



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FRANCISCO STENIO RODRIGUES HOLANDA FILHO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UMA LAJE NERVURADA CONVENCIONAL E
UMA COM TRILHOS EM CONCRETO PROTENDIDO**

FORTALEZA

2013

FRANCISCO STENIO RODRIGUES HOLANDA FILHO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UMA LAJE NERVURADA CONVENCIONAL E
UMA COM TRILHOS EM CONCRETO PROTENDIDO**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tereza Denyse Pereira de Araújo

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F893a Francisco Stenio Rodrigues, Holanda Filho.
Análise comparativa entre uma laje nervurada convencional e uma com trilhos em concreto protendido / Holanda Filho Francisco Stenio Rodrigues. – 2013.
67 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.
Orientação: Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo.
1. Laje nervurada. 2. Concreto protendido. 3. Método dos elementos finitos. 4. SAP 2000. I. Título.
CDD 620
-

FRANCISCO STENIO RODRIGUES HOLANDA FILHO

**ANÁLISE DA COMPARATIVA ENTRE UMA LAJE NERVURADA
CONVENCIONAL E UMA COM TRILHOS EM CONCRETO PROTENDIDO**

**Trabalho apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.**

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Tereza Denyse Pereira de Araújo (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Yuri Cláudio Vieira da Costa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a figura mais próxima de Deus para mim na Terra, minha mãe Rosângela.

À minha namorada Natália por todo o amor e companheirismo.

Ao meu pai Stenio por ter ensinado e me formado a pessoa que sou hoje.

À minha família, principalmente, avó Railda, meus tios, tias, primos e parentes.

À minha avó Estela (*in memoriam*) que sempre torceu por mim e estaria muito feliz na chegada desta data. Ela faz muita falta.

À Prof.^a Tereza Denyse Pereira de Araújo por todas as oportunidades que tive de aprender com ela e por ter me ajudado quando mais precisei.

Ao Engenheiro Yuri Cláudio pelo auxílio na execução deste trabalho.

Aos meus amigos da faculdade que me ajudaram em todos esses anos.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

Diversas obras de engenharia são realizadas a todo momento seguindo fielmente um determinado projeto. Porém, em alguns casos esses projetos são alterados em decorrência de condições específicas a qual a obra está submetida. No interior dos estados essa realidade é ainda mais perceptível. Por isso é importante analisar as diferenças entre os projetos originais e alterados e avaliar as vantagens ou desvantagens dessas alterações. Assim, este trabalho baseia-se em um estudo de caso de uma escola construída no interior do Ceará, onde seu projeto original contempla uma laje nervurada convencional moldada no local, mas que foi executada segundo um projeto diferente que contempla uma laje nervurada associada a trilhos em concreto protendido em uma de suas direções. O estudo compara as duas lajes em termos de esforços e deslocamentos, utilizando-se da análise pelo método dos elementos finitos através do programa SAP 2000. As duas lajes são modeladas como lajes isoladas, simplesmente apoiadas nas quatro bordas e submetidas apenas aos seus respectivos pesos próprios. Neste estudo, os resultados mostram que, em termos estruturais e geométricos, a alteração do projeto original da laje foi vantajoso, pois a laje do projeto alterado está mais a favor da segurança que a laje original, além de ter diminuído o deslocamento máximo. A laje alterada também reduziu sua altura total e o volume total de concreto.

Palavras-chave: Laje nervurada. Concreto protendido. Método dos elementos finitos. SAP 2000.

ABSTRACT

Various engineering works are carried out at all times faithfully following a particular project. However, in some cases these projects are changed due to specific conditions which the work is submitted. In the outside of the states capitals that reality is even more noticeable. So it is important to analyze the differences between the original and modified designs and evaluate the advantages and disadvantages of the changes. This work is based on a case study of a school built in Ceará, where its original design features a conventional ribbed slab molded in place, but that was executed with a distinctive design that features a ribbed slab associated with rails in prestressed concrete in one of its directions. The study compares the two slabs in terms of forces and displacements, using the finite element method through the SAP 2000 program with the two slabs as models of isolated slabs, simply supported on all four edges and subjected only to their own weights. In this study, the results show that, in structural and geometric terms, changing the original design of the slab was advantageous because the design of the changed slab is in favor of more security than the original slab and have reduced the maximum displacement. The changed slab also reduced overall height and the total concrete volume.

Keywords: Ribbed slab. Prestressed concrete. Finite element method. SAP 2000.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aqueduto Pont du Gard.....	17
Figura 2 – Basílica de Constantino.....	17
Figura 3 – Panteão Romano.....	18
Figura 4 – Coliseu.....	18
Figura 5 – Ponte Rio – Niterói.....	20
Figura 6 – Complexo hidroelétrico de Itaipu.....	20
Figura 7 – Sistema estrutural de múltiplos pavimentos.....	21
Figura 8 – Concretagem de laje maciça.....	24
Figura 9 – Aspecto dos vazios e nervuras da laje nervurada.....	25
Figura 10 – Esquema de lajes lisas.....	26
Figura 11 – Esquema de lajes - cogumelo com utilização de captéis.....	27
Figura 12 – Concretagem de uma laje nervurada.....	33
Figura 13 – Sistema de laje nervurada sem vigas.....	35
Figura 14 – Distribuição dos elementos da laje pré fabricada.....	36
Figura 15 – Laje treliça.....	36
Figura 16 – Detalhe das moças na laje tipo <i>steel deck</i>	37
Figura 17 – Cimbramento metálico.....	38
Figura 18 – Colocação das plataformas plásticas.....	39
Figura 19 – Fixação dos moldes e concretagem da laje.....	40
Figura 20 – Seção transversal da laje nervurada mais comum.....	41

Figura 21 – Seção transversal da laje nervurada invertida.....	42
Figura 22 – Seção transversal da laje nervurada dupla.....	42
Figura 23 – Seção transversal da laje nervurada meio tubo.....	43
Figura 24 – Seção transversal da laje nervurada estrutubo.....	43
Figura 25 – Seção transversal da laje nervurada modulada.....	43
Figura 26 – Estutura discretizada.....	45
Figura 27 – Laje nervurada original.....	48
Figura 28 – Detalhe das nervuras da laje original.....	49
Figura 29 – Laje nervurada alterada.....	51
Figura 30 – Detalhe da seção da laje nervurada alterada na direção y.....	52
Figura 31 – Interface do SAP 2000.....	53
Figura 32 – Opções de modelo inicial do programa.....	54
Figura 33 – Seleção das propriedades do material.....	55
Figura 34 – Seleção das restrições dos nós.....	55
Figura 35 – Atribuição das cargas na estrutura.....	56
Figura 36 – Definição dos graus de liberdade.....	56
Figura 37 – Definição das combinações de carga que serão analisadas.....	57
Figura 38 – Resultados em forma de gráfico.....	57
Figura 39 – Resultados em forma de tabela.....	58
Figura 40 – Detalhe das nervuras da (a) laje original e da (b) laje alterada no SAP 2000.....	59
Figura 41 – Orientação dos eixos locais adotados para os sólidos.....	60
Figura 42 – Comparação entre máximas tensões positivas nas lajes.....	61

Figura 43 – Comparação entre máximas tensões negativas nas lajes.....	62
Figura 44 – Comparação entre deslocamentos máximos nas lajes.....	63
Figura 45 – Comparação entre os volumes de concreto das lajes.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso específico dos materiais de construção.....	31
Tabela 2 – Máximas tensões positivas atuantes em cada laje.....	60
Tabela 3 - Máximas tensões negativas atuantes em cada laje.....	61
Tabela 4 – Máximo deslocamento das lajes.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	14
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Estrutura do trabalho.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	O histórico do concreto armado.....	16
2.1.1	<i>O advento dos materiais cimentícios nas antigas civilizações.....</i>	16
2.1.2	<i>O surgimento do concreto armado.....</i>	18
2.1.3	<i>A evolução do concreto armado no Brasil.....</i>	19
2.2	Aspectos gerais sobre placas e lajes.....	21
2.2.1	<i>Definição e considerações iniciais.....</i>	21
2.2.2	<i>Sistemas estruturais usuais com lajes em concreto armado.....</i>	22
2.2.2.1	<i>Sistema estrutural utilizando lajes maciças.....</i>	23
2.2.2.2	<i>Sistema estrutural utilizando lajes nervuradas.....</i>	24
2.2.2.3	<i>Sistema estrutural utilizando lajes lisas e lajes-cogumelo.....</i>	25
2.2.3	<i>Ações atuantes nas estruturas.....</i>	28
2.2.3.1	<i>Ações permanentes.....</i>	28
2.2.3.2	<i>Ações variáveis.....</i>	29
2.2.3.3	<i>Ações excepcionais.....</i>	30

2.2.4	<i>Ações usuais atuantes nas lajes</i>	30
2.3	Lajes nervuradas.....	32
2.3.1	<i>Definição</i>	32
2.3.2	<i>Considerações iniciais</i>	32
2.3.3	<i>Vantagens e desvantagens da utilização de lajes nervuradas</i>	34
2.3.4	<i>Lajes nervuradas pré-fabricadas</i>	35
2.3.5	<i>Lajes nervuradas moldadas no local</i>	37
2.3.5.1	<i>Tipos de lajes nervuradas moldadas no local</i>	40
2.3.6	<i>Protensão em lajes nervuradas</i>	44
2.3.6.1	<i>Classificação quanto ao estiramento da armadura de protensão</i>	44
2.4	Definição e introdução ao método dos elementos finitos.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1	Laje nervurada original.....	47
3.2	Laje nervurada alterada.....	50
3.3	Utilização do SAP 2000.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o homem vem mudando seus costumes e suas ideologias. Isso faz parte da constante evolução que o mundo vem passando. Para seguir alcançando novas etapas em seu processo evolutivo, o ser humano se reproduz e consome os recursos ofertados na natureza de maneira descontrolada. Isso vem causando diversos danos ao meio ambiente e, ao mesmo tempo, têm reduzido drasticamente os espaços disponíveis para que o homem exerça suas atividades. Este cenário é bastante perceptível, principalmente nas grandes metrópoles, que refletem a acirrada disputa a que estão submetidas as mais diversas entidades, tendo por objetivo assegurar minúsculos pedaços de terra para erguer suas construções.

Essa sufocante competição tem induzido o homem a verticalizar suas cidades para aproveitar cada vez mais os espaços disponíveis. Deste modo, a engenharia vem sofrendo diversas mudanças. Tais mudanças estão associadas aos vários materiais e técnicas construtivas que o homem vem descobrindo e, que com o passar do tempo, têm sido melhoradas para que as construções possam acompanhar e atender as necessidades do homem.

A partir da união entre o concreto e o aço, surgiu um dos materiais mais utilizados nas construções de todo o planeta. Dentre os diversos materiais e técnicas construtivas desenvolvidas pelo homem é notório a utilização do concreto armado que está entre os materiais mais importantes da humanidade, pois possibilitou a construção de edifícios e a maioria das principais obras que o homem necessita para viver. Diante de um material tão importante para a história da construção civil é natural que existam diversos estudos sobre o mesmo.

As obras em concreto armado são compostas por diversos elementos estruturais que trabalham em conjunto para manter a construção erguida. Dentre estes elementos está a laje. Este é o elemento estrutural que recebe primordialmente as cargas que atuam na estrutura para depois distribuí-las às vigas, aos pilares e às fundações.

Assim, a necessidade de vencer maiores vãos e reduzir custos levou o homem a inovar nas técnicas de execução das lajes. Deste modo, foram criados diversos tipos de lajes em concreto armado e, dentre elas, a laje nervurada. Este tipo de laje é bastante utilizado no Brasil e no mundo, por isso merece um papel de destaque.

Apesar de ser bastante difundida no Brasil, a laje nervurada necessita de vários tipos de materiais para a sua execução, que nem sempre estão disponíveis em todas as localidades do país, principalmente no interior dos estados. Por esse motivo, ainda existem

obras que são construídas alterando seus projetos originais, mediante a disponibilidade de materiais que se encontram na região. Deste modo, este trabalho visa mostrar uma análise comparativa, em termos de esforços e deslocamentos de uma laje nervurada com trilhos em concreto protendido que foi utilizada na construção de uma escola no interior do Ceará e a laje nervurada original do projeto da mesma obra.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar de maneira comparativa, em termos de esforços e deslocamentos uma laje nervurada com trilhos em concreto protendido, que foi executada na construção de uma escola no interior do estado do Ceará e a laje nervurada que está contemplada no projeto original da mesma obra.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, é necessário atender aos seguintes objetivos específicos:

- a) Apresentar a origem do concreto armado e o histórico das lajes nervuradas, assim como os tipos existentes, sua aplicabilidade nas obras, suas vantagens e desvantagens;
- b) Modelar as duas lajes (original e alterada) utilizando o programa SAP 2000;
- c) Comparar esforços e deslocamentos da laje original e da laje alterada através do método dos elementos finitos utilizando o programa SAP 2000;
- d) Apresentar considerações avaliando as vantagens e desvantagens na alteração do projeto.

1.2 Justificativa

No Brasil, principalmente no interior dos Estados, ainda existem diversas obras que são executadas mediante alterações em seus projetos originais. Por esse motivo, muitas construções são erguidas de modo diferente em relação a seu planejamento inicial.

Mediante o cenário descrito, é importante analisar como se comportam as obras que estão inseridas nesta realidade para que se tenha uma noção da amplitude das divergências existentes entre os elementos presentes nas estruturas construídas e aqueles que contemplam os projetos originais das mesmas.

1.3 Estrutura do trabalho

Para a realização do objetivo principal, este trabalho está dividido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo trata-se da introdução do trabalho. Neste capítulo está presente uma breve contextualização do trabalho, os objetivos a serem alcançados, uma breve justificativa do que motivou sua execução e a estrutura na qual o mesmo está dividido.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica que está subdividida em quatro seções. A primeira seção trata-se de um breve histórico sobre o advento do concreto armado, a segunda seção discorre sobre os principais tipos de laje utilizadas no Brasil, a terceira seção trata-se especificamente das lajes nervuradas, o quarto capítulo é uma introdução superficial sobre o método dos elementos finitos.

No terceiro capítulo está a parte de materiais e métodos, onde é apresentado o estudo de caso no qual foi feito o trabalho, assim como as informações específicas das duas lajes analisadas. Neste capítulo também é apresentado uma breve apresentação do programa utilizado na análise das lajes.

No quarto capítulo são apresentados os resultados encontrados na análise das lajes através de gráficos.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, uma pequena discussão sobre os resultados encontrados e as sugestões para próximos trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O histórico do concreto armado

2.1.1 *O advento dos materiais cimentícios nas antigas civilizações*

O concreto como o conhecemos hoje é um material relativamente novo. Sabe-se que os primeiros materiais utilizados nas construções foram a pedra natural e a madeira, os quais eram facilmente encontrados na natureza. Porém, a utilização desses materiais evidenciou também seus pontos fracos, como no caso da madeira que contribuiu para vários desastres causados por incêndios por ser um material de fácil combustão. Por isso, as antigas civilizações buscaram materiais que se mostrassem mais adequados em diferentes tipos de construção, de modo que desde as primeiras experiências com alvenarias feitas com a utilização de pedras naturais, buscava-se um material com a capacidade de unir, de forma coesa, esses minerais. Assim, de acordo com Carvalho (2008), inicialmente estas civilizações fizeram uso da argila e da argamassa de barro, para, posteriormente, fazerem uso de uma argamassa com maior resistência e durabilidade, a argamassa de cal. Foi nesse contexto que se deu início a história do cimento e do concreto, na busca por encontrar aglomerantes eficientes para que fossem aplicados nas argamassas utilizadas nas alvenarias. A partir disso, os materiais cimentícios obtiveram destaque, tendo grande importância nas mais diversas construções, sendo os romanos o povo que mais se destacou dentre as civilizações antigas.

