimensões da laje, por intermédio do coeficiente λ . Isso é mostrado por intermédio das seguintes equações:

$$\lambda = \frac{ly \text{ (maior vão)}}{lx \text{ (menor vão)}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1184}{391} = 3,03 \quad (2)$$

Diante disso, fica evidente que a laje é unidirecional devido a seu coeficiente ser maior que dois (CARVALHO E FIGUEREDO FILHO, 2014 apud BARES, 1972). Para o cálculo do momento fletor devem ser definidos outros dois coeficientes. O μ_x e μ_y são definidos a partir da relação entre as dimensões da laje. No caso da laje unidirecional, μ_x terá o valor de 12,57 e μ_y de 3,77. Isso é mostrado na Tabela 8:

Tabela 8 – Tabela de bares para lajes maciças.



λ	μ_x	μ_y
1,00	4,41	4,41
1,05	4,80	4,45
1,10	5,18	4,49
1,15	5,56	4,49
1,20	5,90	4,48
1,25	6,27	4,45
1,30	6,60	4,42
1,35	6,93	4,37
1,40	7,25	4,33
1,45	7,55	4,30
1,50	7,86	4,25
1,55	8,12	4,20
1,60	8,34	3,14
1,65	8,62	4,07
1,70	8,86	4,00
1,75	9,06	3,96
1,80	9,27	3,91
1,85	9,45	3,83
1,90	9,63	3,75
1,95	9,77	3,71
2,00	10,00	3,64
> 2,00	12,57	3,77

Fonte: CARVALHO E FIGUEREDO FILHO, 2014 apud BARES, 1972.

Diante disso, com os dados obtidos é possível calcular o momento fletor a partir da seguinte equação:

$$Md = \frac{\mu \times Pd \times L_{menor}^2}{100}$$

Onde Pd é dado em tf/m^2 e ' L_{menor} ' é o menor vão em metros. É interessante ressaltar, que a laje analisada é unidirecional, portanto o esforço mais relevante será na menor dimensão. Com isso, o cálculo do momento é feito da seguinte maneira:

$$Md = \frac{12,57 \times 0,84 \times 3,91^2}{100} = 1,61tfm/m$$

Com isso fica evidente, que o momento mais relevante estará disposto na direção y, cujo comprimento é 3,91 m.

A partir daí, deve ser calculada a armadura para a laje, pois o aço será o elemento responsável por suportar o momento fletor calculado anteriormente. É interessante destacar, também, que devido ao fato da laje estudada ser unidirecional, deve se adotar, como medida de segurança uma armadura mínima na maior dimensão.

Primeiramente, será calculada a armadura na direção mais crítica, que será realizada da seguinte maneira:

$$A_s = \frac{Md}{f_{yd} \times (d - 0,4x)}$$

Onde Md é momento na direção analisada em *tfm*; *f_{yd}* consiste na tensão de escoamento do aço de projeto, dado em kPa; 'd' é a altura útil da laje e 'x' a linha neutra, ambos em metros.

Nesse contexto, o aço escolhido a ser utilizado será o CA50, portanto sua tensão de escoamento é 500 MPa. Diante disso, deve-se considerar o coeficiente de minoração para favorecer a segurança (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014)). Isso é mostrado a seguir:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} \rightarrow 434,78 \times 10^3 \text{ kPa}$$

É interessante ressaltar, também, que o valor de altura útil - definido anteriormente - será de 10 cm. A linha neutra depende de fatores como resistência característica do concreto, momento fletor, dentre outros e deve ser determinada para a realização do dimensionamento.

Diante disso, foi elaborada uma tabela por intermédio da ferramenta Excel, que receberá os valores das variáveis e fornecerá a posição da linha neutra e seu domínio de atuação. Isso é mostrado na tabela 8:

Nesse contexto, para a seção analisada a linha neutra estará posicionada 1,16 cm abaixo do topo da laje. Isso é mostrado na Tabela 9:

Tabela 9 – Linha Neutra.

LINHA NEUTRA		
	Valor	Unid
fck	25	Mpa
bw	1	m
d	0,1	m
Md	16,14	kNm
x'	23,59	cm
x''	1,41	cm
x/d	0,14	Domínio 2

Fonte: do autor (2022).

