

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Libni Angelim Feijó
Rômulo Vilela Ramos Dutra

ANÁLISE APLICATIVA DE MODELOS DE LAJE NERVURADA DE
CONCRETO ARMADO E LAJE MACIÇA PROTENDIDA

Recife

2014

LIBNI ANGELIM FEIJÓ
RÔMULO VILELA RAMOS DUTRA

**ANÁLISE APLICATIVA DE MODELOS DE LAJE NERVURADA DE
CONCRETO ARMADO E LAJE MACIÇA PROTENDIDA**

Dissertação apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Professor orientador:

Sérgio do Rêgo Barros Machado Dias

Recife

2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

F297a

Feijo, Libni Angelim.

Análise aplicativa de modelos de laje nervurada de concreto armado e laje maciça protendida. / Libni Angelim Feijó e Rômulo Villela Ramos Dutra - Recife: Os Autores, 2014.

74 folhas, Ils. e Tabs.

Orientador: Profº. Sérgio do Rêgo Barros Machado Dias.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Graduação em Engenharia Civil, 2014.
Inclui Referências e anexos.

1. Engenharia Civil. 2.Construção civil. 3. Lajes nervuradas. 4.Lajes protendidas. 5. Concreto armado. I. Dutra, Rômulo Villela Ramos. II.Dias, Sérgio do Rêgo Barros. (Orientador). III.Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2014-261

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Ceiça Angelim e Eraldo Feijó, que me deram todas as condições possíveis e não mediram esforços para que eu realizasse esse sonho. A paciência, segurança e confiança transmitidas por aconselhamentos diários do meu pai me possibilitaram ultrapassar os obstáculos acadêmicos e perseverar por mais vitórias. O amor incondicional, o cuidado e dedicação maternos me fortaleceram demais para que eu chegasse até esta etapa. Valeu à pena, meus pais, todo o sofrimento, as renúncias, distância, hoje os frutos estão sendo colhidos. Esta vitória é muito mais de vocês do que minha.

Libni Angelim Feijó.

Dedico este trabalho aos meus projetistas, Sandra Regina e Antônio Dutra, que são dignos de glória, por investirem tanto em um projeto tão complexo, pela bravura com a qual suportaram as sobrecargas impostas pela vida, sem que houvesse parcela alguma de recalque em suas estruturas, verdadeiras obras inabaláveis.

Rômulo Dutra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde, paz e capacidade para vencer esta árdua e trabalhosa etapa de minha vida que foi a graduação em Engenharia Civil. A formação acadêmica diante de tantos desafios pessoais e acadêmicos foi uma maravilhosa benção derramada sobre mim.

Aos meus pais, por todo o amor, compreensão e educação que me deram ao longo de toda minha vida. O apoio nos momentos mais difíceis e a confiança no meu potencial foram irrestritos e a participação nas horas mais felizes, completa.

À minha querida namorada, por todo o companheirismo e cumplicidade nos últimos anos, sendo mais um suporte em minha vida. O meu muito obrigado pelo carinho, paciência e capacidade de me trazer paz na correria de cada período letivo.

Aos meus familiares, por representarem fielmente a verdadeira essência do vocábulo família no que se refere à fidelidade, lealdade e carinho.

Aos meus amigos, por tantos momentos felizes compartilhados e conselhos nas situações mais críticas. Em especial, o agradecimento se estende aos companheiros de curso que partilharam comigo, por inúmeras vezes, dias e noites inteiras dedicadas aos estudos. Representam uma parcela significativa do meu sucesso.

Aos meus mestres, por todos os conhecimentos transmitidos. Hoje me permito vislumbrar um horizonte maior na vida, pautado por respeito e ética profissionais graças a eles.

Libni Angelim Feijó

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu filho Bernardo Dutra, por vir, no decorrer do curso, impulsionar as minhas últimas forças para conclusão do mesmo.

À Camila Dutra, minha amada esposa, por ser peça fundamental no desenvolvimento do meu sucesso.

Aos meus pais Antônio Vilela e Sandra Regina, pela sabedoria a mim transmitida na forma de educação.