Segundo Bastos (2006), os romanos eram um povo pragmático e, por possuírem uma mentalidade aberta e receptiva, copiavam e adaptavam tudo que consideravam útil dos povos conquistados. Por conta desta mentalidade, houve o surgimento de uma poderosa indústria da construção, com uma legislação para regular alguns aspectos, normas de serviços obrigatórios e mão de obra, bem como para o controle da qualidade dos materiais. Assim, os romanos conseguiram unificar as técnicas construtivas em todo o império, de maneira que as vantagens dos sistemas construtivos locais eram mantidas. Essa indústria formada em Roma possibilitou o surgimento de inúmeras construções com as mais variadas formas e com dimensões nunca vistas até então. Com a utilização do concreto que era produzido e outros materiais presentes na época, os romanos foram capazes de executar obras que revolucionaram a arquitetura conhecida pelo homem.

Alguns dos exemplos mais famosos dessas construções são o aqueduto Pont du Gard (Figura 1), a Basílica de Constantino (Figura 2), o Panteão Romano (Figura 3) e o Coliseu (Figura 4).

Figura 1 - Aqueduto Pont du Gard



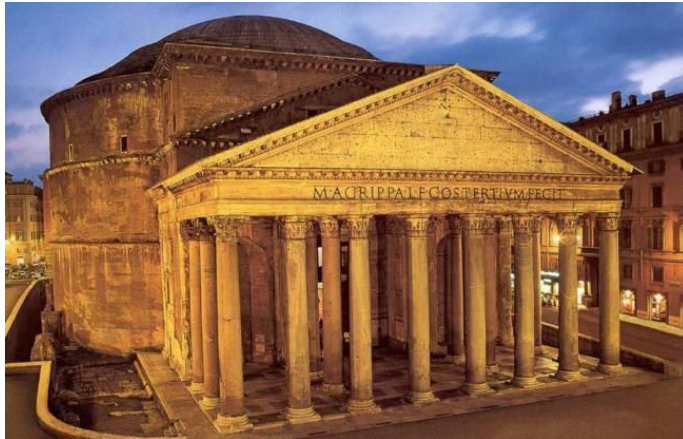
FONTE: Sousa (2011).

Figura 2 - Basílica de Constantino



FONTE: Pereira (2012).

Figura 3 - Panteão Romano



FONTE: Dornelles (2012).

Figura 4 - Coliseu



FONTE: Becker (2012).

2.1.2 O surgimento do concreto armado

À medida que as civilizações evoluíam, as tentativas de melhorar suas técnicas construtivas refletiam na busca por materiais que pudessem atender a necessidade de ir além do que havia sido realizado até então. Para isso, eram necessários materiais que aliassem os pontos fortes daqueles que já eram utilizados a atributos de outros ainda não explorados. O material ideal para se construir seria aquele que apresentasse conjuntamente as qualidades de resistência e durabilidade. A pedra, que era um material extremamente utilizado, apresentava alta resistência à compressão, porém baixa resistência à tração. Já a

madeira, tem uma resistência mediana, mas apresenta uma durabilidade muito condicionada ao ambiente a qual está exposta. O ferro e o aço também apresentam grande resistência, porém estes são de difícil manuseio e sua durabilidade é limitada em razão da corrosão que podem sofrer (BASTOS, 2006).

O engenheiro John Smeaton, em 1758, concluiu a partir de uma investigação sobre materiais aglomerantes para a construção de um farol que o cimento hidráulico, obtido de uma mistura de calcário e argilas, era muito superior ao de calcário puro. A partir disso, em 1791, o engenheiro James Parker produziu um cimento que teve grande aceitação por sua excelente qualidade, atribuindo o nome de “Cimento Romano”. Tempos depois, em 1824, Joseph Aspdin inventou o cimento Portland (CARVALHO, 2008).

Após os eventos citados, este produto ganhou espaço no mercado e passou a ser utilizado em argamassas e peças de concreto. Até que em 1849, o agricultor francês Joseph Louis Lambot, utilizou um sistema que associava o concreto com barras de aço como reforço para construir um barco. O francês aproveitou o mesmo sistema que utilizava para construir tanques, reforçando o concreto com barras de ferro. Este barco foi patenteado em 1855 e apresentado na Feira Mundial de Paris. O tipo de concreto utilizado na fabricação do barco ficou conhecido como ferro-cimento ou cimento armado. A partir disso o concreto sofreu muitas mudanças e variações ao longo da história até se tornar o concreto armado como é conhecido hoje (CARVALHO 2008).

2.1.3 A evolução do concreto armado no Brasil

No Brasil, a utilização do chamado “cimento armado” tem seus primeiros registros entre os anos de 1901 e 1904, onde foram construídas galerias de água e algumas casas em Copacabana. Um dos edifícios mais antigos do Brasil, localizado em São Paulo, data de 1907 em que foram executados 3 pavimentos em concreto armado. Já em 1910, foi construída uma ponte com 28 metros de comprimento, na Av. Pereira Rebouças sobre o Ribeirão dos Machados.

Desde então, foram construídas diversas obras de grande expressão no Brasil com a utilização do concreto armado, como é o caso da Ponte Rio-Niterói (Figura 5) que, segundo Velloso (2011), é a maior ponte já construída no Brasil com 13,29 quilômetros de extensão, e do Complexo Hidroelétrico de Itaipu (Figura 6) que é uma das maiores usinas geradoras de energia do mundo.

Figura 5 - Ponte Rio-Niterói



FONTE: Trindade (2010).

Figura 6 - Complexo Hidroelétrico de Itaipu



FONTE: Trindade (2010).

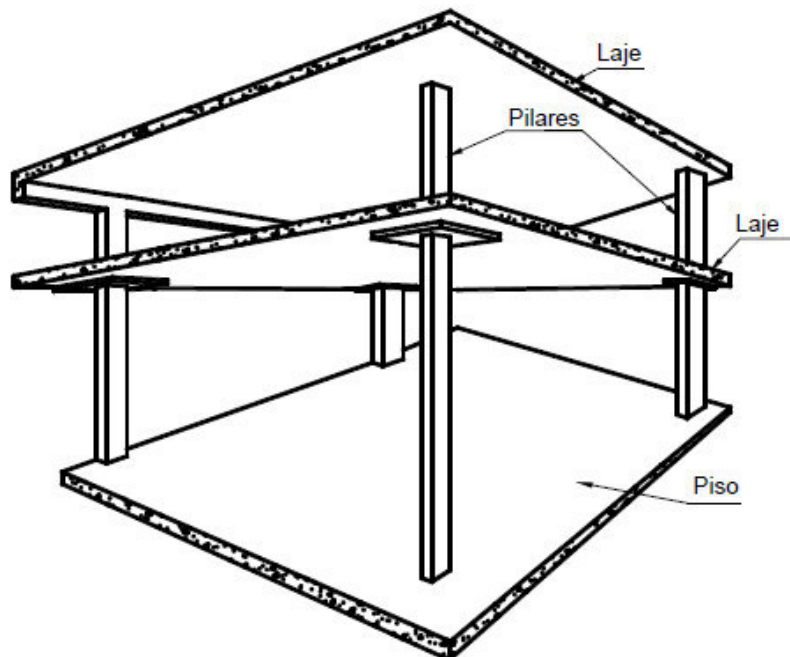
2.2 Aspectos gerais sobre placas e lajes

2.2.1 Definição e considerações iniciais

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), no item 14.4.2.1, as placas são definidas como elementos bidimensionais em que suas dimensões planas (largura e comprimento) são muito maiores do que a espessura, de maneira que as forças que atuam sobre sua superfície são predominantemente perpendiculares ao seu plano médio.

Nas construções usuais em concreto armado, as placas são elementos estruturais capazes de suportar ações verticais que geram momentos fletores e esforços cortantes. Além disso, placas também têm a função de colaborar com a estabilidade da estrutura, visto que atuam como elementos de ligação e distribuem as ações horizontais atuantes entre os sistemas de contraventamento, como é o caso dos pórticos. As placas são denominadas de lajes quando são feitas em concreto armado e utilizadas em edificações (Figura 7) (SILVA, 2005).

Figura 7 - Sistema estrutural de múltiplos pavimentos



FONTE: Adaptado de Bastos (2006).

Em estruturas de concreto armado convencionais, o sistema mais empregado é o que distribui as cargas atuantes utilizando lajes, vigas, pilares e fundações. Deste modo, as lajes são os elementos que recebem diretamente as cargas atuantes, sejam elas permanentes ou variáveis, de forma que estas são distribuídas primeiramente para as vigas, em seguida para os pilares até finalmente atingirem as fundações. Isso torna a laje um elemento de extrema importância para a distribuição das cargas em toda estrutura. Por isso, a laje deve ser analisada criteriosamente para que a finalidade da obra que se deseja construir não seja prejudicada por uma escolha errônea do tipo e das dimensões atribuídas a este elemento. Além disso, o tipo de laje deve ser avaliado cuidadosamente em relação ao seu custo de execução, pois, de acordo com Franca e Fusco (1997) *apud* Silva (2005), em estruturas convencionais, o volume de concreto utilizado na execução das lajes pode chegar a representar cerca de dois terços do consumo total da edificação. Isso representa uma grande parcela nos custos de execução da obra.

De acordo com o exposto, não apenas por estarem presentes na maioria das construções e desempenharem papel fundamental no que diz respeito a distribuição das cargas e a estabilidade global das estruturas, as lajes devem ser cuidadosamente escolhidas e analisadas também por representarem uma grande parcela nos custos de execução das obras.

2.2.2 Sistemas estruturais usuais com lajes em concreto armado

Existem diversos tipos de sistemas estruturais que são utilizados nas construções. Porém, existem aqueles que são mais frequentemente utilizados por possuírem uma modelagem mais simplificada e atenderem de forma satisfatória grande parte da demanda de obras. São eles: sistema estrutural utilizando lajes maciças, sistema estrutural utilizando lajes nervuradas, sistema estrutural utilizando lajes lisas e lajes-cogumelo. As lajes que compõem esses sistemas ainda se dividem em lajes que são moldadas no local e as que são pré-fabricadas. As moldadas no local são aquelas em que todas as etapas de execução são feitas no próprio local de utilização, enquanto as pré-fabricadas são executadas fora de seu local definitivo (normalmente em fábricas especializadas) e depois colocadas onde se deseja utilizar.

2.2.2.1 Sistema estrutural utilizando lajes maciças

O sistema que utiliza lajes maciças é aquele que possui lajes, geralmente retangulares, onde todas as suas dimensões são completamente preenchidas por concreto e sua espessura se mantém constante ao longo de seu comprimento e de sua largura. Neste sistema, as lajes são apoiadas por vigas, tanto periféricas como internas, responsáveis por absorver as cargas que atuam na placa, assim como o próprio peso da laje. Dessa forma, de acordo com Silva (2002), este sistema confere uma maior rigidez pois, devido a maior presença de vigas, há a formação de pórticos, que são elementos de contraventamento, tanto no plano do pavimento como espacialmente.

Este sistema é o mais antigo e o mais tradicional, por isso é o mais empregado em construções de pequeno e médio porte, já que estas geralmente não apresentam grandes vãos a serem vencidos. Além disso, por ser um sistema tradicional, não necessita de mão-de-obra especializada e seu modo de execução já está bem implantado nos canteiros de obra, fazendo com que os trabalhadores da construção civil já estejam bem familiarizados com o mesmo. Outra vantagem desse tipo de laje, segundo Silva (2005), é sua versatilidade. Pois é possível embutir certos tipos de instalações em seu interior, além de telas metálicas, devido ao total preenchimento de sua espessura.

Quando utilizado para vencer grandes vãos, este sistema torna-se menos interessante. Isso ocorre pelo fato de que a laje maciça é totalmente preenchida por concreto. Assim, a medida que os vãos entre as vigas aumentam, torna-se necessário que a rigidez da laje também aumente, refletindo em um acréscimo em sua espessura, aumentando com isso o peso próprio da estrutura. Além disso, os custos para a execução das lajes também aumenta, inviabilizando economicamente o sistema (SILVA, 2002).

A execução de um sistema estrutural que utiliza lajes maciças em concreto armado é feita através de fôrmas para moldar o concreto e um sistema de escoramento para sustentar tais fôrmas. Primeiramente, é feito um sistema de cimbramento composto por escoras, que podem ser de madeira ou metálicas, com a função de sustentar as fôrmas que são posicionadas para receber o concreto. Estas fôrmas, geralmente feitas de madeira, recebem as armaduras e outros elementos, como é o caso dos eletrodutos das instalações elétricas. Após todos os elementos terem sido alocados, o sistema é concretado (Figura 8). Após a concretagem e passado o tempo de cura do concreto, as fôrmas podem ser

retiradas e reutilizadas em outro pavimento. Isso garante certa economia em construções em que há repetição de pavimentos.

Figura 8 - Concretagem de laje maciça



FONTE: Próprio Autor (2012).

2.2.2.2 Sistema estrutural utilizando lajes nervuradas

O comportamento estrutural do sistema que utiliza lajes nervuradas é similar ao apresentado no sistema utilizando lajes maciças. As lajes recebem as cargas atuantes, as transferem para as vigas, em seguida aos pilares e às fundações. Contudo, a laje utilizada nesse sistema é bem diferente da anterior. Esta laje possui nervuras ao longo de suas dimensões onde se localizam as zonas de tração para os momentos positivos. Por isso, este elemento é chamado de laje nervurada.

Este tipo de sistema vem sendo cada vez mais utilizado, por ser capaz de vencer grandes vãos, aliando rapidez e economia. Sendo essa última a grande vantagem desse sistema em relação ao anterior. Isso porque as dimensões deste tipo de laje não são totalmente preenchidas por concreto, ocasionando o aparecimento de vazios que separam as nervuras (Figura 9). Dessa forma, o volume de concreto necessário para a execução deste tipo de laje torna-se menor, o que gera uma diminuição nos custos. Porém a

utilização das lajes nervuradas só constituem vantagem a partir de determinadas dimensões de vãos, onde a altura necessária de uma laje maciça se tornaria inviável. Este tipo de laje será melhor abordado no tópico 2.3.

Figura 9 - Aspecto dos vazios e nervuras da laje nervurada

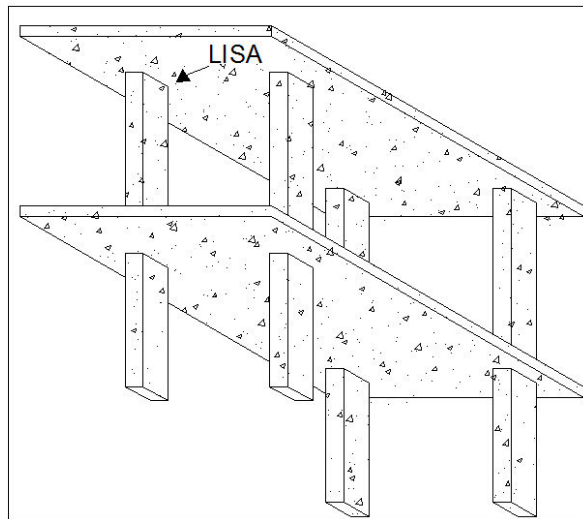


FONTE: Próprio Autor (2013).

2.2.2.3 Sistema estrutural utilizando lajes lisas e lajes-cogumelo

De acordo com o item 14.7.8 da NBR 6118 (ABNT, 2003), as lajes do tipo cogumelo são aquelas que se apoiam nos pilares por intermédio de capitéis, enquanto as lisas apoiam-se diretamente sobre os pilares sem a necessidade de capitéis (Figura 10). Além disso, a análise estrutural de ambas necessita da aplicação de procedimentos numéricos adequados, como por exemplo o método dos elementos finitos.

Figura 10 - Esquema de lajes lisas



FONTE: Próprio Autor (2013).