Com a tabela é possível observar que a linha neutra está posicionada a 1,47 cm do topo da laje e a seção da laje encontra-se no domínio 2.

Portando, com os dados obtidos é possível determinar a taxa de aço para a seção. Isso é mostrado nas equações a seguir:

$$A_s = \frac{Md}{f_{yd} x (d - 0,4x)} \quad (1)$$

$$A_s = \frac{16,1}{434,78 \times 10^3 x (0,1 - 0,4 x 0,014)} \quad (2)$$

$$A_s = 3,93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m} \rightarrow 3,93 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (3)$$

4.1.3 Estado Limite de Serviço

A análise do estado limite de serviço também é parte importantíssima no dimensionamento da estrutura. Primeiramente será analisado o carregamento que deve ser observado de forma diferente do estado limite último.

Nesse contexto, deve ser levado em consideração um coeficiente específico para a carga acidental de acordo com as particularidades deste estudo de caso. De acordo com a Tabela 5, o coeficiente ψ_2 será de 0,3. Diante disso a equação para o carregamento ficará como mostrado a seguir:

$$Pd = gk + \psi_2 \times qk \quad (1)$$

$$Pd = (0,325 + 0,1 + 0,025) + 0,3 \times 0,15 \quad (2)$$

$$Pd = 0,495 \text{ tf/m}^2 \quad (3)$$

É importante ressaltar, que os valores de carga permanente (gk) e variável (qk) já foram definidos anteriormente. Em seguida deve ser calculado o módulo de elasticidade secante (Ecs). Este depende de alguns fatores como o módulo de elasticidade inicial (Eci), o fck , dentre outros.

Primeiramente, deve ser calculado o Eci , isso é mostrado nas equações a seguir:

$$Eci = \alpha_e \times 5600 \times \sqrt{fck} \quad (1)$$

$$Eci = 1 \times 5600 \times \sqrt{25} \quad (2)$$

$$Eci = 28000 \text{ MPa} \quad (3)$$

Em seguida, o coeficiente α_i deve ser calculado, para, após isso, o módulo de elasticidade secante ser determinado:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{fck}{80} \quad (1)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{25}{80} \quad (2)$$

$$\alpha_i = 0,862 \quad (3)$$

$$Ecs = \alpha_i \times Eci \quad (4)$$

$$Ecs = 0,862 \times 28000 \quad (5)$$

$$Ecs = 24150 \text{ MPa} \quad (6)$$

Após isso, pode ser calculado, por intermédio do *software* Unicalc, o momento de inércia equivalente. Fatores encontrados anteriormente, como área de aço, módulo de elasticidade, momento máximo, dentre outros, serão utilizados nessa ferramenta para definição da inércia. Isso é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Cálculo da inércia de Branson.

Geometria

Seção Retangular

bw (cm) 100 bfs (cm) 0 bfi (cm) 0

hw (cm) 13 hfs (cm) 0 hfi (cm) 0

Passiva d (cm) 10 Ativa d (cm) 0

d' (cm) 0 d' (cm) 0

Aço

As (cm²) 3,93 Ap (cm²) 0 ε_{pré} (‰) 0

As' (cm²) 0 Ap' (cm²) 0 ε'_{pré} (‰) 0

Es (MPa) 210000 Ep (MPa) 195000

Concreto

C25 Ecs (MPa) 24150

Esforços em serviço

Mk 9,51 kN.m

Nk 0 kN

(-) tração
(+) compressão

Calcular

ELS-W ELS-DEF

Resultados

Estádio I

x (cm) 6,5 A (cm²) 1300 I (cm⁴) 18308,33

Estádio II

x (cm) 2,29 I_{||} (cm⁴) 2431,73 I_{||} / I 0,13

σ_c (MPa) 8,97 σ_s (MPa) -262,03 σ_{s'} (MPa) 0

σ_p (MPa) 0 σ_{p'} (MPa) 0

Estádio I homogeneizado

x_h (cm) 6,58 A_h (cm²) 1330,24 I_h (cm⁴) 18670,4

Momento de fissuração **Inércia de Branson**

M_r 10,84 kN.m I_{eq} 18308,33 (cm⁴) I_{eq} / I 1

Fonte: do autor (2022).