Aos meus irmãos Cinthia Regina e Ryan Vilela, pelo companheirismo e cumplicidade.

Aos compadres Victor Rocha e Guilherme Farias, por serem meus conselheiros nas minhas tomadas de decisões.

Aos meus mestres pela experiência e conhecimentos técnicos compartilhados da melhor maneira possível.

Aos melhores amigos, com quem sempre pude contar de alguma forma nesta caminhada.

Aos meus familiares, que sempre acreditaram no meu sucesso e admiraram o minha dedicação.

Rômulo Vilela Ramos Dutra

”Não são os grandes planos que dão certo, são os pequenos detalhes.”

Stephen Kanitz

RESUMO

A construção civil está sempre em busca de soluções tecnológicas simples, versáteis e econômicas para aplicação segura nas estruturas. Dentro desse contexto, alguns tipos de lajes estão inseridos, apresentando avanços construtivos relevantes para a Engenharia Civil. O presente documento trata-se de um estudo atualizado dos conceitos, aplicações e métodos de execução de duas destas modalidades estruturais, são elas: as lajes nervuradas de concreto armado e as lajes maciças protendidas.

Além dessa abordagem, é apresentada uma análise de aplicação desses modelos de lajes no intuito de estabelecer a relação econômica entre os insumos e mão-de-obra de cada tipo. Para tanto, são mostrados dois projetos reais distintos, tratados como estudos de caso referentes a cada um dos sistemas estruturais citados, no intuito de levantar os consumos de materiais, custos e produtividade.

Palavras-chave: Construção Civil. Lajes nervuradas. Lajes protendidas. Concreto armado.

ABSTRACT

Civil construction is always looking for simple, versatile and cost effective technology solutions for safe application of the structures. In this context, some types of slabs are inserted, presenting relevant constructive advances for Civil Engineering. This document it's related to a study of the concepts, applications, and methods of implementation of these two structural forms, they are: the waffle slabs of reinforced concrete and prestressed solid slabs.

Besides this approach, an analysis of applying these models slabs in order to establish the economic relationship between the inputs and hand labor of each type is presented. For that, are shown two distinct real projects, treated as case studies for each of the structural systems mentioned, in order to elaborate a research about consumption of materials, costs and productivity.

Keywords: Construction. Ribbed slabs. Prestressed slabs. Reinforced concrete.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	13
1.2. Motivação	13
1.3. Objetivos	14
2. LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO	15
2.1. Conceito	15
2.2. Histórico	16
2.3. Tipologia e Materiais Construtivos	17
2.3.1. Lajes Nervuradas Moldadas in loco	18
2.3.2. Lajes Nervuradas Pré-moldadas	21
2.4. Procedimento Executivo	22
2.4.1. Lajes Nervuradas Moldadas in Loco	22
2.4.2. Lajes Nervuradas Pré-moldadas	27
2.5. Aplicações	28
3. LAJES MACIÇAS PROTENDIDAS	30
3.1. Conceito	30
3.2. Histórico	32
3.3. Aplicações	33
3.4. Materiais Construtivos	34
3.4.1. Fôrma	34
3.4.2. Armação	36
3.4.2.1. Armação passiva	36
3.4.2.2. Armação ativa	39
3.4.3. Ancoragem	40
3.5. Tipos de Lajes Planas Protendidas	42
3.5.1. Plana lisa	42
3.5.2. Plana com capitel	43
3.5.3. Plana com vigas	44
3.6. Procedimento Executivo	45
4. METODOLOGIA	50
4.1. Estudo de Caso A – Laje Nervurada de Concreto Armado	50