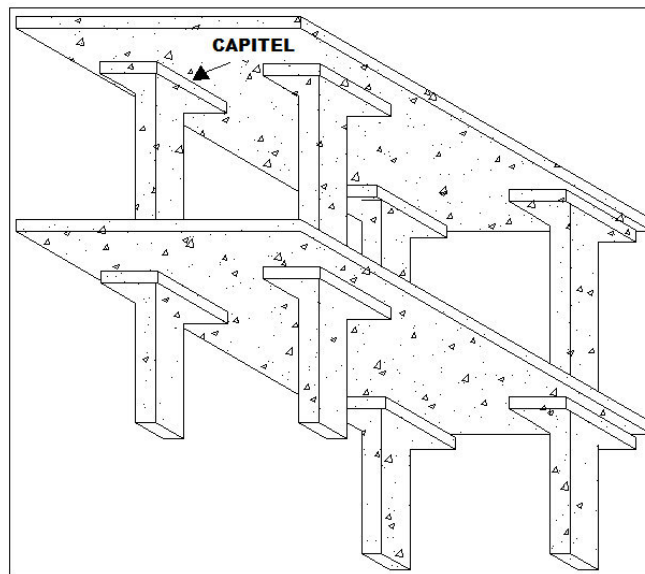
Em sistemas estruturais mais tradicionais, normalmente, as cargas atuantes são aplicadas primeiramente nas lajes, que, por sua vez, apoiam-se em vigas e transmitem as cargas para estes elementos. As vigas apoiam-se nos pilares e estes nas fundações, de modo que as cargas são transmitidas em sequência para cada um dos elementos. Porém, em sistemas estruturais que utilizam lajes-cogumelo e lajes lisas, esta sequência não se aplica. Isso ocorre porque nesses dois tipos de sistema não há a presença de vigas intermediárias, fazendo com que as lajes estejam apoiadas diretamente sobre os pilares. Assim, as cargas da estrutura incidem sobre as lajes, que, por sua vez, as transmitem diretamente para os pilares e estes para as fundações (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Devido a ausência de vigas intermediárias, a ligação entre a laje e os pilares torna-se uma região de muita fragilidade. Isto ocorre porque as forças que atuam nesta região de ligação concentram-se em pequenas áreas, diferentemente do modelo tradicional em que as forças são distribuídas ao longo das vigas. Assim, este tipo de sistema deve ser muito bem dimensionado para que a ligação entre os pilares e a laje não sofram o fenômeno da punção.

O fenômeno da punção de uma placa, de acordo com Melges (1995), é a sua perfuração causada pela reação do pilar que gera grandes tensões de cisalhamento ocasionadas pela concentração de forças em uma pequena área, sendo esta a região de ligação entre os pilares e a laje. Dessa maneira, é necessário que o pilar esteja rigidamente

conectado à laje, sendo essa a principal preocupação quando se executa esse tipo de sistema. Para garantir uma adequada ligação podem ser utilizados alguns métodos, como é o caso da colocação de armaduras transversais na região da laje próxima ao pilar e da execução de capitéis (Figura 11).

Figura 11 - Esquema de lajes-cogumelo com utilização de capitéis



FONTE: Próprio Autor (2013).

O captiel é um dos recursos utilizados para aumentar a rigidez e para diminuir as tensões na região de ligação do pilar com a laje. O mesmo é caracterizado por uma aumento na seção do pilar. Já quando há o engrossamento da laje na região de ligação, dá-se o nome de ábaco.

Apesar da preocupação com o fenômeno da punção, este tipo de sistema estrutural apresenta muitas vantagens quando comparado com os anteriores. Essas vantagens se dão em decorrência da ausência de vigas na estrutura, pois estes elementos demandam grande mão-de-obra e interferem na execução de outros serviços. Além disso, os ambientes formados nesse tipo de estrutura tornam-se mais dinâmicos pois permitem uma maior variedade de distribuição dos espaços, já que as divisórias não estão condicionadas a localização das vigas.

Também existem diversas vantagens quando se analisa a execução e os custos empregados nesse sistema. A diminuição do cimbramento e das fôrmas facilitam bastante os serviços, assim como a menor incidência de cortes nas fôrmas evitam um maior

disperdício das mesmas. Também deve ser considerada a maior facilidade no momento da retirada das fôrmas, pois sem a necessidade de removê-las das vigas há uma diminuição da chance de quebra do material, o que aumenta o índice de reaproveitamento das peças. Além disso, também não há a necessidade da colocação de armaduras de vigas, o que gera uma diminuição dos custos com esse tipo de material e implica na diminuição da necessidade de ferreiros para efetuar os dobramentos e os cortes necessários nas barras de aço, tornando o processo mais ágil.

O processo de execução das instalações em geral também torna-se mais simples e menos dispendioso. Uma vez que não existem vigas para interromper o caminhamentos dos dutos e das tubulações, não existirá a necessidade de passagens nem de curvas para contorná-las. Isto aumenta a velocidade dos serviços, diminui os gastos com a compra de materiais e facilita a manutenção das instalações (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Por último, os empreendimentos que são construídos com esse tipo de estrutura tornam-se mais rentáveis. Isso se dá pelo fato de que, geralmente, a altura dos edifícios está condicionada a uma limitação estabelecida por lei em cada região. Assim, as construções, na maioria dos casos, são executadas com o máximo da altura permitida por lei. A ausência de vigas diminui a altura total da construção, o que permite a adição de mais pavimentos à estrutura, em alguns casos.

2.2.3 Ações atuantes nas estruturas

As ações verticais que atuam sobre as lajes e estruturas em geral são as ações as quais estes elementos estão submetidos, ocasionando o aparecimento de esforços e deformações nos mesmos. Visto que toda estrutura possui uma finalidade e estará submetida ao carregamento de diversos tipos de materiais e corpos que entrarão em contato direta ou indiretamente com sua superfície, estas ações são muito variáveis de acordo com o tempo, dimensões da estrutura, materiais utilizados na construção e utilização dos espaços. De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003), estas ações são classificadas como permanentes, variáveis e excepcionais.

2.2.3.1 Ações permanentes

Segundo Spohr (2008), as ações permanentes são aquelas que estão presentes durante toda a vida útil da estrutura, de modo que seus valores se mantêm sempre

constantes ao longo do tempo, como é o caso do peso próprio das lajes de concreto armado. Estas ações estão divididas em ações permanentes diretas e ações permanentes indiretas.

a) Ações permanentes diretas

As ações permanentes diretas são as cargas que incidem diretamente sobre a estrutura. Esse tipo de carga contempla o peso próprio da laje, as alvenarias levantadas, os revestimentos aplicados e todos os tipos de elementos fixos.

b) Ações permanentes indiretas

As ações permanentes indiretas são aquelas geradas pela própria condição dos materiais e execução a qual a estrutura é submetida. Estando entre elas as imperfeições geométricas, a protensão no caso de estruturas protendidas e as deformações causadas pela retração dos materiais e a fluência do concreto.

2.2.3.2 Ações variáveis

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003), as ações variáveis são aquelas que ocorrem em determinados períodos da vida útil da construção, de modo que a intensidade com a qual atuam varia significativamente em torno de sua média. Estas ações são decorrentes da utilização e da finalidade da construção. Estão entre essas ações as cargas geradas pela presença das pessoas que praticam suas atividades nos ambientes da construção, assim como os móveis que são colocados e os efeitos causados pelos deslocamento dos mesmos. Também contemplam este tipo de ação a atuação do vento e das variações de temperatura, além de outras. Como este tipo de ação não ocorre sempre, são atribuídas chances do acontecimento das mesmas, por isso estas ações são divididas em ações variáveis normais e ações variáveis especiais, em função da probabilidade de seu acontecimento.

a) Ações variáveis normais

As ações variáveis normais são aquelas que têm uma grande probabilidade de ocorrer, de modo que estas serão sempre consideradas nos cálculos do projeto de um determinado tipo de obra. São as cargas originadas das mobílias e, dependendo da natureza da obra, do fluxo de veículos e de pessoas.

b) Ações variáveis especiais

As ações variáveis especiais são as que ocorrem devido a ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou intensidade especiais. Em situações em que este tipo de ação está presente, é necessário que as combinações de cálculo sejam definidas especificamente para a situação especial considerada.

2.2.3.3 Ações excepcionais

As ações excepcionais são aquelas que aparecem em decorrência de eventos extraordinários. Estas são ações que ocorrem por um período extremamente curto em relação a vida útil da construção e possuem uma probabilidade muito baixa de acontecer. É o caso das ações causadas por explosões, terremotos, enchentes, incêndios e grandes impactos.

2.2.4 Ações usuais atuantes nas lajes

Dentre as diversas ações que podem agir em uma estrutura, existem aquelas que atuam especificamente nas lajes. De modo que algumas delas são mais frequentes e por isso são mais utilizadas nos cálculos de dimensionamento.

No âmbito das ações permanentes diretas está o peso próprio da laje. Este tipo de ação está diretamente ligado às dimensões do elemento e é calculado multiplicando-se a espessura da laje pelo peso específico do concreto armado. Admite-se que o resultado obtido é aplicado de maneira uniforme ao longo da área da placa. Outra ação normalmente considerada é a carga ocasionada pela execução do contra-piso. Esta nada mais é do que uma regularização do piso para que este possa estar apto a receber a camada de revestimento. Assim, a carga gerada pela execução do contra-piso é calculada multiplicando-se a espessura da camada pelo peso específico do material. Da mesma maneira se comporta a camada de revestimento, sua carga se distribui ao longo da superfície da placa e é calculada fazendo a multiplicação de seu peso específico pela sua espessura. As demais cargas deste tipo são relacionadas a elementos fixos que fazem parte da vedação e ambientação dos espaços, tais como alvenarias, forros e materiais de enchimento. Alguns dos pesos específicos de materiais utilizados em construções são mostrados na Tabela 1 (SILVA, 2005).

Tabela 1 - Peso específico dos materiais de construção

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
1) Rochas	Arenito	26
	Basalto	30
	Gneiss	30
	Granito	28
	Mármore e Calcário	28
2) Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22
	Cimento amianto	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Tijolos furados	13
	Tijolos maciços	18
	Tijolos sílico-calcários	20
3) Revestimentos e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
4) Madeiras	Pinho, cedro	5
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvirá, guatambu, grápia	8
	Angico, cabriuva, ipê róseo	10
5) Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
Zinco	72	
6) Materiais diversos	Alcatrão	12
	Asfalto	13
	Borracha	17
	Papel	15
	Plástico e folhas	21
	Vidro plano	26

FONTE: Adaptado de NBR 6120 (1980)

Ainda segundo Silva (2005), as ações permanentes indiretas geralmente só são consideradas para os casos de estruturas que utilizam lajes protendidas. Estas ações são a fluência e a retração do concreto.

As cargas geradas por ações variáveis que atuam nas lajes também devem ser consideradas nos cálculos de dimensionamento de estruturas. Uma delas é a carga accidental que está diretamente ligada ao uso da estrutura, ou seja, a finalidade para a qual a estrutura será utilizada. Isso envolve as cargas de veículos, para o caso de estacionamentos, ou livros e estantes para o caso de bibliotecas. As cargas recomendadas para alguns tipos de edificação são apresentadas na NBR 6120 (ABNT, 1980). Também devem ser consideradas ações provenientes de estruturas provisórias utilizadas durante a construção. Como é o caso de andaimes, torres e máquinas.

2.3 Lajes Nervuradas

2.3.1 Definição

Segundo o item 14.7.7 da NBR 6118 (ABNT, 2003), lajes nervuradas são as lajes em que a zona de tração para momentos positivos está localizado nas nervuras. Este tipo de laje é composto por nervuras que são separadas por vazios que podem ou não ser preenchidos por material inerte. As nervuras que compõem a laje podem ser moldadas no local ou podem ser pré-fabricadas.

2.3.2 Considerações iniciais

Apesar dos diversos programas que existem para cálculo e dimensionamento de estruturas, ainda é de suma importância que o engenheiro projetista determine o tipo mais adequado de laje a ser utilizada na execução de uma edificação. Essa escolha está vinculada a vários fatores como a disponibilidade de materiais, as cargas de utilização, projeto arquitetônico, tamanho dos vãos a serem vencidos, custo e interação com outros elementos presentes na estrutura.

O fator econômico é extremamente importante quando se determina o modelo de laje mais adequado a ser utilizado em uma estrutura. A execução das lajes de uma edificação representa uma grande parcela dos custos de uma obra por ser o elemento que geralmente demanda o maior volume de concreto dentre todos os elementos estruturais. Assim, uma redução na dimensão da altura da laje já representa uma economia satisfatória do ponto de vista global da edificação.

A redução nos custos de execução da laje nervurada se torna mais nítida quando a comparamos com as lajes maciças e as situações em que estas são mais frequentemente utilizadas. Para estruturas em que os vãos a serem vencidos pelas lajes são pequenos (vão menor inferior a 5 m) e as cargas atuantes não são muito elevadas, é mais comum o uso de lajes maciças apoiadas em vigas. Isso ocorre porque para pequenos vãos a altura das lajes maciças não necessita ser muito elevada, tendo uma rigidez satisfatória e deslocamentos verticais aceitáveis para esse tipo de situação. Porém em situações onde as lajes necessitam vencer maiores vãos, as lajes maciças não são recomendadas visto que para atender aos requisitos do estado limite último (ELU) e do estado limite de serviço (ELS), esse tipo de laje demandaria grande altura, o que a torna economicamente inviável. Assim,

é interessante a utilização de um sistema que tenha um comportamento semelhante ao das lajes maciças, porém com a eficiência que as vigas apresentam no combate a flexão, possuindo grande inércia, peso próprio relativamente pequeno e sejam economicamente viáveis. As lajes nervuradas em concreto armado (Figura 12) conseguem aliar todas essas características partindo de uma idéia relativamente simples (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Figura 12 - Concretagem de uma laje nervurada



FONTE: Próprio Autor (2011).

O concreto é um material que apresenta uma boa resistência a esforços de compressão. Porém este material não repete o mesmo desempenho quando submetido a esforços de tração. A idéia que levou a concepção das lajes nervuradas partiu deste princípio. Pois, de acordo com Carvalho e Pinheiro (2009), ao analisar os esforços atuantes em lajes maciças, percebe-se que para grandes vãos, existe uma considerável parcela de concreto abaixo da linha neutra sendo tracionado. Ou seja, boa parte do concreto presente na laje não colabora de maneira satisfatória para a estabilidade da estrutura. Assim, nada mais lógico do que eliminar esta parcela de concreto e substituí-lo por material inerte e de menor custo.

2.3.3 *Vantagens e desvantagem da utilização de lajes nervuradas*

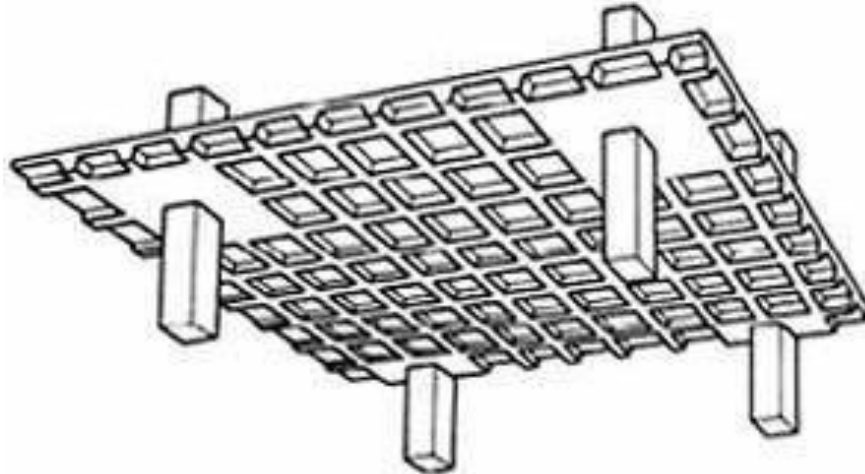
Quando comparadas com os sistemas mais tradicionais, as lajes nervuradas possuem várias vantagens desde sua etapa de execução até sua utilização. Segundo Carvalho e Pinheiro (2009) algumas delas são:

- a) A liberação de mais espaços nas estruturas, visto que as lajes nervuradas conseguem vencer maiores vãos e, por isso demandam menores quantidades de pilares para oferecer apoio. Esta vantagem é bastante interessante quando há a necessidade de ter espaços mais amplos e menos obstáculos, como no caso de estacionamentos em que os pilares acabam tomando os espaços de manobra e diminuindo o número de vagas;
- b) Diferentemente de outros tipos de laje, as lajes nervuradas não necessitam de tecnologia avançada nem mão de obra especializada para a sua execução. Na realidade, este tipo de laje pode ser executada utilizando a mesma tecnologia das lajes maciças;
- c) Não possui restrições de utilização no que se refere as finalidades da edificação. Sendo possível sua execução em qualquer tipo de construção, sejam estas lojas, estacionamentos, instituições de ensino, hospitais ou residências;
- d) Podem ser aplicadas conjuntamente com os sistemas estruturais de lajes sem vigas em que a região onde há o encontro com o pilar torna-se maciça para garantir uma maior rigidez onde há uma grande concentração de tensões (Figura 13);
- e) Consomem menos concreto e aço que outros sistemas, diminuindo seu peso próprio e conseqüentemente aliviando as fundações;
- f) Por possuírem grande altura sem deixar de serem economicamente viáveis e ao mesmo tempo não apresentarem peso próprio elevado, estas lajes são capazes de suportar maiores cargas quando comparadas aos demais sistemas.