Portanto, é evidente que a inércia equivalente será de $18308,33 \text{ cm}^4$. Após isso, a deflexão inicial pode ser calculada. Isso será feito com as equações a seguir, utilizando o cálculo de laje maciça como viga de faixa unitária:

$$w_0 = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times Ecs \times I_{eq}} \quad (1)$$

$$w_0 = \frac{5 \times 4,95 \times 3,91^4}{384 \times (24150 \times 10^3) \times (18308 \times 10^{-8})} \quad (2)$$

$$w_0 = 0,34 \times 10^{-2} \text{ m} \rightarrow 0,34 \text{ cm} \quad (3)$$

É interessante ressaltar, que a carga (q) foi utilizada em kN/m², o vão considerado (L) em metros, o módulo de elasticidade secante (Ecs) em kPa e o momento de inércia equivalente (I_{eq}) em m⁴.

Nesse contexto, a deflexão a ser considerada no dimensionamento será a flecha total, que consiste na flecha inicial acrescida da flecha adicional. Esta é causada pela fluência devido às cargas de longa duração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Para isso, é necessário definir alguns valores, como ρ' , $\Delta\xi$ e αf . O primeiro coeficiente depende do valor de armadura complementar, como não foi necessária a utilização dessa armadura na solução estudada, seu valor é zero.

Ademais, o coeficiente $\Delta\xi$ depende da relação entre o tempo que a carga de longa duração passa a ser considerada a partir da concretagem (t_0) e o tempo final a ser considerado para a flecha (t). Portanto, o valor desse coeficiente é definido da seguinte maneira:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

Nesse contexto, foi considerado como tempo de início 1 mês, e tempo final 70 meses. De acordo com a Tabela 10, pode-se determinar os coeficientes a serem utilizados.

Tabela 10 – Coeficiente $\xi(t)$

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: do autor (2022)

Diante disso, a equação anterior ficará da seguinte maneira:

$$\Delta\xi = \xi(70) - \xi(1) \tag{1}$$

$$\Delta\xi = 2 - 0,68 = 1,32 \tag{2}$$

Com isso, é possível definir o valor do coeficiente αf e, em seguida, a deflexão total. Esta deverá ser comparada com a deflexão admissível com o intuito de observar se a flecha solicitante atende aos requisitos da NBR 6118:2014

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Isso será mostrado nas equações a seguir:

$$\alpha f = \frac{\Delta \xi}{1 + \rho'} \quad (1)$$

$$\alpha f = \frac{1,32}{1 + 0} = 1,32 \quad (2)$$

$$w_{\infty} = (1 + \alpha f) \times w_0 \quad (3)$$

$$w_{\infty} = (1 + 1,32) \times 0,34 = 0,79 \text{ cm} \quad (4)$$

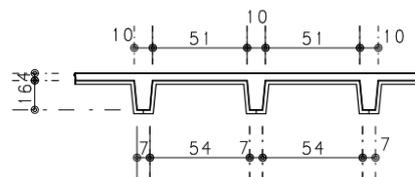
$$w_{admissível} = \frac{L}{250} = 1,56 \text{ cm} \quad (5)$$

4.2 Laje Nervurada

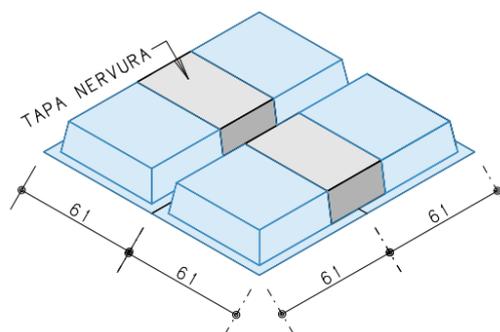
Como definido anteriormente, a outra solução estrutural para a laje em estudo será laje nervurada unidirecional. Diante disso, será feito o cálculo para os mesmos parâmetros que a solução anterior, porém devem ser levados em consideração as particularidades dessa solução.

Com isso, o f_{ck} considerado também será de 25 MPa. Deve ser pré-dimensionada, também, a seção da laje. Para o caso em questão será utilizada a seção mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Seção da laje nervurada e forma.



DET. TAPA NERVURA

**Fonte:** do autor (2022).

O tipo de forma escolhida está de acordo com os modelos utilizados na cidade de Fortaleza, local do empreendimento. (IMPACTO, 2018,). As características da seção escolhida foram organizadas em uma Tabela 11, mostrada a seguir:

Tabela 11 – Dimensões da seção da laje nervurada.