4.1.1.	Análise do consumo dos materiais para laje nervurada	52
4.1.2.	Análise econômica das fôrmas para laje nervurada	54
4.1.3.	Análise econômica do aço e do concreto para a laje nervurada	54
4.1.4.	Análise econômica da mão de obra para a execução da laje nervurada	54
4.2.	Estudo de Caso B – Laje Maciça Protendida	55
4.2.1.	Análise do consumo dos materiais para laje protendida	58
4.2.2.	Análise econômica das fôrmas para laje protendida	59
4.2.3.	Análise econômica do aço e do concreto para laje protendida	59
4.2.4.	Análise econômica da mão de obra e equipamentos para execução da laje protendida	60
5.	COMPARATIVOS	61
5.1.	Composição de Custo	61
5.2.	Consumos Individuais	62
5.2.1.	Concreto	62
5.2.2.	Aço	63
5.3.	Produtividade	64
5.4.	Custos Unitários	64
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
7.	REFERÊNCIAS	69

Lista de Ilustrações

<u>Figura 1 – Exemplo de Laje Nervurada. (Revista Techne)</u>	15
<u>Figura 2 – Corte transversal de uma laje nervurada de concreto armado. (UFRGS, Departamento de Engenharia Civil)</u>	16
<u>Figura 3 – Lajes nervuradas de concreto armado, compostas por blocos cerâmicos entre nervuras. (Concrete and Constructional Engineering, Nov. 1913, Vol. III)</u>	17
<u>Figura 4 - Laje nervurada moldada in loco com faces inclinadas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)</u>	18
<u>Figura 5 - Laje nervurada moldada in loco com faces não inclinadas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)</u>	18
<u>Figura 6 - Laje nervurada invertida. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)</u>	19
<u>Figura 7 - Laje nervurada invertida com piso pré-fabricado. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)</u>	19
<u>Figura 8 - Lajes Nervuradas Duplas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)</u>	20
<u>Figura 9 - Laje nervurada constituída de poliestireno expandido como material de enchimento. (Santorini Residencial, AMC Construtora)</u>	21
<u>Figura 10 - Laje Nervurada Pré-Moldada Tipo Trilho ou Volterrana. (Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado. São Carlos, 2005. DA SILVA, Marcos Alberto Ferreira)</u>	22
<u>Figura 11 – Laje Nervurada Pré-Moldada Treliçada. (Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado. São Carlos, 2005. DA SILVA, Marcos Alberto Ferreira)</u>	22
<u>Figura 12 – Escoramento Metálico. (Universidade Feevale, Departamento de Arquitetura)</u>	23
<u>Figura 13 – Montagem de Fôrmas de Polipropileno. (www.atex.com.br)</u>	24
<u>Figura 14 – Bloco Celular Como Material de Enchimento da Laje. (UFMG, Departamento de Engenharia Civil)</u>	24
<u>Figura 15 – Espaçador de Blocos Posicionado na Interseção das nervuras. (UFMG, Departamento de Engenharia Civil)</u>	25
<u>Figura 16 – Armadura Longitudinal das Nervuras. (www.atex.com.br)</u>	25
<u>Figura 17 – Armadura de Distribuição de uma Mesa. (www.atex.com.br)</u>	25
<u>Figura 18 – Concretagem de Laje Nervurada. (www.ufrgs.br)</u>	26
<u>Figura 19 – Exemplo de Fôrma para Laje Pré-moldada Tipo Treliça. (Lajes Nervuradas de Concreto armado: Projeto e Execução. BOCCHI JR, 2005.)</u>	27
<u>Figura 20 – Exemplo de Fôrma para Laje Pré-moldada Tipo Trilho. (Lajes Nervuradas de Concreto armado: Projeto e Execução. BOCCHI JR, 2005.)</u>	28
<u>Figura 21 – Emprego de Laje Nervurada de Concreto Armado. (www.atex.com.br)</u>	29
<u>Figura 22 – Emprego de Laje Nervurada de Concreto Armado. (www.arcoweb.com.br)</u>	29