Ainda segundo Carvalho e Pinheiro (2009), apesar de todas as vantagens, as lajes nervuradas também apresentam algumas desvantagens em relação as outras. Dentre as principais, está a dificuldade na passagem de tubulações e eletrodutos que compõem as instalações prediais. Isto ocorre devido a presença de vazios em sua seção transversal. Também existe desvantagem no fato de as lajes nervuradas apresentarem grandes alturas, já que isso demanda maiores alturas em cada um dos pavimentos, tornando a estrutura

mais alta como um todo. Isso reduz o número de pavimentos que podem ser construídos e pode representar um problema em locais onde a limitação de altura para as edificações é baixa.

Figura 13 - Sistema de laje nervurada sem vigas



FONTE: Dias (2004).

2.3.4 Lajes Nervuradas pré-fabricadas

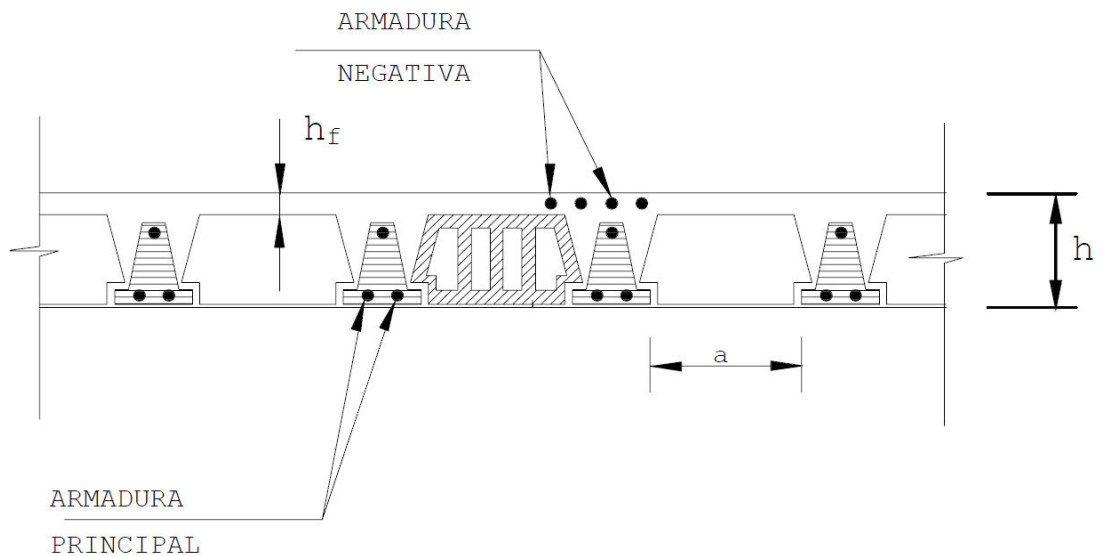
As lajes nervuradas pré-fabricadas ou pré-moldadas são aquelas em que suas nervuras são executadas fora de seu local de utilização, podendo serem feitas no próprio canteiro de obras ou em fábricas especializadas, onde o controle da qualidade do produto é mais rigoroso. No segundo caso, após a fabricação das nervuras, estas são conduzidas por caminhões até a obra e cuidadosamente posicionadas no local definitivo.

Segundo Bocchi Junior e Giongo (2007), uma das principais vantagens deste tipo de laje é que esta não necessita de formas junto a face inferior pois o posicionamento das nervuras pré-fabricadas juntamente com os moldes dos vazios da laje não permitem que o concreto recém lançado percole.

O material que compõe o cimbramento é posicionado em função da resistência dos elementos pré-fabricados. Então são colocadas as nervuras juntamente com os moldes (Figura 14), para posteriormente serem colocadas as armaduras adicionais e os dutos de

passagem das instalações necessárias. Após o posicionamento de todos os elementos a laje pode ser concretada.

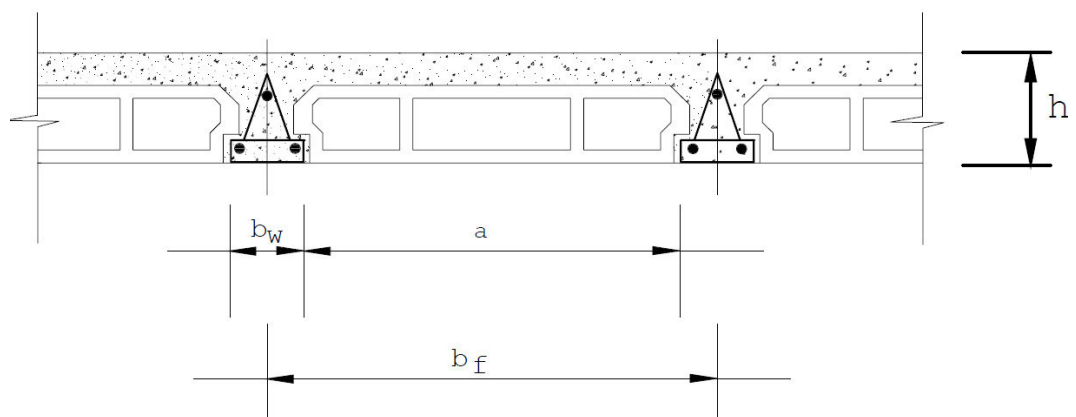
Figura 14 - Distribuição dos elementos da laje pré-fabricada



FONTE: Adaptado de Bocchi Junior e Giongo (2007).

Com o advento das lajes pré-fabricadas foram sendo criadas diferentes tipos como é o caso das lajes treliça e das lajes com fôrmas metálicas incorporadas, chamadas de lajes tipo *steel deck*. A primeira é composta por placas de concreto planas pré-fabricadas, com armaduras incorporadas. Esta placa é associada a nervuras também pré-fabricadas e treliças metálicas para melhorar a rigidez da laje (Figura 15).

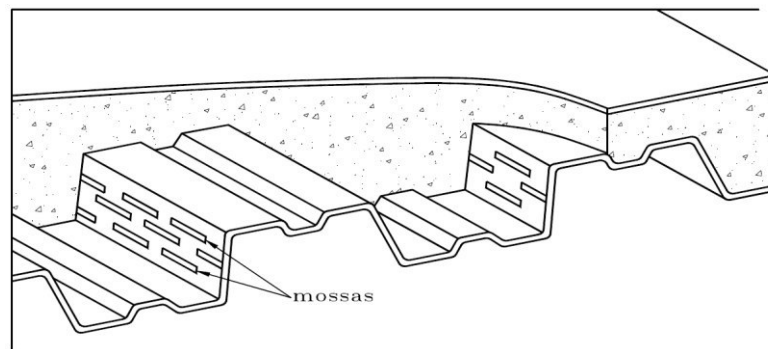
Figura 15 - Laje treliça



FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

As lajes nervuradas do tipo mista são aquelas em que são incorporadas fôrmas metálicas que se tornam parte da estrutura. Estas fôrmas metálicas são posicionadas antes da concretagem, sendo responsáveis por suportar as cargas atuantes durante a construção, como a movimentação de operários e máquinas. Após a concretagem, a fôrma metálica atua conjuntamente com o concreto, sendo responsável por absorver os esforços de tração gerados pelos momentos fletores positivos atuantes na laje. Assim, a fôrma de aço deve ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface aço-concreto. Dessa forma, denomina-se comportamento misto quando os dois elementos atuam em conjunto. Para garantir que esse comportamento ocorra de maneira adequada são incorporadas moças (Figura 16) nas reentrâncias da fôrma de metal, pois a aderência entre o concreto e o metal “liso” não é suficiente para promover a ligação adequada (BOCCHI JUNIOR; GIONGO, 2007).

Figura 16 - Detalhe das moças na laje tipo *steel deck*



FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

2.3.5 Lajes nervuradas moldadas no local

As lajes nervuradas moldadas no local são aquelas em que sua execução é feita, em sua totalidade, no local definitivo de utilização do elemento. Sendo este o tipo mais comum de laje nervurada que é utilizada nas edificações.

A execução deste tipo de laje consome menos concreto que a laje maciça. Porém, segundo Carvalho e Pinheiro (2009), para que a solução adotando lajes nervuradas moldadas no local seja, de fato, mais econômica que a solução utilizando lajes maciças, o consumo de fôrmas necessárias não deve ser grande. Para isso podem ser utilizados moldes de plástico reforçado que podem ser reaproveitados.

Atualmente são encontrados diversos tipos de moldes para a execução das nervuras das lajes. Esses moldes são associados, muitas vezes, a sistemas de cimbramentos metálicos compostos por escoras, pontaletes, barretes e travessas (Figura 17). Além disso, os moldes podem ser encontrados em diversos tamanhos tanto em planta como na altura, proporcionando diversos tipos de acabamentos.

Figura 17 - Cimbramento metálico



FONTE: Próprio Autor (2011).

Para que a execução de lajes nervuradas moldadas no local se torne ainda mais econômica ainda é possível alugar tanto as fôrmas como os materiais que compõem o cimbramento. Existem muitas empresas que fazem o aluguel desses produtos, que em algumas situações chegam a ser reaproveitados cerca de cem vezes antes que se tornem inutilizáveis. Assim, para a execução de lajes nervuradas que utilizam esse tipo de sistema deve-se primeiramente montar os pontaletes, em seguida conectar os encaixes das travessas e acoplar os barretes horizontais formando uma estrutura com aparência de grelha. Após a formação dessa estrutura são colocadas as escoras metálicas com espaçamento predeterminado em projeto. Em seguida são colocadas as fôrmas de plástico sobre a estrutura formada. Em alguns casos são usadas plataformas de plástico (Figura 18)

para facilitar o deslocamento de máquinas e operários, assim como a colocação dos moldes que irão formar as nervuras.

Figura 18 - Colocação das plataformas plásticas



FONTE: Próprio Autor (2011).

Depois que os moldes são fixados (Figura 19), devem ser colocadas as armaduras necessárias juntamente com a aplicação de produto químico para facilitar a retirada das fôrmas após a concretagem. Isso é extremamente importante para evitar que os moldes se quebrem durante a retirada das fôrmas, impedindo seu reaproveitamento nos demais pavimentos.

Figura 19 - Fixação dos moldes e concretagem da laje



FONTE: Próprio Autor (2011).

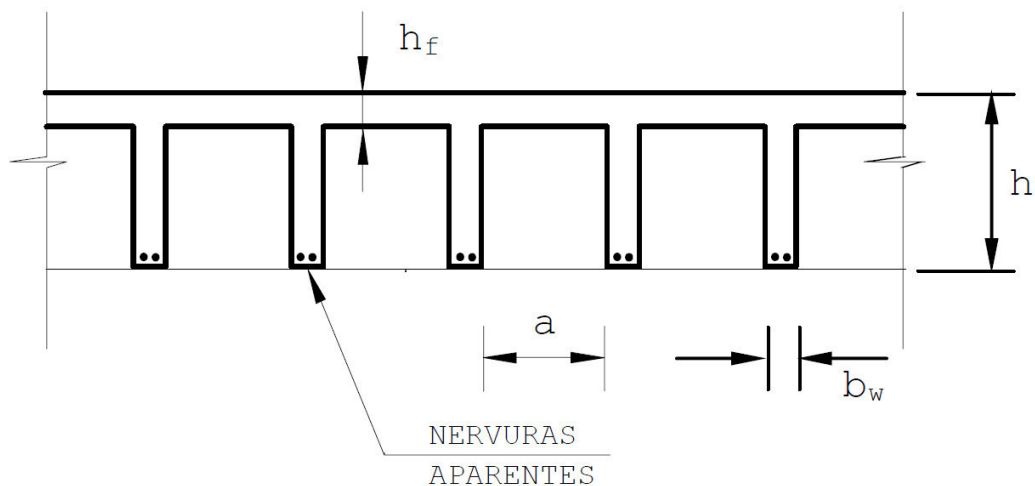
Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), também podem ser empregadas outras soluções na execução de lajes nervuradas. Uma delas é a mesma que se usa comumente em lajes maciças com a utilização de tablados de madeira, substituindo-se apenas o concreto que se encontra abaixo da linha neutra por um material inerte e mais barato, como por exemplo blocos de tijolo cerâmico e blocos de EPS (isopor). Esses materiais são incorporados a laje e não apresentam função estrutural.

2.3.5.1 Tipos de lajes nervuradas moldadas no local

As lajes nervuradas em concreto armado mais comumente utilizadas são aquelas que possuem apenas uma mesa superior e suas nervuras estão localizadas abaixo da mesa (Figura 20). Neste tipo de laje as nervuras possuem um espaçamento constante conseguido através da utilização dos moldes. Os espaços entre as nervuras podem permanecer vazios ou serem preenchidos por material inerte sem função estrutural, apenas para melhorar o aspecto final da laje e torná-la lisa em sua superfície inferior. A seção transversal deste tipo de laje apresenta um formato de “T”, sendo bastante eficientes para combater os momentos fletores positivos, que tracionam a parte inferior (onde há as nervuras) e

comprimem a parte superior (onde há maior área de concreto). Porém, para momentos negativos, que tracionam a parte superior e comprimem a parte inferior da laje, não é recomendado a utilização desta laje. De modo que devem ser evitados apoios com engastes totais em seu contorno, reduzindo os momentos negativos aos valores da capacidade de resistência a compressão das nervuras (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

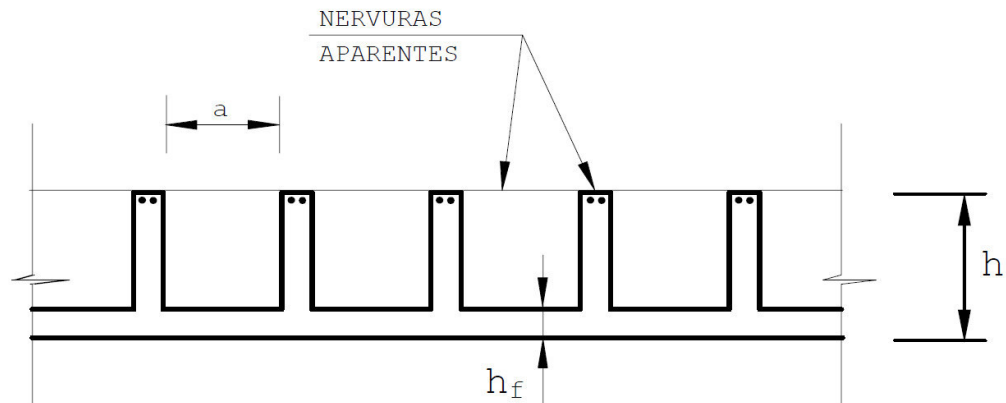
Figura 20 - Seção transversal da laje nervurada mais comum



FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

Existem lajes nervuradas que apresentam um bom desempenho quando submetidas a momentos fletores negativos, como é o caso da laje nervurada invertida (Figura 21). Esse tipo de laje funciona com o princípio inverso da laje nervurada mais comum. Para esse tipo de laje a mesa fica localizada na superfície inferior e as nervuras acima desta. Assim, a laje nervurada invertida é recomendada para casos em que haja a necessidade de apoios em balanço. Porém, como os espaços entre as nervuras normalmente permanecem vazios e as nervuras ficam aparentes, existe a necessidade de fôrmas para moldar tanto as nervuras como a mesa, o que dificulta bastante o processo de execução da laje. Por isso esta laje está praticamente em desuso.