DIMENSÕES DA SEÇÃO		
	Valor	Unid
Altura da capa (hm)	4	cm
Largura inferior (bi)	7	cm
Largura superior (bs)	10	cm
Altura do molde (h)	16	cm
Altura total (ht)	20	cm
Largura colaborante (bf)	61	cm
Área da seção	380	cm ²
Área da seção	0,038	m ²

Fonte: do autor (2022).

4.2.1 Estado Limite Último

Após isso, o carregamento deve ser analisado. Como carga permanente devem ser definidos os valores de peso próprio da estrutura (g₁), revestimento (g₂) e

forro (g_3). Para a definição do peso próprio deve ser multiplicada a área da seção pelo peso específico do concreto armado, isso será mostrado na equação a seguir:

$$g_1 = A_{\text{seção}} \times \gamma_{CA} \quad (1)$$

$$g_1 = 0,038 \times 2500 = 95 \text{ kgf/m} \quad (2)$$

Onde a área é dada em metros e o peso específico em kgf/m^3 . Ademais, em relação ao revestimento e forro foram utilizadas, de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2019), os valores de 100 kgf/m^2 e 25 kgf/m^2 , respectivamente. Entretanto, como a laje será analisada linearmente, o valor dessas cargas será o produto de seus valores definidos por norma pela largura colaborante da seção. Isso será mostrado a seguir:

$$g_2 = 100 \text{ kgf/m}^2 \times 0,61 \text{ m} = 61 \text{ kgf/m} \quad (1)$$

$$g_3 = 25 \text{ kgf/m}^2 \times 0,61 \text{ m} = 15,25 \text{ kgf/m} \quad (2)$$

É interessante ressaltar, também, que em relação às cargas variáveis, como para laje maciça, foram observadas as funções arquitetônicas definidas para a laje e, segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2019) o valor de carga a ser utilizado será 150 kgf/m^2 . Esse valor também deverá ser multiplicado pela largura colaborante. Isso será mostrado na equação a seguir:

$$q = 150 \text{ kgf/m}^2 \times 0,61 \text{ m} = 91,5 \text{ kgf/m}$$

Nesse contexto, é evidente que os valores de cargas obtidos são valores característicos, portanto deve ser realizada a combinação de cargas a fim de determinar os valores de projeto, que serão utilizados no dimensionamento. Isso é feito da seguinte maneira:

$$P_d = 1,4 \times g_k + 1,4 \times q_k \quad (1)$$

$$P_d = 1,4 \times (95 + 61 + 15,25) + 1,4 \times 91,5 = 367,85 \text{ kgf/m} \quad (2)$$

Essa combinação de ações é correspondente ao estado limite último e deve ser considerada na definição do momento fletor:

$$Md = \frac{qL^2}{8} \quad (1)$$

$$Md = \frac{367,85 \times 3,91^2}{8} = 702,97 \text{ kgfm} \quad (2)$$

A partir daí, devem ser calculadas as variáveis necessárias para a definição da área de aço a ser calculada para a laje. Pelo fato da laje nervurada também ser unidirecional, o momento relevante para o dimensionamento foi o calculado considerando o menor vão. Diante disso, esse momento será utilizado na equação a seguir para descoberta da seção de aço:

$$As = \frac{Md}{fyd \times (d - 0,4x)}$$

É possível observar, que são necessárias a definição das outras variáveis. O aço escolhido será o CA50, portanto sua tensão de escoamento será de 500 MPa. Diante disso, considerando o coeficiente de minoração, ficará da seguinte maneira:

$$fyd = \frac{fyk}{1,15} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} \rightarrow 434,78 \times 10^3 \text{ kPa}$$

Além disso, foi elaborada uma tabela por intermédio da ferramenta Excel, que receberá os valores das variáveis e fornecerá a posição da linha neutra e seu domínio de atuação. Isso é mostrado na Tabela 12:

Tabela 12 – Linha Neutra.

LINHA NEUTRA		
	Valor	Unid
fck	25	MPa
bf	61	cm
d	17	cm
Md	7,03	kNm
x'	41,93	cm
x''	0,57	cm
x/d	0,03	Domínio 2

Fonte: do autor (2022).