<u>Figura 23 – Emprego da Laje Nervurada de Concreto Armado no Ginásio Poliesportivo da PUC/RS. (www.arcoweb.com.br)</u>	29
<u>Figura 24 – Esquema Representativo da Ação das Cargas.</u>	31
<u>Figura 25 – Lift Slab. (www.dictionaryofconstruction.com)</u>	32
<u>Figura 26 – Conjunto de Cimbramento e Escoramento Metálico. (www.rpaltda.com.br)</u>	35
<u>Figura 27 – Conjunto de Fôrma e Escoramento Metálico. (SH FÔRMAS)</u>	36
<u>Figura 28 – Modelo de Tela Eletrosoldada. (www.belgo.com.br)</u>	38
<u>Figura 29 – Barras de Aço GG50. (www.belgo.com.br)</u>	39
<u>Figura 30 – Cordoalha Engraxada Modelo CP 190 RB. (www.impactoprotensao.com.br)</u>	40
<u>Figura 31 – Ancoragem de Cordoalhas. (Projeto e execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)</u>	41
<u>Figura 32 – Detalhamento Prático de Ancoragem. (Projeto e execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)</u>	42
<u>Figura 33 – Laje Plana Lisa</u>	43
<u>Figura 34 – Laje Plana com Capitel</u>	44
<u>Figura 35 – Laje Plana com Viga</u>	45
<u>Figura 36 – Assoalho de Chapa Compensado Plastificado</u>	46
<u>Figura 37 – Armação Passiva Positiva de Tela (painel) Soldada</u>	46
<u>Figura 38 – Aplicação da Armação Ativa. (www.gaussprotensão.com.br)</u>	47
<u>Figura 39 – Roteiro de Execução da Laje Protendida</u>	49
<u>Figura 40 – Estudo de Caso A: Modelo Fôrma Laje Nervurada do Pavimento Tipo</u>	51
<u>Figura 41 – Seção Transversal da Laje</u>	51
<u>Figura 42 – Planta das Nervuras</u>	52
<u>Figura 43 – Vista Geral do Pavimento de Laje Nervurada Pré Concretagem</u>	52
<u>Figura 44 – Estudo de Caso B: Modelo Fôrma Laje Maciça</u>	57
<u>Figura 45 – Vista Geral do Pavimento de Laje Lisa Protendida Pré-concretagem</u>	57
<u>Figura 46 – Gráfico de Composição de Custo Caso B</u>	61
<u>Figura 47 – Gráfico de Composição de Custo Caso B</u>	62
<u>Figura 48 – Gráfico do Consumo de Concreto</u>	63
<u>Figura 49 – Gráfico do Consumo de Aço</u>	63
<u>Figura 50 – Gráfico da Produtividade de Execução</u>	64
<u>Figura 51 – Gráfico dos Custos Unitários</u>	65

Lista de Tabelas

<u>Tabela 1 – Relação Entre Vãos e Espessuras das Lajes Protendidas. (Projeto e Execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)</u>	34
<u>Tabela 2 – Detalhamento das Barras de Aço GG50. (www.belgo.com.br)</u>	37
<u>Tabela 3 – Consumo de Fôrmas Caso A.</u>	53
<u>Tabela 4 – Consumo de Aço Caso A.</u>	53
<u>Tabela 5 – Custo de Fôrma Caso A.</u>	54
<u>Tabela 6 – Custo de Aço e de Concreto Caso A.</u>	54
<u>Tabela 7 – Mão de Obra Caso A.</u>	55
<u>Tabela 8 – Consumo de Fôrma Caso B.</u>	58
<u>Tabela 9 – Consumo de Aço Caso B.</u>	58
<u>Tabela 10 – Custo de Fôrma Caso B.</u>	59
<u>Tabela 11 – Custo de Aço e de Concreto Caso B.</u>	59
<u>Tabela 12 – Custo de Mão de Obra Caso B.</u>	60

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho as execuções das lajes nervuradas de concreto armado e maciças protendidas foram analisadas no intuito de definição da relação que elas possuem entre si na sua utilização na construção civil. Inicialmente são apresentadas as características de cada um dos modelos, assim como de onde e quando se deu o seu surgimento, as melhorias realizadas através da contínua utilização a fim de atender as necessidades de cada época.

A análise foi elaborada através de estudo de casos e os levantamentos quantitativos referentes, o que resultou em um determinado consumo de materiais específico para cada um dos modelos de construção de laje. Foram quantificados os principais itens utilizados na concepção de cada modelo, bem como orçados os seus custos com materiais e de operação, levando em consideração as respectivas particularidades.