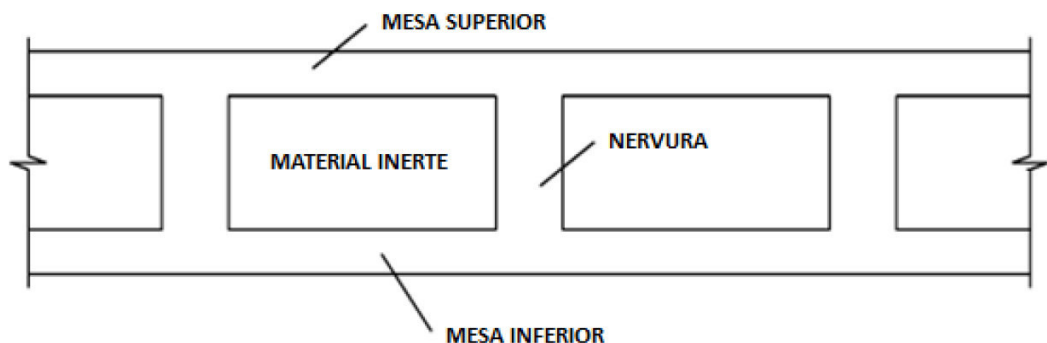
Figura 21 - Seção transversal da laje nervurada invertida



FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

Existem também as lajes nervuradas duplas, que possuem mesas de concreto tanto na superfície superior quanto na inferior, posicionando as nervuras no meio das duas mesas (Figura 22). Nesse tipo de laje, os vazios entre as nervuras são normalmente preenchidos com material inerte que também atua como fôrma, sendo incorporado a laje. Os espaços também podem permanecer vazios, sendo neste caso necessária a utilização de fôrmas para a moldagem da mesa superior. Esse tipo de laje funciona como uma junção da laje nervurada convencional e da laje nervurada invertida, porém a dificuldade de execução faz com que esta laje não seja frequentemente utilizada.

Figura 22 - Seção transversal da laje nervurada dupla

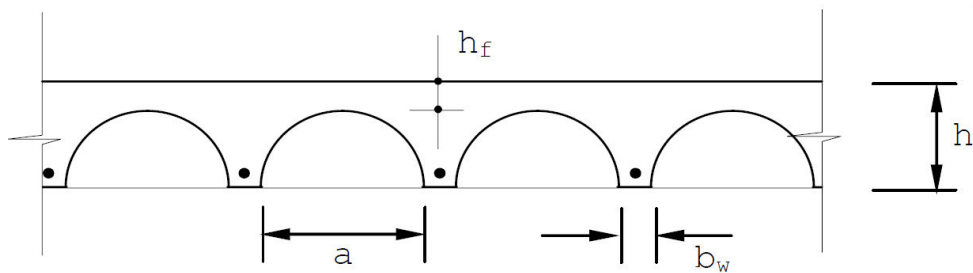


FONTE: Campani (2011).

Ainda segundo Carvalho e Pinheiro (2009), existem outros tipos de lajes nervuradas com diferentes possibilidades de execução, como no caso da laje nervurada

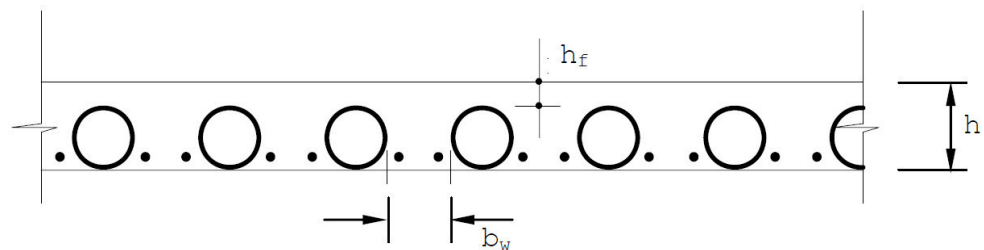
meio tubo, em que os espaçamentos entre as nervuras têm formatos de meia circunferência (Figura 23). A laje nervurada estrutubo, que tem os espaçamentos em forma de circunferência (Figura 24) e também a laje nervurada modulada, que é uma variação da laje nervurada convencional com a diferença de que as nervuras apresentam uma pequena inclinação (Figura 25), facilitando a retirada das fôrmas após a concretagem.

Figura 23 - Seção transversal da laje nervurada meio tubo



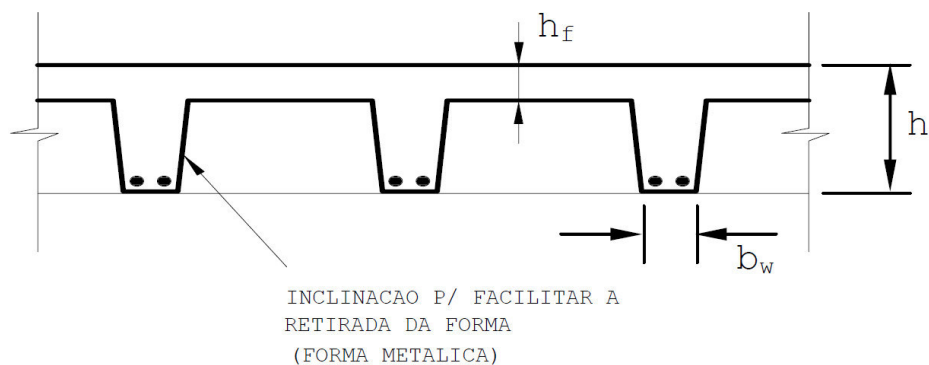
FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

Figura 24 - Seção transversal da laje nervurada estrutubo



FONTE: Bocchi Junior e Giongo (2007).

Figura 25 - Seção transversal da laje nervurada modulada



FONTE: Bocchi junior e Giongo (2007).

2.3.6 Protensão em lajes nervuradas

Estruturas em concreto protendido são aquelas que devido a ação de uma força previamente aplicada no concreto, este torna-se comprimido de maneira a diminuir ou eliminar as tensões de tração quando a peça está em serviço (EMERICK, 2002).

A partir desta definição percebe-se que a protensão é uma maneira de atenuar um dos pontos fracos de estruturas de concreto, que é a baixa resistência a esforços de tração. Isto acontece porque as regiões onde o concreto deveria sofrer esforços de tração está previamente comprimida, fazendo com que os esforços de compressão eliminem de maneira parcial ou total os esforços de tração.

A utilização de protensão em lajes apresenta diversas vantagens, porém essas vantagens aplicam-se em determinadas situações. Emerick (2002), sugere que em relação ao custo, a protensão só está associada a uma maior economia quando existem vãos com dimensões maiores que 7 metros.

2.3.6.1 Classificação quanto ao estiramento da armadura de protensão

Em relação ao estiramento da armadura de protensão, o concreto protendido pode ser classificado em pré-tracionado e pós-tracionado.

Segundo Silka Pereira *et al.* (2005), o concreto protendido com armadura ativa pré-tracionada é aquele em que o estiramento da armadura ativa é feito antes da concretagem da peça, através de apoios independentes. Assim, passado o tempo para a cura e o enrijecimento do concreto, a ligação entre a armadura e os apoios é cortada e a tensão aplicada na armadura é transmitida ao concreto por meio da aderência. Este tipo de protensão é muito comum em peças pré-fabricadas.

Por outro lado, quando o estiramento da armadura ativa do concreto é feito após o enrijecimento do concreto, através de apoios na própria peça, este é chamado de concreto protendido com armadura ativa pós-tracionada. Este tipo de protensão pode ou não ter aderência entre a armadura estirada e a peça de concreto.

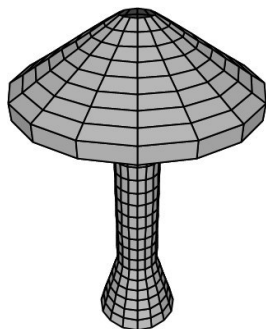
2.4 Definição e Introdução do Método dos Elementos Finitos

Existem diversas situações com as quais os engenheiros precisam lidar diariamente. Mais especificamente no ramo do cálculo de estruturas surgem diversos problemas que necessitam de soluções minimamente confiáveis para garantir a estabilidade e o correto funcionamento dos elementos que compõem as estruturas. Assim, para resolver tais problemas, os engenheiros baseiam-se nos princípios da resistência dos materiais para montar modelos de cálculo simplificados e solucionar os problemas com o auxílio de tabelas e ábacos. Porém, em algumas situações torna-se praticamente impossível a utilização de modelos simplificados para solucionar problemas estruturais complexos. Em razão disso, torna-se necessário a utilização de modelos e métodos de cálculo mais refinados, além de softwares de computador para resolver tais problemas de forma confiável. Entre esses métodos está o método dos elementos finitos, que é um dos métodos mais utilizados pelos calculistas.

Segundo Alves Filho (2008), o método dos elementos finitos é basicamente um método numérico de cálculo aproximado de sistemas contínuos, onde esses sistemas são subdivididos em um número finito de partes que se ligam através de nós.

A discretização de elementos contínuos consiste na divisão da estrutura em partes separadas e distintas, sendo estas partes conectadas por pontos discretos chamados de nós (Figura 26). O conceito desta etapa do método vem da idéia de que é mais fácil entender o comportamento de cada parte de um sistema do que entendê-lo de uma só vez. Então, a partir do momento que o comportamento de todos os elementos componentes do sistema são entendidos, pode-se entender o comportamento do sistema como um todo.

Figura 26 - Estrutura discretizada



FONTE: Próprio Autor (2013).

Para que o modelo discreto tenha validade é necessário que a malha de elementos seja modelada de tal modo que as condições de contorno de um elemento da malha sejam compatíveis ao elemento adjacente. Em outras palavras, quanto menor forem os elementos da malha, mais confiável será o modelo discreto. Porém, a intenção da discretização das estruturas não é tornar as subdivisões em elementos diferenciais, pois estes seriam solucionados através de equações diferenciais que são, em muitos casos, de difícil resolução. Ao invés disso, deve-se proceder a divisão dos elementos até que estes tenham um grau razoável de aproximação requerida (ALVES FILHO, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo é feito com base na obra de uma escola localizada no interior do Ceará, em que a laje nervurada de piso que compõe a sala de aula foi executada de maneira diferente da indicada no projeto original.

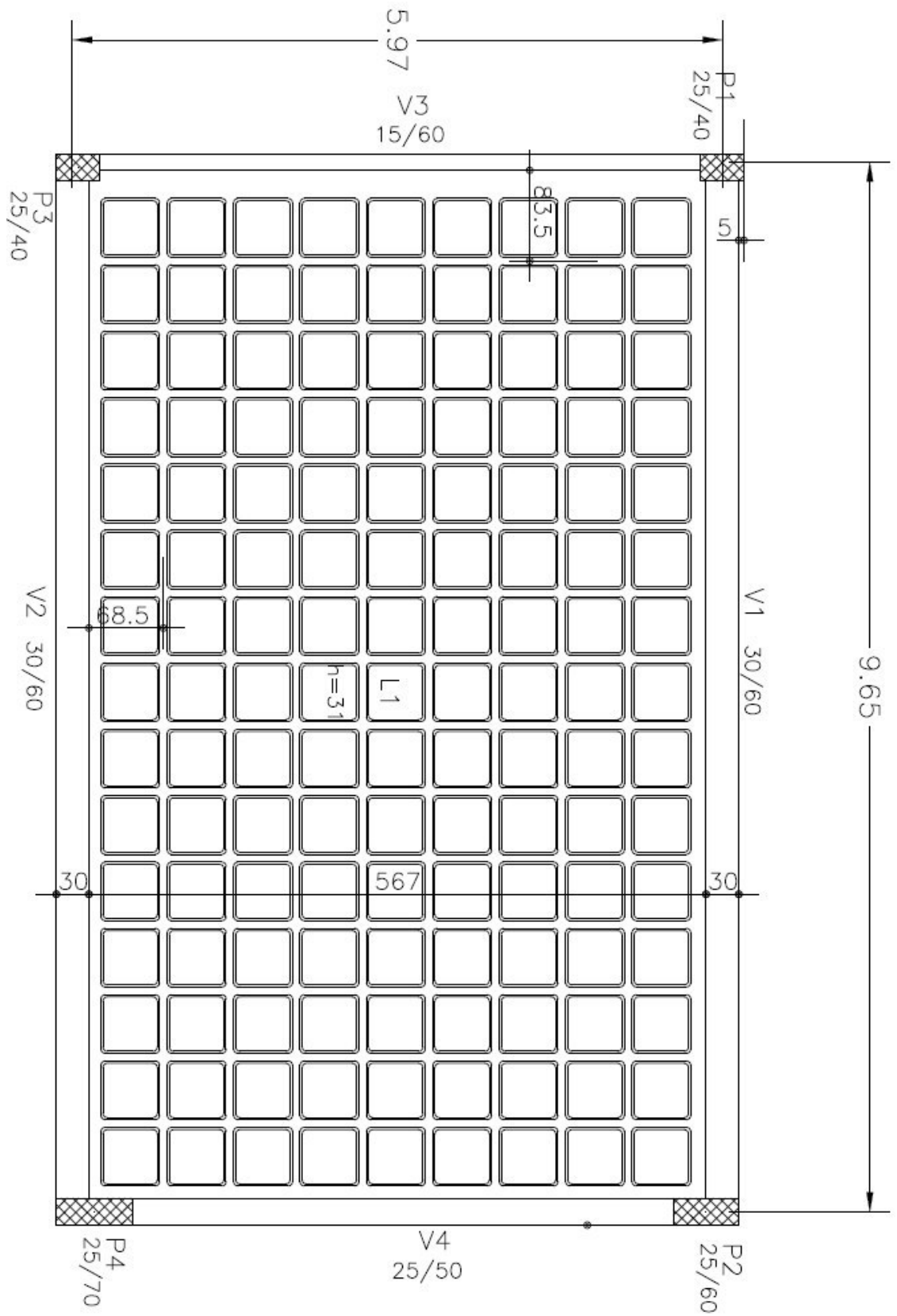
As lajes são analisadas pelo método dos elementos finitos utilizando o programa SAP 2000 (versão 14.0.0). Após a modelagem da laje original e da laje alterada, é feito um comparativo dos esforços e deslocamentos obtidos na análise.