Com a tabela é possível observar que a linha neutra está posicionada a 0,57 cm do topo da laje e a seção da laje encontra-se no domínio 2. Diante disso, é possível definir a área de aço necessária para o Estado Limite Último:

$$A_s = \frac{Md}{f_y d x (d - 0,4x)} \quad (1)$$

$$A_s = \frac{7,03}{434,78 \times 10^3 \times (0,17 - 0,4 \times 0,57)} \quad (2)$$

$$A_s = 0,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,96 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

4.2.2 Estado Limite de Serviço

Para o estado limite de serviço, utilizando as cargas definidas anteriormente, deve ser realizada a combinação de ações utilizando o coeficiente de majoração característico dessa etapa (ψ_2) que terá valor 0,3 devido às características da edificação, de acordo com a tabela 3. Diante disso, o carregamento de projeto será determinado da seguinte maneira:

$$Pd = g_k + 0,3 \times q_k \quad (1)$$

$$Pd = (95 + 61 + 15,25) + 0,3 \times 91,5 = 198,7 \text{ kgf/m} \quad (2)$$

Nesse contexto, a próxima etapa é definir a deflexão inicial, para isso, os valores do módulo de elasticidade inicial, coeficiente α_i , e módulo de elasticidade secante, devem ser definidos:

$$E_{ci} = \alpha_e \times 5600 \times f_{ck} \quad (1)$$

$$E_{ci} = 1 \times 5600 \times 25 \quad (2)$$

$$E_{ci} = 28000 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \quad (4)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{30}{80} \quad (5)$$

$$\alpha_i = 0,862 \quad (6)$$

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (7)$$

$$E_{cs} = 0,875 \times 28000 \quad (8)$$

$$E_{cs} = 24150 \text{ MPa} \quad (9)$$

É importante destacar, também, que deve ser determinado o momento de inércia. Este será calculado com a utilização do *software* Unicalc e dependerá de fatores, como área de aço, módulo de elasticidade secante, características da seção, dentre outros. Diante disso, a figura 12 mostra esse processo.

Figura 12 – Cálculo da inércia de Branson.

Geometria

Seção T

bw (cm) 8,5 bfs (cm) 61 bfi (cm) 0

hw (cm) 16 hfs (cm) 4 hfi (cm) 0

Passiva d (cm) 17 Ativa d (cm) 0

d' (cm) 0 d' (cm) 0

Aço

As (cm²) 0,96 Ap (cm²) 0 ε_{pré} (%) 0

As' (cm²) 0 Ap' (cm²) 0 ε'_{pré} (%) 0

Es (MPa) 210000 Ep (MPa) 195000

Concreto

Ecs (MPa) C25 24150

Esforços em serviço

Mk 3,80 kN.m

Nk 0 kN

(-) tração
(+) compressão

Calcular

ELS-W ELS-DEF

Resultados

Estádio I

x (cm) 5,58

A (cm²) 380

I (cm⁴) 11959,3

Estádio II

x (cm) 2,02 σ_c (MPa) 3,77

I_{||} (cm⁴) 2040,85 σ_s (MPa) -242,47 σ_{s'} (MPa) 0

I_{||}/I 0,17 σ_p (MPa) 0 σ_{p'} (MPa) 0

Estádio I homogeneizado

x_h (cm) 5,8 A_h (cm²) 387,39 I_h (cm⁴) 12904,59

Momento de fissuração

M_{fr} 2,55 kN.m

Inércia de Branson

I_{eq} 5038,03 (cm⁴) I_{eq}/I 0,42

Fonte: do autor (2022).

Diante disso, o momento de inércia será de $5038,03 \text{ cm}^4$. Com essas informações é possível realizar o cálculo da deflexão inicial. Para isso, algumas mudanças nas unidades devem ser feitas a fim de viabilizar a equação.