Os resultados são apresentados por meio de tabelas e gráficos, dotados dos consumos de fôrma, concreto, aço e mão de obra, permitindo, por fim, a apresentação da conclusão do trabalho com as análises relativas aos resultados observados.

1.1. Justificativa

Existe uma forte tendência atualmente para o emprego de lajes que vençam grandes vãos e resistam às solicitações de carregamento mantendo a estabilidade. Nessa visão, as lajes nervuradas de concreto armado e as lajes maciças protendidas são ótimas soluções estruturais porque, sobretudo são peças mais econômicas e de melhor desempenho estrutural em relação às lajes maciças simples de concreto armado. Por isso, são lajes de importante relevância para a Engenharia Civil, as quais merecem uma abordagem mais profunda em relação às suas generalidades, aplicações e vantagens.

1.2. Motivação

O que resultou na determinação do presente estudo foi a possibilidade de elaborar apresentação prática e objetiva, capaz de esclarecer as dúvidas quanto às aplicações de modelos econômicos de lajes para pavimentos de edificações. Além

do que, as relações entre seus custos e peculiaridades aqui apresentadas, possibilitará aos usuários uma fonte segura e atualizada para a tomada de decisões que melhor atendam seus interesses.

1.3. Objetivos

O trabalho visa à apresentação dos modelos estruturais de laje nervurada de concreto armado e laje maciça protendida a partir da abordagem de conceitos, tipologia, materiais construtivos e aplicações para cada tipo. Após a descrição das generalidades, buscou-se obter parâmetros de utilização e econômicos relativos aos custos com materiais construtivos e mão-de-obra, além de uma breve análise de produtividade, para os dois modelos de caso inseridos no capítulo 4.

2. LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

2.1. Conceito

As lajes nervuradas são estruturas constituídas de nervuras longitudinais e transversais conectadas por uma mesa de compressão. Segundo a NBR 6118, são lajes no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Alguns autores consideram a laje nervurada como um elemento estrutural de comportamento transitório entre a laje maciça e a grelha.

Esse modelo de laje surgiu com o intuito de reduzir o consumo de concreto e aço principalmente em estruturas concebidas para vencer grandes vãos. O avanço arquitetônico decorrente do aumento dos vãos inviabilizou a aplicação das lajes maciças devido ao alto consumo de materiais e complexidade construtiva. Nesse contexto, as lajes nervuradas são alternativas estruturais que possibilitam considerável simplicidade e rapidez de execução. A figura 1 apresenta um exemplo de laje nervurada.

O material inerte colocado entre as nervuras deve ser um produto leve para atender ao objetivo de substituir e reduzir o concreto pouco resistente da região de tração, como poliestireno expandido (isopor), blocos de concreto celular autoclavado e blocos cerâmicos, sendo estes últimos menos utilizados atualmente. Pode ainda não haver o material de preenchimento dos espaços vazios entre as nervuras. As lajes nervuradas de concreto armado podem ser armadas em uma ou duas direções.



Figura 1 – Exemplo de Laje Nervurada. (Revista Techne)

No escopo do presente trabalho, inserem-se apenas as lajes nervuradas simplesmente armadas e as lajes maciças concebidas com o artifício da protensão. Neste capítulo são apresentadas somente as primeiras, as quais são projetadas em concreto armado. A figura 2 representa um corte transversal da estrutura de uma laje nervurada de concreto armado com uma disposição das armações bastante utilizada na prática.