3.1 Laje nervurada original

A laje original de projeto (Figuras 27 e 28) é uma laje nervurada convencional de concreto armado moldada no local simplesmente apoiada nas quatro bordas e armada nas duas direções. A resistência do concreto é de 30 MPa e as dimensões da laje são:

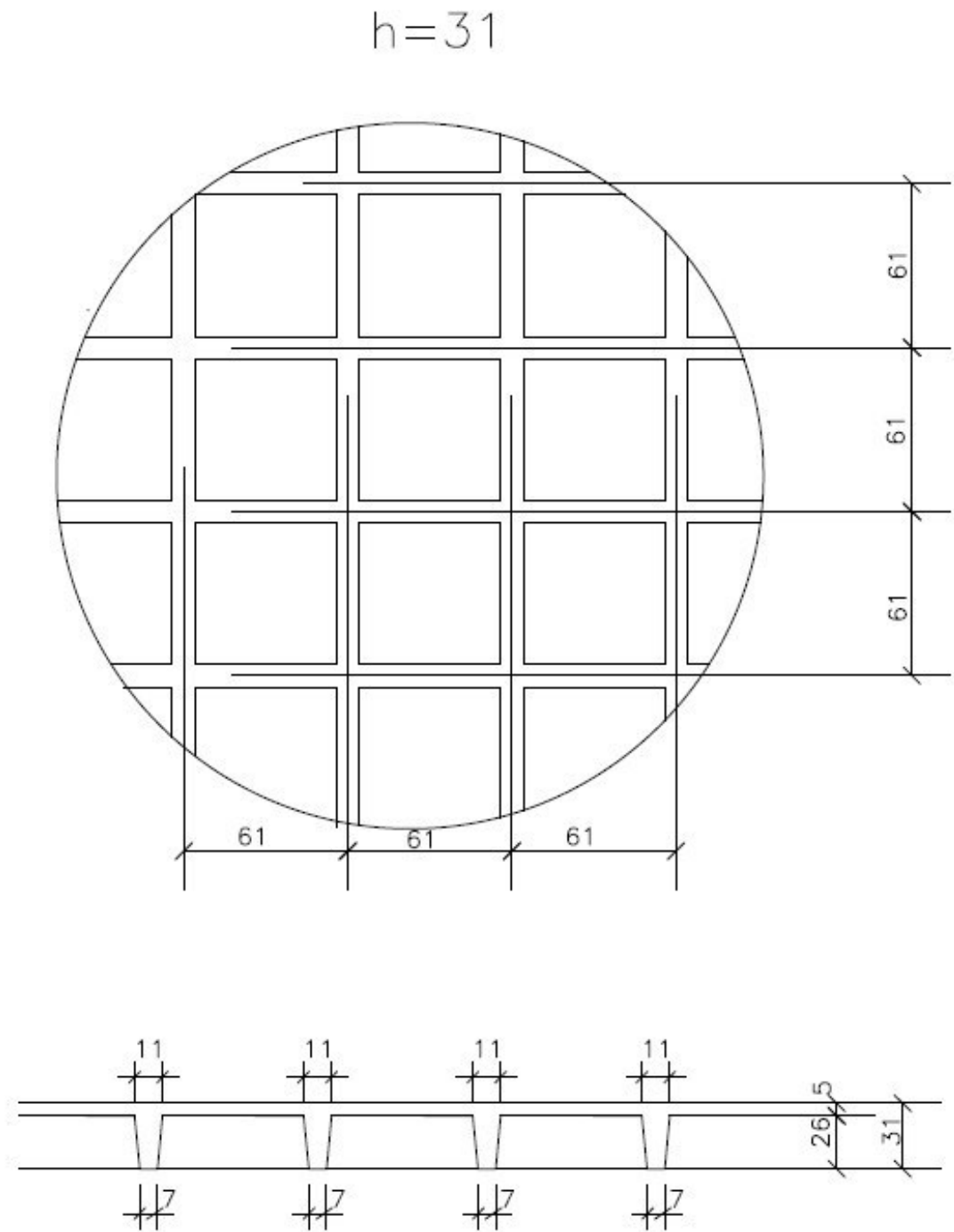
- Vão maior = 9,65 m
- Vão menor = 5,97 m
- Altura total = 0,31 m
- Altura da nervura = 0,26 m
- Largura da base da nervura = 0,07 m
- Largura do topo da nervura = 0,11 m
- Espaçamento entre nervuras = 0,61 m
- Espessura da mesa = 0,05 m
- Largura da base da cubeta = 0,54 m
- Largura do topo da cubeta = 0,50 m
- Quantidade de cubetas = 135 unidades

Figura 27 - Laje nervurada original



FONTE: Próprio Autor (2013).

Figura 28 - Detalhe das nervuras da laje original



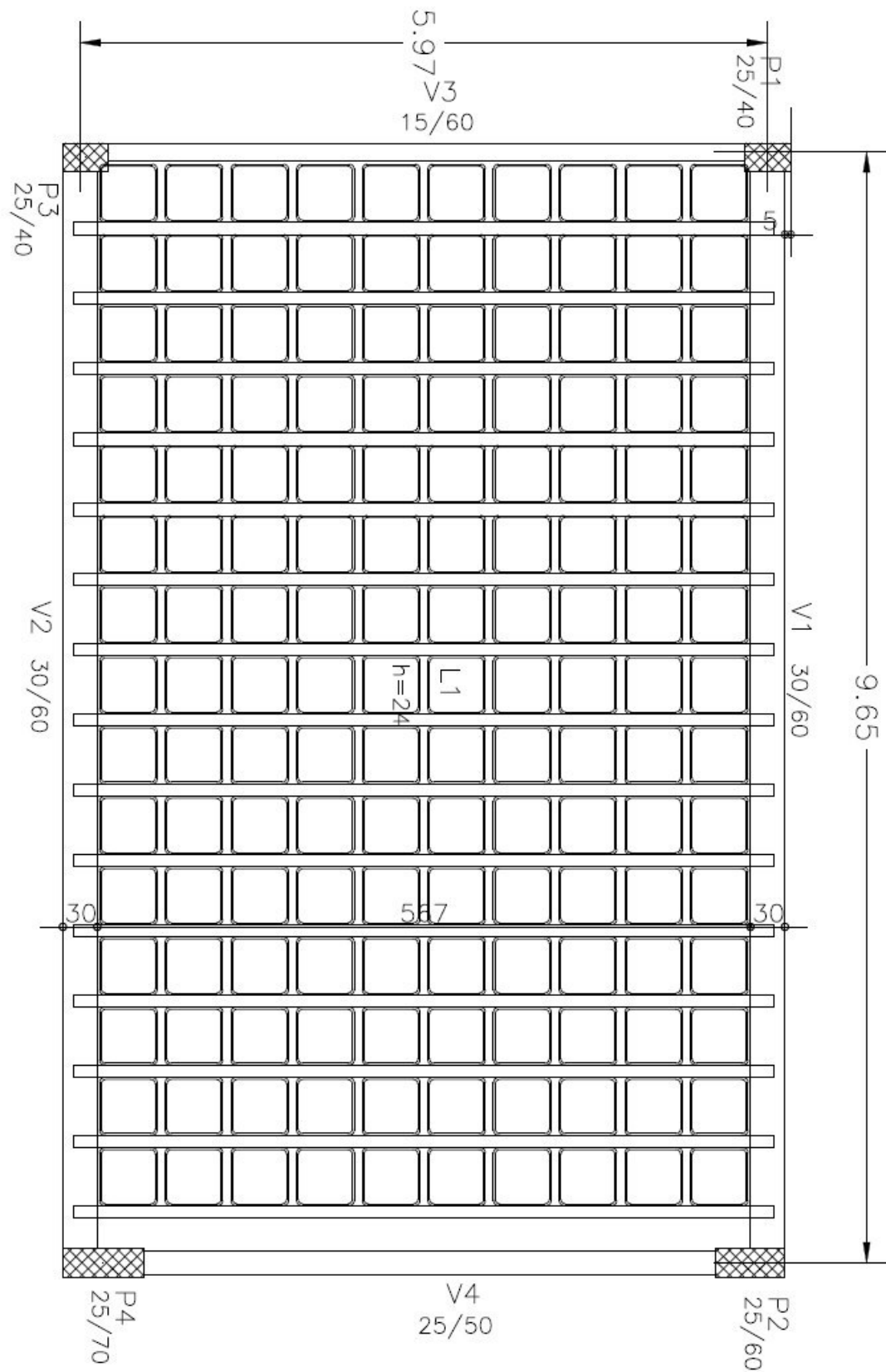
FONTE: Próprio Autor (2013).

3.2 Laje nervurada alterada

A laje que foi alterada em relação ao projeto original (Figuras 29 e 30) é uma laje nervurada com trilhos pré-fabricados em concreto protendido posicionados apenas na direção do menor vão e simplesmente apoiada nas quatro bordas. A resistência do concreto é de 30 MPa e as dimensões da laje são:

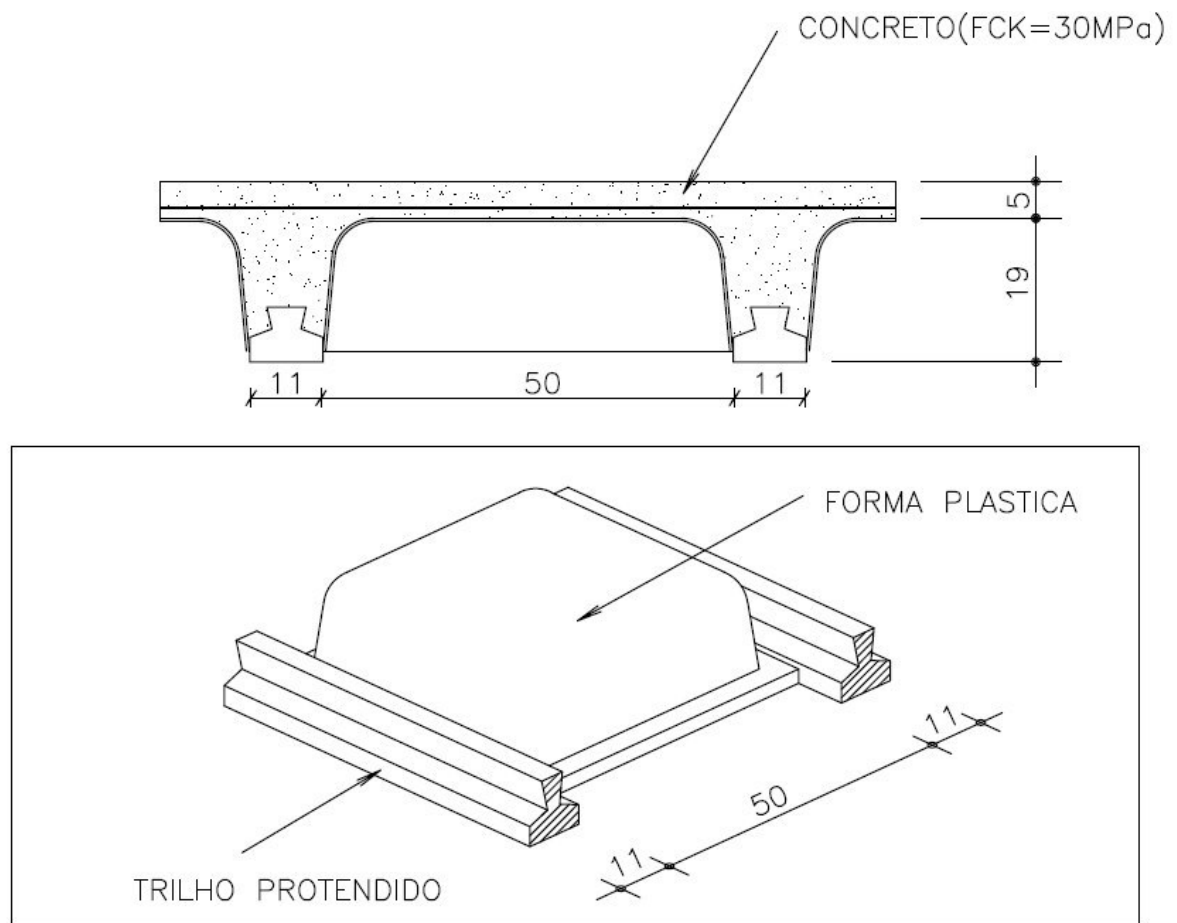
- Vão maior = 9,65 m
- Vão menor = 5,97 m
- Altura total = 0,24 m
- Altura da nervura = 0,19 m
- Largura da base da nervura no eixo y = 0,11 m
- Largura do topo da nervura no eixo y = 0,14 m
- Largura da base da nervura no eixo x = 0,07 m
- Largura do topo da nervura no eixo x = 0,10 m
- Espaçamento entre nervuras na direção de x = 0,61 m
- Espaçamento entre nervuras na direção de y = 0,57 m
- Comprimento do trilho protendido = 6,0 m
- Resistência do concreto do trilho = 40 MPa
- Força de protensão em cada trilho = 468 kN
- Espessura da mesa = 0,05 m
- Largura da base da cubeta = 0,50 m
- Largura do topo da cubeta = 0,47 m
- Quantidade de cubetas = 150 unidades

Figura 29 - Laje nervurada alterada



FONTE: Próprio Autor (2013).

Figura 30 - Detalhe da seção da laje nervurada alterada na direção y

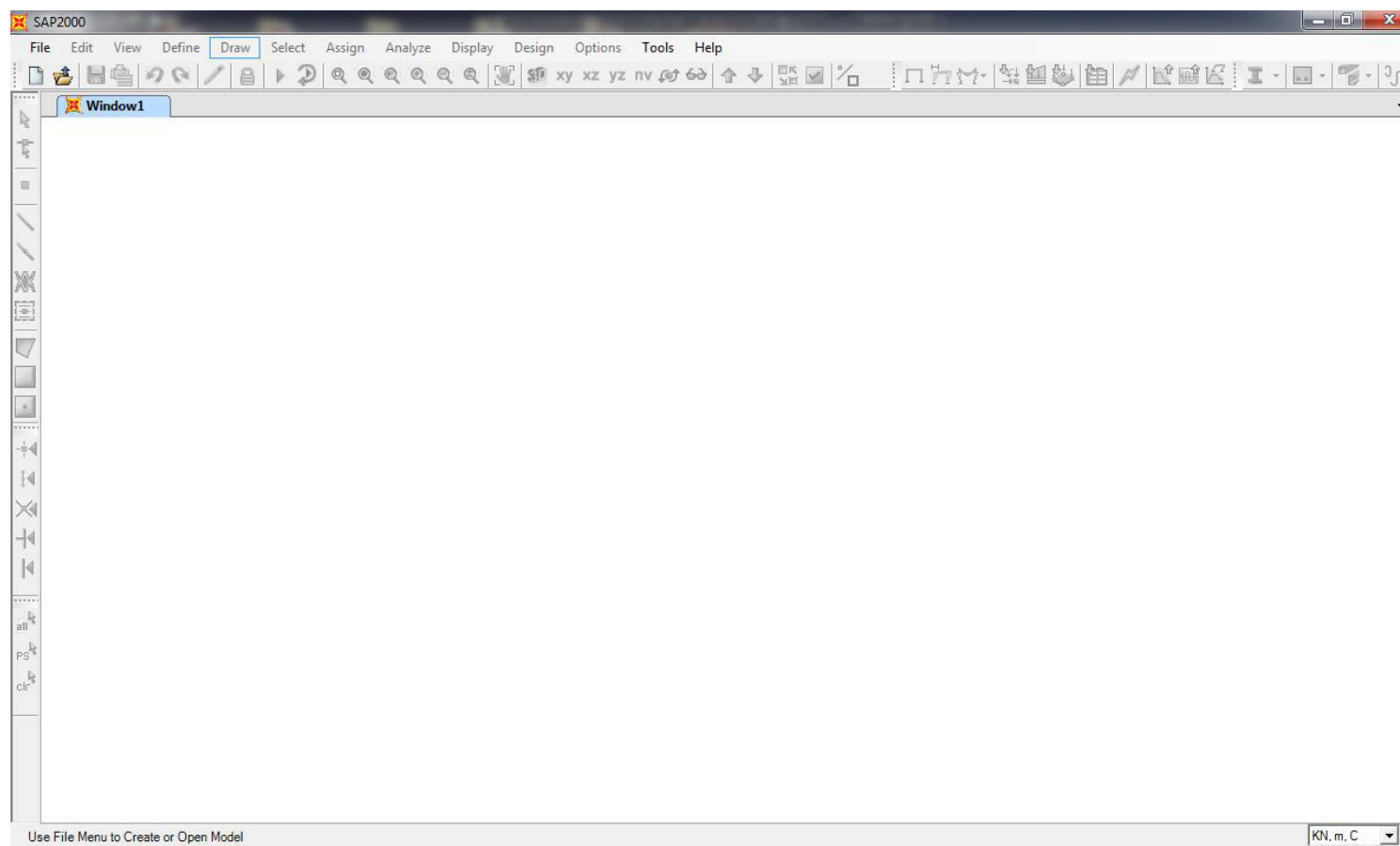


FONTE: Próprio Autor (2013).

3.3 Utilização do SAP 2000

O SAP 2000 é um programa para modelagem de estruturas que utiliza o método dos elementos finitos para análise dos modelos. Este programa possui uma interface gráfica (Figura 31) bastante intuitiva permitindo que o usuário possa modelar diversos tipos de estrutura apenas fornecendo os dados que o programa necessita.