Nesse contexto, a unidade para carga (q) será kN/m^2 , o vão considerado (L) em metros, o módulo de elasticidade secante (Ecs) em kPa e o momento de inércia equivalente (I_{eq}) em m^4 . A equação será mostrada a seguir:

$$w_0 = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times Ecs \times I_{eq}} \quad (1)$$

$$w_0 = \frac{5 \times 1,99 \times 3,91^4}{384 \times 24150 \times 10^3 \times 5038,03 \times 10^{-8}} \quad (2)$$

$$w_0 = 0,50 \text{ cm} \quad (3)$$

Diante disso, resta definir a deflexão total e a deflexão admissível, a fim de realizar a comparação e determinar se a solução está de acordo com a norma. Para o cálculo da flecha total, é necessário a definição dos coeficientes p' , $\Delta\xi$ e αf .

Como visto no cálculo da armadura, não foi necessário o uso de armadura complementar, portanto ρ' apresenta valor nulo.

Em relação ao $\Delta\xi$, os parâmetros utilizados foram os mesmos da solução anterior, o tempo inicial considerado como tempo de desforma (1 mês), e o tempo final 70 meses.

É interessante ressaltar, também, que os valores utilizados para definição desse parâmetro estão de acordo com a tabela 6. O cálculo se apresentará da seguinte maneira:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (1)$$

$$\Delta\xi = \xi(70) - \xi(1) \quad (2)$$

$$\Delta\xi = 2 - 0,68 = 1,32 \quad (3)$$

Finalmente, o coeficiente αf pode ser definido:

$$\alpha f = \frac{\Delta\xi}{1 + \rho'} \quad (1)$$

$$\alpha f = \frac{1,32}{1 + 0} = 1,32 \quad (2)$$

É importante destacar que esses coeficientes são adimensionais.

Portanto, a flecha solicitante e a admissível podem ser calculadas, utilizando os parâmetros definidos anteriormente:

$$w_{\infty} = (1 + \alpha f) \times w_0 \quad (1)$$

$$w_{\infty} = (1 + 1,32) \times 0,50 = 1,15 \text{ cm} \quad (2)$$

$$w_{\text{admissível}} = \frac{L}{350} \quad (3)$$

$$w_{\text{admissível}} = \frac{391}{250} = 1,56 \text{ cm} \quad (4)$$

Tabela 16 – Planilha de dimensionamento da laje maciça

	LAJE MACIÇA				UNID
	FCK 25	FCK 25	FCK 25	FCK 25	
	h = 10	h = 11	h = 12	h = 13	
As	5.19	4.64	4.24	3.93	cm ² /m
Md	1.41	1.48	1.55	1.61	tfm
wt	2.52	1.49	0.95	0.79	cm
w admis	1.56	1.56	1.56	1.56	cm

Fonte: do autor (2022)

Com o exposto, é possível observar que a laje com 10 cm de espessura não apresentou resultados satisfatórios, apresentando a deflexão total menor que a permitida por norma, esse resultado está destacado com a cor vermelha na tabela. Portanto, a seção que melhor atende aos requisitos de segurança e proporciona maior economia de material é a de altura 11cm, sendo assim, a melhor opção para esse tipo de solução estrutural.

Ademais, no que se refere à laje nervurada. A seção escolhida também atendeu aos parâmetros da norma. Pelo fato da seção ser a menor do mercado menor encontrada no mercado, esta se apresenta a melhor opção para execução (Impacto, 2017).

4.4 Comparativo

As duas soluções devem ser comparadas a fim de observar as diferenças entre as duas soluções adotadas, no que se refere ao ELU, ELS e quantitativo.

Portanto, a Tabela 17 indica a diferença entre as soluções encontradas de acordo com o ELU e ELS:

Tabela 17 – Comparativo entre soluções.

	LAJE MACIÇA	LAJE NERVURADA	UNIDADE
	h = 11	16 + 4	
Md	1.48	0.70	tfm
wt	1.49	1.15	cm
w admis	1.56	1.56	cm

Fonte: do autor (2022).

Diante disso, de acordo com a Tabela 17, a solução com laje nervurada proporcionou a redução de 52,5% do momento fletor, além da redução de 22,8% da deflexão total. Isso revela que a laje com nervuras apresenta melhor desempenho estrutural mostrando resultados mais satisfatórios no estado limite último e estado limite de serviço.

É importante destacar, também, que não faz parte do escopo deste projeto o detalhamento completo da laje em questão, a fim de comparar a quantidade de aço utilizada para cada solução foi levado em consideração somente a armadura principal.