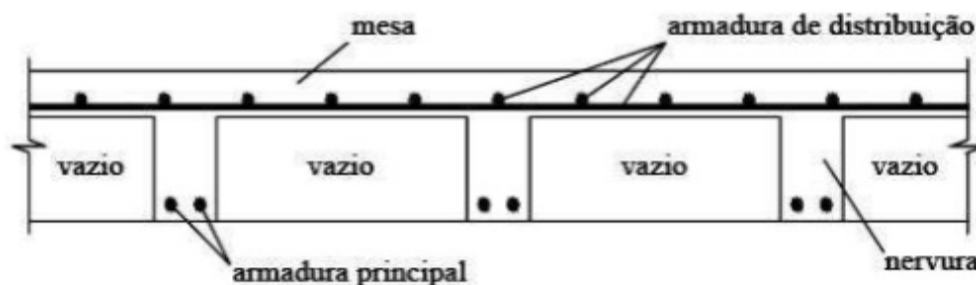


Figura 2 – Corte transversal de uma laje nervurada de concreto armado. (UFRGS, Departamento de Engenharia Civil)

2.2. Histórico

Estruturas horizontais reticuladas semelhantes às lajes nervuradas são empregadas desde as antigas civilizações. Romanos, otomanos, gregos e bizantinos demonstram o uso deste tipo de laje em algumas de suas antigas edificações ainda hoje preservadas. O registro mais famoso de estruturas reticuladas semelhantes é o quadro “A Última Ceia” de Leonardo Da Vinci de 1498, o qual reproduz um ambiente do século I.

As primeiras lajes nervuradas de concreto armado da história foram concebidas pelo inglês Willian Boutland Wilkinson em 1854. Ele elaborou uma estrutura composta de um conjunto de blocos de gesso que funcionavam de suporte para a colocação do concreto uniformemente, permitindo a moldagem de nervuras com uma espécie de capa na parte superior. A laje executada por ele tinha vãos de aproximadamente 4 metros e espessura das nervuras de 4 cm. A figura 3 apresenta umas das primeiras lajes nervuradas a serem executadas no mundo, em Londres no ano de 1913.

Os primeiros estudos sobre lajes nervuradas convencionalmente armadas relevantes para a Engenharia Civil são publicações técnicas sobre projeto e detalhamento de Leonhardt(1909/1909). Outro autor de importante contribuição nas

pesquisas dessa área é o engenheiro espanhol Montoya, cuja principal obra bibliográfica trata do concreto armado em estruturas como as lajes nervuradas.

As primeiras fôrmas a serem utilizadas foram as de madeira, em seguida houve a evolução para as de fibra de vidro e inertes. Com o avanço da tecnologia, atualmente se utilizam fôrmas recuperáveis de polipropileno.

Com o decorrer dos anos outros tipos de materiais foram sendo empregados como preenchimento, visando o aperfeiçoamento do método que já poupava quantidades significativas de materiais. Nos dias atuais as fôrmas continuam a ser utilizadas, sendo parte integrante (inerte) da estrutura ou até mesmo fôrmas reutilizáveis que proporcionam o vazio na parte abaixo da mesa.



Figura 3 – Lajes nervuradas de concreto armado, compostas por blocos cerâmicos entre nervuras. (Concrete and Constructional Engineering, Nov. 1913, Vol. III)

2.3. Tipologia e Materiais Construtivos

As lajes nervuradas de concreto armado se subdividem em dois tipos: as lajes nervuradas moldadas in loco e as lajes nervuradas pré-moldadas. As primeiras são executadas no local da obra e as segundas são lajes com nervuras constituídas de vigotas pré-moldadas.

2.3.1. Lajes Nervuradas Moldadas in loco

Estas lajes são executadas inteiramente no local da obra, em suas posições definitivas. Os materiais construtivos necessários são as fôrmas, os escoramentos, concreto e aço estrutural. As fôrmas podem ser de madeira, de fibras de vidro, metálicas ou de plástico reutilizáveis. O cimbramento tem como estrutura de suporte, escoras metálicas ou de madeira.

As fôrmas das lajes nervuradas moldadas in loco, podem ser classificadas quanto à inclinação de suas faces, em inclinadas e não inclinadas. As fôrmas inclinadas são utilizadas quando se deseja obter uma maior facilidade de retirada com ângulo, entre face inferior da mesa e face lateral da nervura, maior que 90° , ver Figura 4. As fôrmas não inclinadas são aquelas cuja inclinação entre mesa e nervura é de 90° , ver Figura 5.