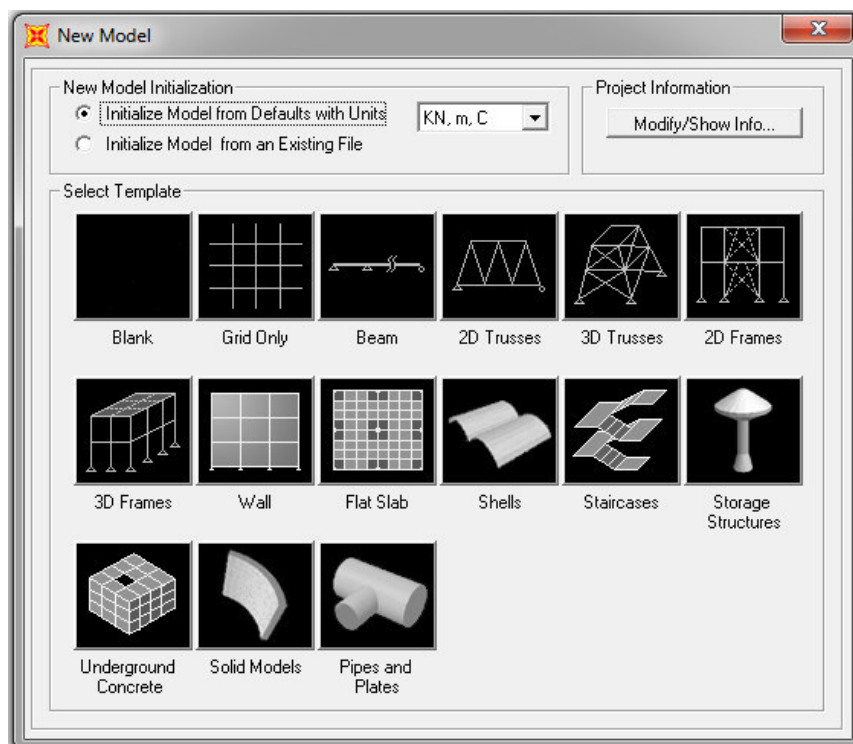
Figura 31 - Interface do SAP 2000



FONTE: Próprio Autor (2013).

O programa fornece a opção de um modelo inicial para que o usuário possa adaptá-lo à estrutura que deseja, facilitando o início da modelagem. Também é possível optar por modelar a estrutura com base em uma grade inicial que dará origem aos nós e será utilizada na aplicação do método dos elementos finitos (Figura 32).

Figura 32 - Opções de modelo inicial do programa



FONTE: Próprio Autor (2013).

O usuário deve definir as propriedades da seção e o material constituinte da estrutura (Figura 33).

Figura 33 - Seleção das propriedades do material

FONTE: Próprio Autor (2013).

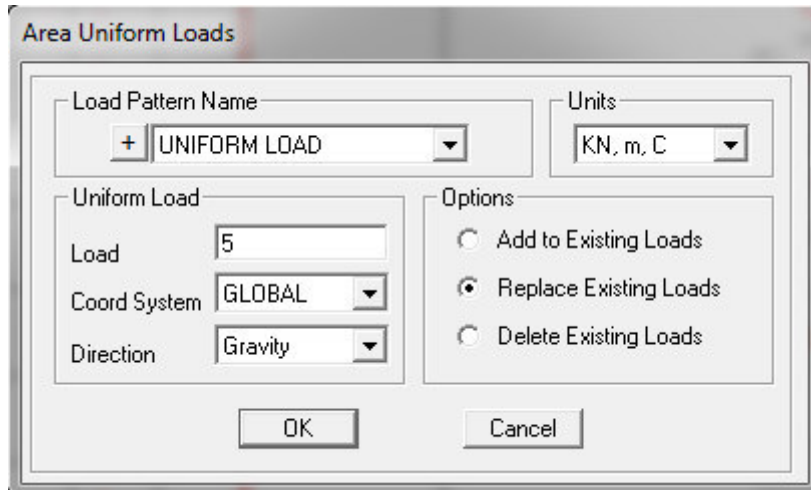
Após a correta seleção de propriedades e seção da estrutura o usuário deve inserir as restrições dos nós que a estrutura necessita, como por exemplo os apoios nas bordas das lajes (Figura 34).

Figura 34 - Seleção das restrições dos nós

FONTE: Próprio Autor (2013).

Após completar toda a definição de parâmetros da estrutura o usuário deve atribuir as cargas a qual a estrutura está submetida (Figura 35).

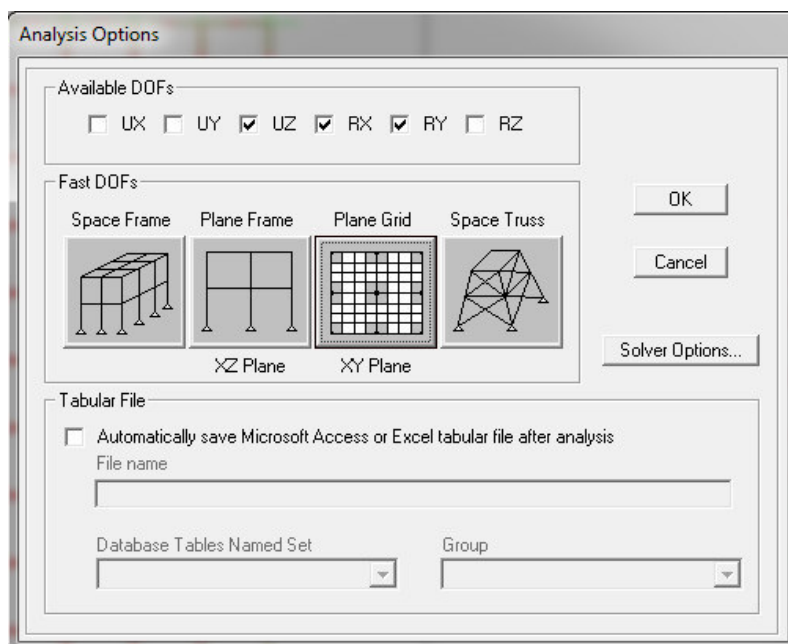
Figura 35 - Atribuição das cargas na estrutura



FONTE: Próprio Autor (2013).

Após a modelagem da estrutura, deve-se definir os graus de liberdade que o programa deve avaliar (Figura 36). Nesta etapa o programa está pronto para gerar os resultados.

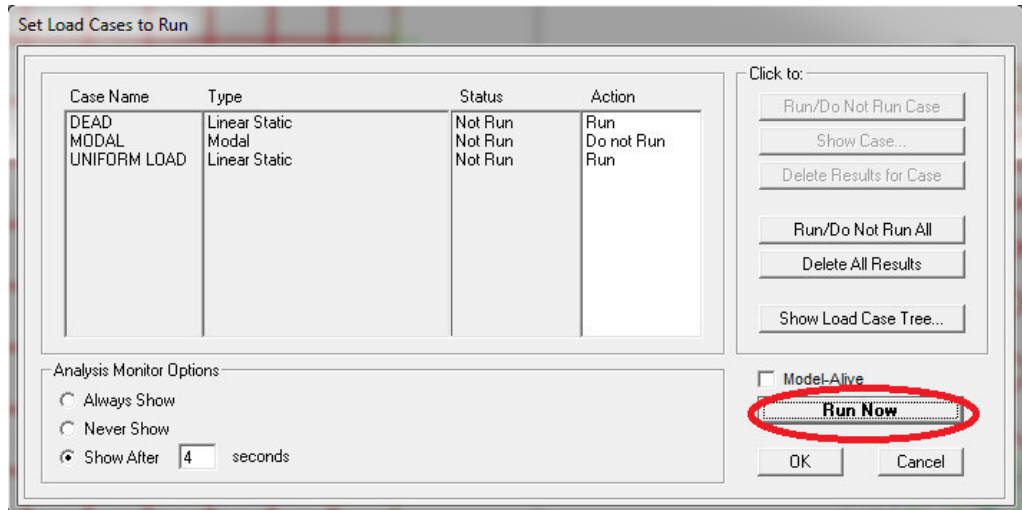
Figura 36 - Definição dos graus de liberdade



FONTE: Próprio Autor (2013).

Após a definição dos graus de liberdade o usuário pode iniciar a análise da estrutura definindo para que cargas ou combinações de carga o programa deverá avaliar a estrutura (Figura 37).

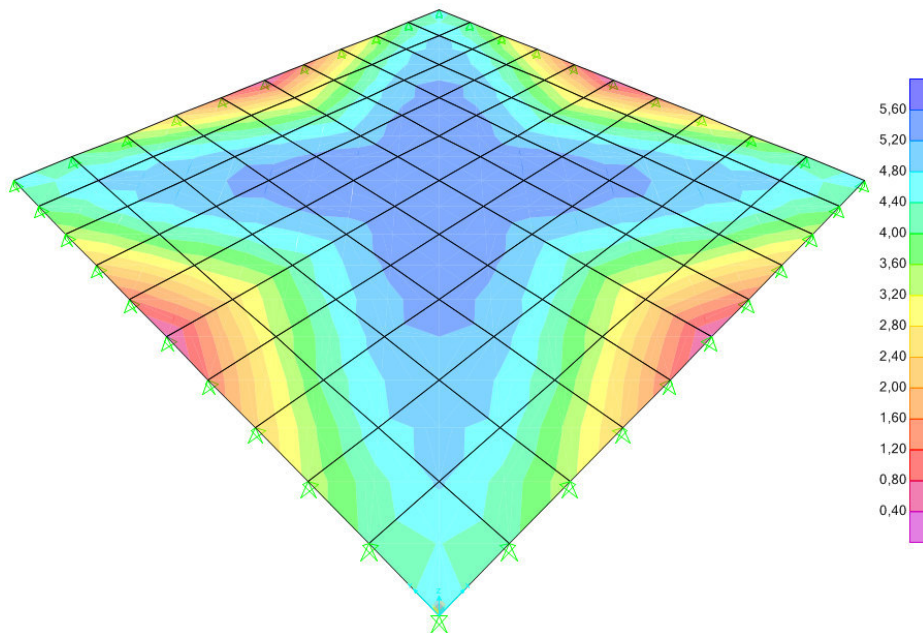
Figura 37 - Definição das combinações de carga que serão analisadas



FONTE: Próprio Autor (2013).

Após a análise do programa os resultados encontrados são mostrados tanto de maneira visual (Figura 38) como na forma de tabelas (Figura 39).

Figura 38 - Resultados em forma de gráfico



FONTE: Próprio Autor (2013).

Figura 39 - Resultados em forma de tabela

Element Forces - Area Shells

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Element Forces - Area Shells

	Area Text	AreaElem Text	ShellType Text	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	MMax KN-m/m	MMin KN-m/m
	2	2	Shell-Thin	1	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,5315	-4,4242
	2	2	Shell-Thin	5	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,2777	-4,3465
	2	2	Shell-Thin	6	UNIFORM LOAD	LinStatic	5,1649	-3,1279
	2	2	Shell-Thin	7	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,2777	-4,3465
	3	3	Shell-Thin	7	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,9795	-3,9647
	3	3	Shell-Thin	6	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,8528	-2,8419
	3	3	Shell-Thin	8	UNIFORM LOAD	LinStatic	5,0333	-1,8632
	3	3	Shell-Thin	9	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,5592	-3,5833
	4	4	Shell-Thin	9	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,0886	-3,0769
	4	4	Shell-Thin	8	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,5823	-1,4202
	4	4	Shell-Thin	10	UNIFORM LOAD	LinStatic	4,4407	-0,5619
	4	4	Shell-Thin	11	UNIFORM LOAD	LinStatic	2,5688	-2,5834
	5	5	Shell-Thin	11	UNIFORM LOAD	LinStatic	2,0212	-2,0189
	5	5	Shell-Thin	10	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,92	-0,045
	5	5	Shell-Thin	12	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,5724	0,6905
	5	5	Shell-Thin	13	UNIFORM LOAD	LinStatic	1,4593	-1,4672
	6	6	Shell-Thin	13	UNIFORM LOAD	LinStatic	0,8751	-0,876
	6	6	Shell-Thin	12	UNIFORM LOAD	LinStatic	3,0331	1,2282
	6	6	Shell-Thin	14	UNIFORM LOAD	LinStatic	2,6031	1,7825
	6	6	Shell-Thin	15	UNIFORM LOAD	LinStatic	0,2962	-0,3005

Record: 128 of 400

Add Tables... Done

FONTE: Próprio Autor (2013).

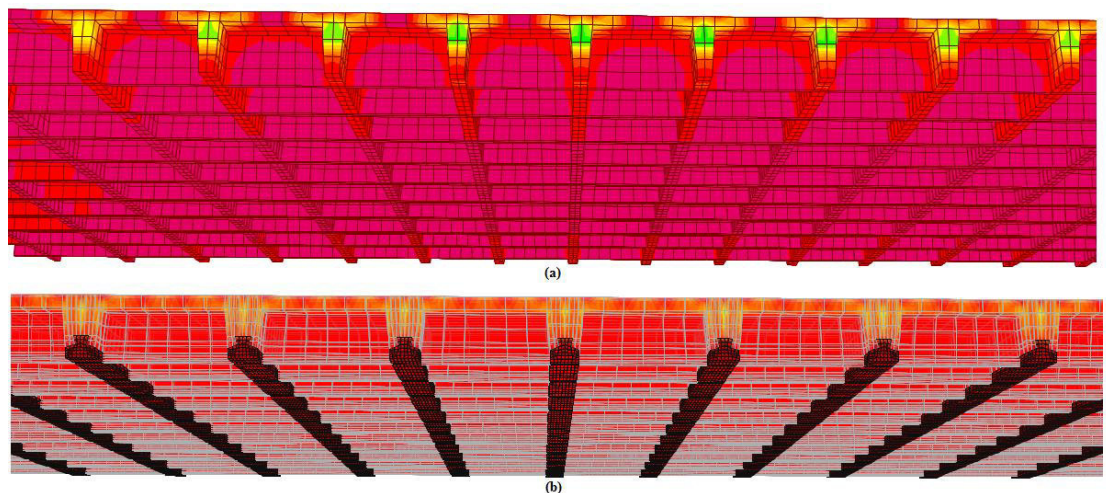
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados através de uma comparação entre as tensões máximas de cada laje para cada plano no eixo de coordenadas local. São comparadas as máximas tensões positivas e negativas normais e de cisalhamento, além da tensão de Von Mises para os mesmos planos em coordenadas locais em cada laje. Também é apresentado um comparativo entre os deslocamentos máximos encontrados em cada laje e o admitido pela NBR 6118: 2003.

Para a modelagem e consequente avaliação das tensões, as duas lajes são submetidas apenas ao peso próprio, sendo cada laje dividida em elementos de no máximo 10 cm de lado. Em cada laje foram utilizados apenas elementos sólidos, sendo a laje original composta por 2539 sólidos e 4316 nós. A laje alterada é composta por 65184 sólidos e 81568 nós.

A seção de cada laje modelada é mostrada na Figura 40 de modo a mostrar o detalhe da diferença da nervura convencional da laje original e a nervura acoplada ao trilho protendido da laje alterada.

Figura 40 – Detalhe da nervuras da (a) laje original e da (b) laje alterada no SAP 2000

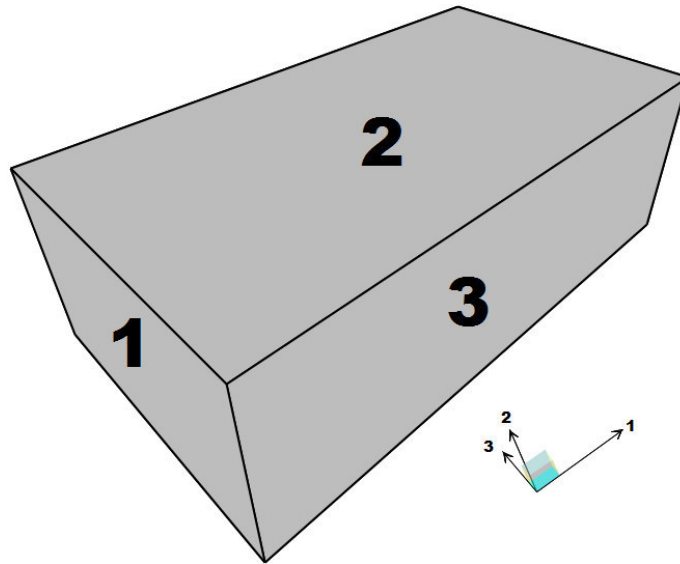


FONTE: Próprio Autor (2013).