Diante disso, a partir da área de aço definida no dimensionamento (4,64 cm²/m para laje maciça e 0.96 cm²/nervura para laje nervurada), foram utilizadas as Tabelas 18 e 19 para prever a quantidade de aço necessária para armar a laje em estudo.

Tabela 18 – Área de aço para a seção da laje maciça.

Área de aço da seção conforme espaçamento – A_s [cm ² /m]						
Espaçamento (cm)	ϕ diâmetro (mm)					
	5	6,3	8	10	12,5	16
7,5	2,67	4,20	6,67	10,67	16,67	26,67
10,0	2,00	3,15	5,00	8,00	12,50	20,00
12,5	1,60	2,52	4,00	6,40	10,00	16,00
15,0	1,33	2,10	3,33	5,33	8,33	13,33
17,5	1,14	1,80	2,86	4,57	7,14	11,43
20,0	1,00	1,58	2,50	4,00	6,25	10,00
22,5	0,89	1,40	2,22	3,56	5,56	8,89
25,0	0,80	1,26	2,00	3,20	5,00	8,00
27,5	0,73	1,15	1,82	2,91	4,55	7,27
30,0	0,67	1,05	1,67	2,67	4,17	6,67

Fonte: Carvalho e Figueredo Filho (2014).

Tabela 19 – Área de aço para a seção da laje nervurada.

Valor nominal para cálculo		Área de aço da seção conforme número de barras – A_s [cm ²]									
ϕ diâmetro (mm)	massa linear (kg/m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5,0	0,16	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
6,3	0,25	0,315	0,63	0,945	1,26	1,575	1,89	2,205	2,52	2,835	3,15
8,0	0,40	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
10,0	0,63	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,80
12,5	1,00	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50
16,0	1,60	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
20,0	2,50	3,15	6,30	9,45	12,60	15,75	18,90	22,05	25,20	28,35	31,50
25,0	4,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
32,0	6,30	8,00	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	56,00	64,00	72,00	80,00
40,0	10,00	12,50	25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00	112,50	125,00

Fonte: Carvalho e Figueredo Filho (2014).

Nesse contexto, de acordo com o encontrado nas Tabelas 18 e 19, a distribuição de armadura para a laje maciça será $\phi 8$ c/10 (barras de aço CA-50 de 8 mm de diâmetro a cada 10 cm) e, para a laje nervurada será utilizada $2\phi 8$ c/nervura (2 barras de aço CA-50 de 8mm de diâmetro a cada nervura).

Diante disso, o software TQS foi utilizado para definir a quantidade de aço, em kg, a ser utilizada ao longo do elemento estrutural, para laje maciça e laje nervurada. Isso é mostrado nas Figuras 13 e 14, respectivamente:

Figura 13 – Tabela de aço para a laje maciça.

ELEM	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm
	50A	1	8	117	400	46800

RESUMO DE AÇO			
ACO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf
50A	8	468	185
Peso Total		50A =	185 kgf

Fonte: do autor (2022).

Figura 14 – Tabela de aço para laje nervurada.

ELEM	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm
	50A	1	8	36	400	14400

RESUMO DE AÇO			
ACO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf
50A	8	144	57
Peso Total		50A =	57 kgf

Fonte: do autor (2022).

Ademais, a quantidade de concreto também foi realizada, para a lajes maciça foi feita da seguinte maneira:

$$Vol\ conc. = comprimento \times largura \times altura \quad (1)$$

$$Vol. conc. = 11,70 \times 3,77 \times 0,11 \quad (2)$$

$$Vol. conc. = 4,85m^3 \quad (3)$$

Além disso, em relação à quantidade de concreto da laje nervurada foi definida com o auxílio do *software Excel*. Isso é mostrado na tabela 18:

Tabela 18 – Volume de concreto da laje nervurada.

LAJE NERVURADA		
	16 + 4	UNID
br	8.5	cm
h total	20	cm
h molde	16	cm
Nº de cubetas	19	
Volume	3299640	m ³
	3.30	m ³

Fonte: do autor (2022).

Em meio a isso, diante desses resultados, os dados foram organizados com o intuito de comparar as duas soluções, isso é mostrado na tabela 19.

Tabela 19 – Quantitativos.