A orientação dos eixos locais de cada sólido que compõe as lajes são adotados como mostrado (Figura 41). Assim, uma determinada tensão S_{ij} corresponde a uma tensão na face “i” atuando na direção “j” onde o sinal indica o sentido atuante na direção

determinada, sendo tração o sinal positivo e compressão o sinal negativo para as tensões normais. Quando comparado ao sistema de coordenadas global das lajes, o eixo local “1” corresponde ao eixo global “x”, o eixo local “2” corresponde ao eixo global “z” e o eixo local “3” corresponde ao eixo global “y”.

Figura 41 – Orientação dos eixos locais adotados para os sólidos



FONTE: Próprio Autor (2013).

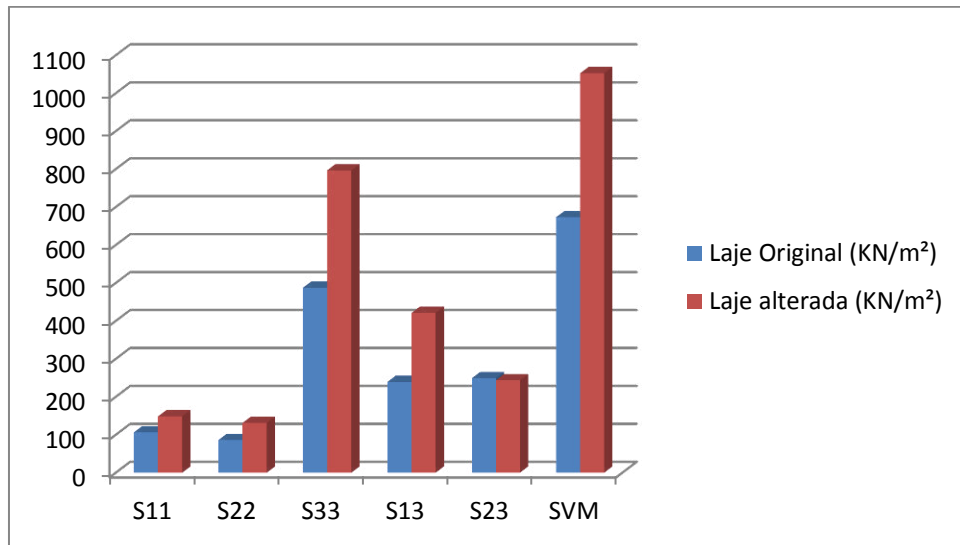
Assim, as máximas tensões positivas encontradas são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 42, onde as tensões S11, S22 e S33 são tensões normais de tração, as tensões S13 e S23 são tensões de cisalhamento e a tensão SVM é a tensão de Von Mises. Percebe-se que a laje alterada está sendo mais solicitada que a laje original, atuando em favor da segurança.

Tabela 2 – Máximas tensões positivas atuantes em cada laje

	S11	S22	S33	S13	S23	SVM
Laje Original (KN/m ²)	106,32	86,33	487,64	239,52	249	673,26
Laje alterada (KN/m ²)	148,59	131,47	796,8	421,29	243,58	1052,69

FONTE: Próprio Autor (2013).

Figura 42 – Comparação entre máximas tensões positivas nas lajes



FONTE: Próprio Autor (2013).

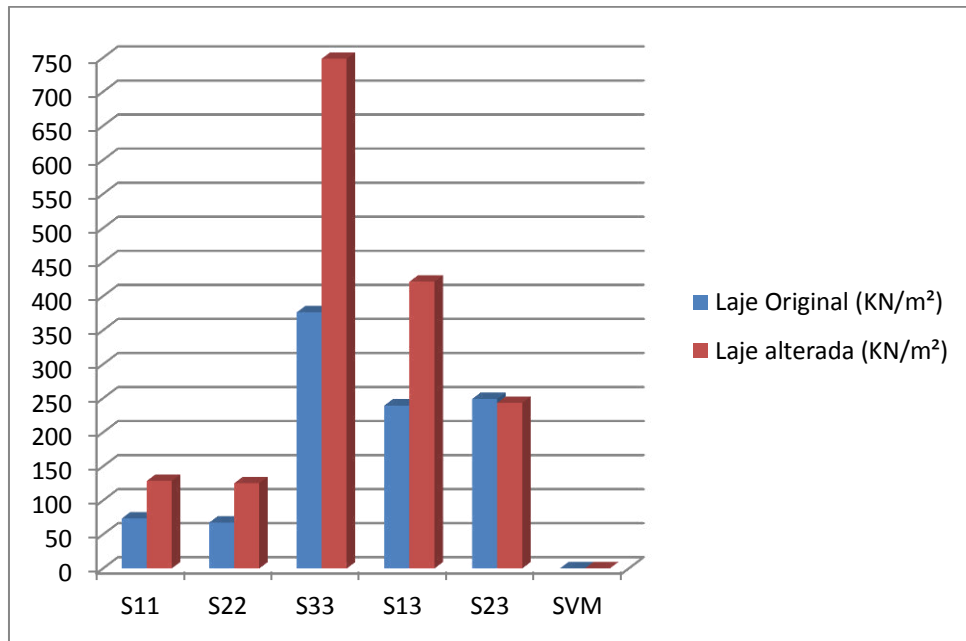
As máximas tensões negativas encontradas são apresentadas na Tabela 3 e na Figura 43, onde S11, S22 e S33 são tensões normais de compressão, as tensões S13 e S23 são tensões de cisalhamento e a tensão SVM corresponde a tensão de Von Mises que não possui valor negativo neste caso. Percebe-se que a laje alterada está sendo mais solicitada que a laje original, com destaque para a grande diferença de valores na tensão de compressão S33 devido a protensão nos trilhos.

Tabela 3 – Máximas tensões negativas atuantes em cada laje

	S11	S22	S33	S13	S23	SVM
Laje Original (KN/m²)	73,47	67,46	376,37	239,52	249	-
Laje alterada (KN/m²)	128,59	125,27	748,59	421,29	243,14	-

FONTE: Próprio Autor (2013).

Figura 43 – Comparação entre máximas tensões negativas nas lajes



FONTE: Próprio Autor (2013).

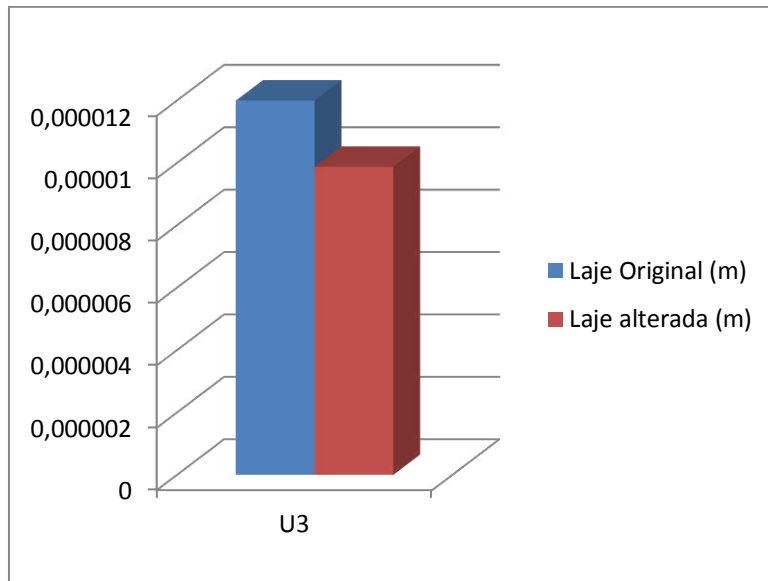
O deslocamento máximo encontrado em cada laje é apresentado na Tabela 4 e na Figura 44. Percebe-se que a laje alterada tem um deslocamento máximo menor que a laje original. Isso já era esperado visto que a laje alterada utiliza protensão em uma das direções, além de ter uma altura total menor que a original. Percebe-se também, que as duas lajes possuem deslocamento máximo bem menor que o máximo deslocamento permitido pela norma pois não foram colocadas sobrecargas sobre as lajes

Tabela 4 – Máximo deslocamento das lajes

Laje Original (m)	0,000012
Laje alterada (m)	0,000009879

FONTE: Próprio Autor (2013).

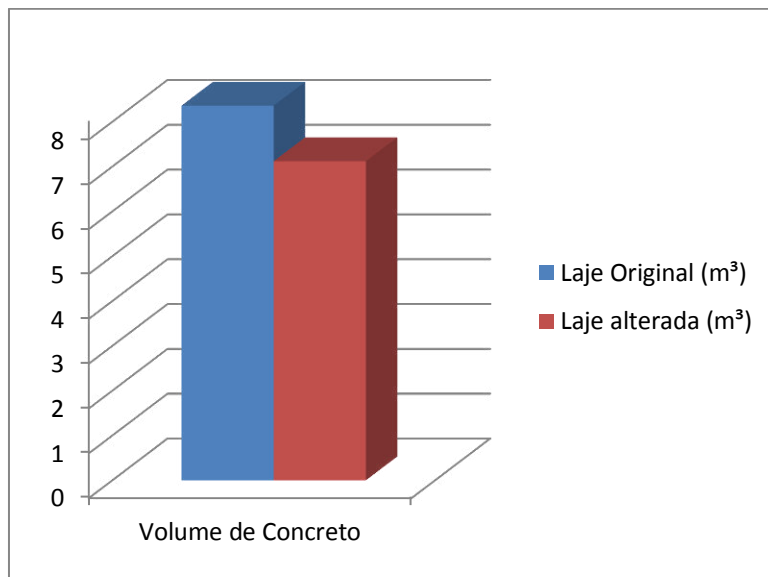
Figura 44 – Comparação entre deslocamentos máximos nas lajes



FONTE: Próprio Autor (2013).

Quando comparadas quantitativamente, a laje alterada reduziu 7 cm em sua altura total e cerca de 1,24 m³ no volume de concreto conforme mostra a Figura 45.

Figura 45 – Comparação entre os volumes de concreto das lajes



FONTE: Próprio Autor (2013).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho busca analisar comparativamente em termos de esforços e deslocamentos a laje nervurada executada e a laje nervurada projetada de uma escola construída no interior do Ceará. A laje executada foi alterada em relação ao projeto original, tendo sua altura total reduzida, as dimensões das nervuras alteradas e sendo utilizados trilhos em concreto protendido em uma das direções da laje, estes associados as nervuras de tal direção. Para analisar as duas lajes foi utilizado o método dos elementos finitos através do programa SAP 2000.

Nas condições em que foram modeladas as duas lajes, sendo adotado o modelo de lajes isoladas simplesmente apoiadas nas 4 bordas e submetidas apenas ao peso próprio, sem a interferência de cargas acidentais nem cargas permanentes de outros tipos, os resultados obtidos com a utilização do método dos elementos finitos mostra uma diferença bastante significativa nas máximas tensões normais, tanto de tração, quanto de compressão. A máxima tensão de cisalhamento atuante na face 1 e na direção 3 (S_{13}) obteve um resultado maior na laje alterada, tanto na direção positiva quanto na negativa do eixo, diferentemente da tensão de cisalhamento atuante na face 2 e direção 3 (S_{23}), que se manteve muito próxima nas duas lajes. A tensão de cisalhamento atuante na face 1 e direção 2 (S_{12}) não foi comparada por seus valores estarem muito próximos de zero.

Optou-se pela comparação da máxima tensão de Von mises (SVM) por ser uma tensão resultante das tensões principais dos elementos. Neste caso, só foi obtida uma máxima tensão positiva, sendo esta bem superior na laje alterada.

Quanto ao deslocamento máximo, as duas lajes apresentam valores bem abaixo do limite estabelecido pela NBR 6118: 2003 para aceitabilidade visual, sendo este igual a dimensão do menor vão da laje dividido por 250. Isto aconteceu porque as duas lajes foram analisadas apenas com seus pesos próprios, sem a adição de sobrecargas. Assim, comparando os dois valores obtidos, percebe-se que a laje alterada desloca-se menos que a laje original.

Os resultados obtidos já eram esperados, pois a laje alterada possui protensão em um dos sentidos das nervuras. Em geral, a laje alterada está sendo mais solicitada que a laje original, o que atua em favor da segurança, ao mesmo tempo, possui um

deslocamento máximo cerca de 17% menor que a laje original. Além disso, a altura total da laje foi reduzida em 7 cm e houve uma economia de 1,24 m³ de concreto.

Estruturalmente e geometricamente a comparação entre as lajes mostrou que a alteração no projeto original trouxe vantagens, pois a laje alterada é mais rígida que a original. Porém, não foi possível uma análise de custo das duas lajes em virtude da dificuldade de obtenção dos dados e custos dos trilhos protendidos, por terem sido fornecidos por uma empresa especializada em pré-moldados. Assim, recomenda-se a análise de custos para a verificação de uma possível vantagem econômica na alteração do projeto original da laje. Além disso, recomenda-se a análise das duas lajes com seus respectivos pesos próprios adicionados das sobrecargas e cargas acidentais para uma melhor avaliação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. F. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 5. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 6120**: Cargas para o calculo de estrutura de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- BASTOS, P. S. S. **Históricos e principais elementos estruturais de concreto armado**. 2006. Nota de aula oferecida pela disciplina relativa aos Sistemas Estruturais I do Departamento de Engenharia Civil da UNESP, Bauru, 2006.
- BECKER, Thymonthy. **Coliseu de Roma**. 2012. Disponível em: <<http://pwalwer.blogspot.com.br/2012/02/coliseu-de-roma.html>>. Acesso em: 11 set. 2013.
- BOCCHI JUNIOR, C. F. **Concreto armado: projeto e construção de lajes nervuradas**. 2007. Nota de aula oferecida pela disciplina relativa à Estrutura de Concreto do curso de Engenharia Civil da USP, São Carlos, 2007.
- CAMPANI, Paula Barth. **Análise comparativa entre lajes nervuradas simples e duplas por analogia de grelha**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica (UEM)**, Maringá, v. 17, n. 17, p. 19-28, 2008.
- CARVALHO, R.C.; PINHEIRO, L.M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, 2009. v.2.
- DIAS, Ricardo Henrique. **Sistema de laje nervurada sem vigas**. 2004. Disponível em: <<http://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/04.044/622>>. Acesso em: 23 set. 2013.
- DORNELLES, Givic. **Panteão Romano**. 2012. Disponível em: <<http://arquiteturadaroma.blogspot.com.br>>. Acesso em: 11 set. 2013.
- EMERICK, A. **A Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, v. 1. 2002.
- MELGES, J.L.P. **Punção em lajes**: Exemplos de cálculo e análise teórico-experimental. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

PEREIRA, Valéria Selene. **Basílica de Constantino**. 2012. Disponível em: <http://deedellaterra.blogspot.com.br/2012_03_01_archive.html>. Acesso em 11 set. 2013.

SILKA PEREIRA, Jorgue. **Concreto protendido e lajes protendidas com monocordalhas engraxadas**: noções gerais solução estrutural e correta execução. 2005. Apostila do curso oferecido pela Comunidade de Construção, Curitiba, 2005.

SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SILVA, M. A. F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SOUSA, Maria Helena. **Aqueduct Pont Du Gard**. 2011. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/pais/noblat/posts/2011/05/14/engenharia-pont-du-gard-franca-40-60-c-380401.asp>>. Acesso em: 11 set. 2013.

SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TRINDADE, Nuno Verdelho. **Complexo Hidroelétrico de Itaipu**. 2010. Disponível em: <<http://www.engenhariacivil.com/maiores-obras-engenharia-civil-brasil>>. Acesso em: 13 set. 2013.

_____. **Ponte Rio Niterói**. 2010. Disponível em: <<http://www.engenhariacivil.com/maiores-obras-engenharia-civil-brasil>>. Acesso em: 13 set. 2013.

VELLOSO, F.C. Ponte Rio-Niterói: um marco em nossa engenharia. **O Saber: Revista Técnico-Científica**, Brasília, ano 5, n. 5, p.16-24, abr. 2011.