	LAJE MACIÇA	LAJE NERVURADA	UNID
	h = 11	16 + 4	
As	4.64	0.96	cm ²
distrib.	8 c/10	2 fi 8	
As adotado	5.03	1.01	cm ²
distribuição	117 fi 8 c/10	18 x 2 fi 8 c/nerv	
peso	185	57	kg
Volume Concreto	4.85	3.3	m ³

Fonte: do autor (2022).

Portanto, é evidente a diferença entre as duas soluções no que se refere ao quantitativo. Com a tabela é possível observar a redução de 69,2% da quantidade de aço, além da redução de 31,9% do volume de concreto. Isso evidencia a economia de material proporcionada pela solução laje nervurada.

5 CONCLUSÃO

De acordo com o estudo de caso concebido, foram escolhidas duas soluções a ser dimensionadas a fim de comparar seus resultados, no que se refere à análise estrutural, em aspectos como momento fletor, área de aço, deflexão; além do quantitativo referente ao concreto e ao aço.

Diante disso, duas seções foram escolhidas para realização do dimensionamento, para laje maciça a seção com altura de 13 cm, e a seção nervurada com área de 380 cm².

Nesse contexto foi realizada a análise estrutural no estado limite último e estado limite de serviço para as duas seções escolhidas. Foi observado que as duas apresentaram resultados satisfatórios, todas as exigências normativas foram respeitadas e os resultados apresentaram estar dentro dos limites impostos pelas normas.

Além disso, foi analisada a possibilidade de redução da seção, em ambos os casos a fim de proporcionar maior economia de material. Para a solução em laje maciça foi possível reduzir a seção transversal adotando como altura 11 cm. Já, para o caso da solução em nervuras, não foi possível pelo fato do dimensionamento ter sido realizado com a menor seção possível de acordo com o mercado da região.

Portanto, é possível concluir que a seção recomendada de laje maciça para o caso em estudo é a de altura 11 cm, já para laje nervurada a opção escolhida foi a que apresentou área de 380 cm².

Em meio a isso, foi realizado um comparativo entre seus resultados. A laje nervurada apresentou uma redução de 52,5 % do momento fletor, e a deflexão total foi reduzida em 22,8%.

Ademais, também foi comparada a quantidade de concreto e aço entre as duas seções. A laje nervurada apresentou uma redução de 31,9 % no volume de concreto e 69,2 % no peso do aço utilizado com armadura principal.

Com isso, é possível concluir que a solução em nervuras é a melhor opção estrutural para a laje escolhida, pois apresentou melhor desempenho estrutural, além de economia de material.

Entretanto, deve-se levar em consideração particularidades construtivas que podem estar presentes em outras obras, como a execução em lugares remotos, onde não haveria disponibilidade de cubetas para concretagem da laje nervurada;

uma mão de obra pouco qualificada disponível favorecendo, assim, o emprego da laje maciça devido à facilidade construtiva.

Além disso, lajes maciças podem ser utilizadas de maneira mais eficientes para distribuir ações do tipo lineares como alvenarias, bem como ações distribuídas por áreas, como por exemplo, reservatórios.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4.ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro. 2004.

CARVALHO, R. C; FIGUEREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4.ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2014.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. **Estruturas de concreto armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2.ed. Brasília: Editora UNB, 2008.

IMPACTO. <http://impactoprotensao.com.br>. **Catálogo formas impacto**, 2017. Disponível em: <<http://impactoprotensao.com.br/wp-content/uploads/2018/12/catalogo-formas-TRELI%C3%87A-E-PAV-VIGA.2018.2-compressed.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2021.

HOLANDA FILHO, Francisco Stenio Rodrigues. **Análise comparativa entre uma laje nervurada convencional e uma com trilhos em concreto protendido**. 2013. 67f. TCC (Graduação) – Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

MASCARENHAS, José Manuel de. O archeduto romano de Olisipo: viabilidade ou utopia? Ensaio de traçado apoiado em modelação geográfica. **Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Instituto de História**

Econômica e Social. Coimbra, v43, p. 241s-263s, 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14195/0870-4147_43_12. Acesso em: 10 abr. 2021.

MARQUES, Eduardo Dias. **Análise comparativa de um edifício de múltiplos pavimentos, com adoção de três diferentes tipos de lajes em concreto armado (maciça, nervurada e treliçada)**. 2017. 56f. TCC (Graduação) - Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, 2017.