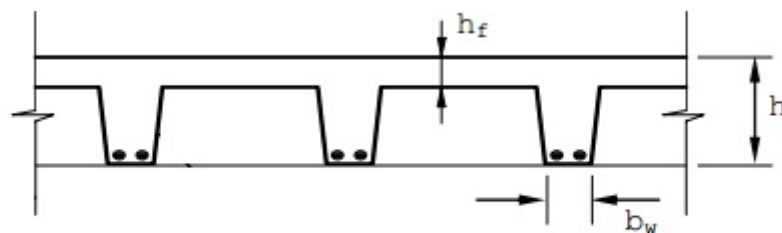


Figura 4 - Laje nervurada moldada in loco com faces inclinadas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)

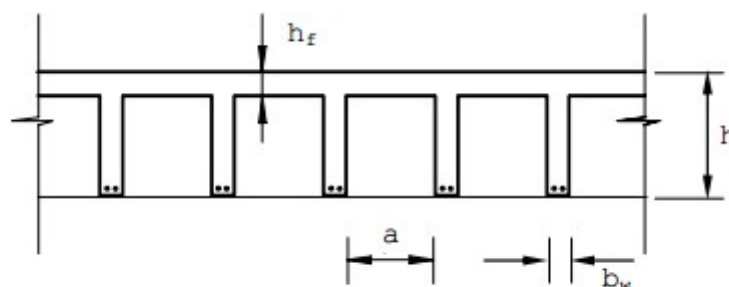


Figura 5 - Laje nervurada moldada in loco com faces não inclinadas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)

Quanto à posição das nervuras na seção transversal, as lajes nervuradas moldadas in loco são classificadas em direta, invertida e dupla. A mais comum é a laje direta, que possui as nervuras sob a mesa de compressão. A laje invertida é utilizada quando se deseja combater mais eficientemente momentos negativos, para fins estéticos com o intuito eliminar o uso de forro ou ainda, quando não for previsto piso no projeto arquitetônico, ver Figura 6. Caso haja a necessidade de piso, pode-se executar a laje nervurada invertida com piso pré-fabricado sobre as nervuras, ver Figura 7. Há ainda a utilização de lajes nervuradas duplas com fôrmas perdidas, as quais apresentam mesas inferior e superior, apresentando armadura de mesa inferior na ocasião de momentos positivos predominantes, ou armação superior para momentos negativos, ver Figura 8.

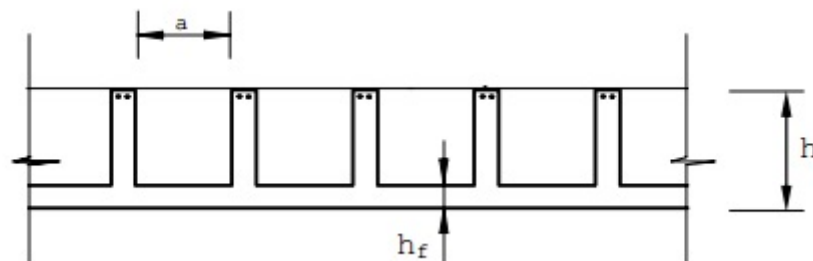


Figura 6 - Laje nervurada invertida. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)

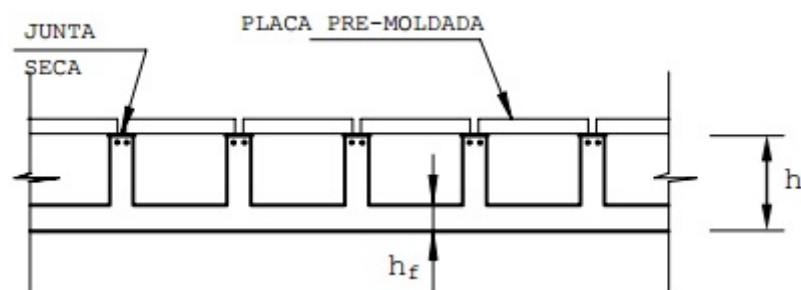


Figura 7 - Laje nervurada invertida com piso pré-fabricado. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)

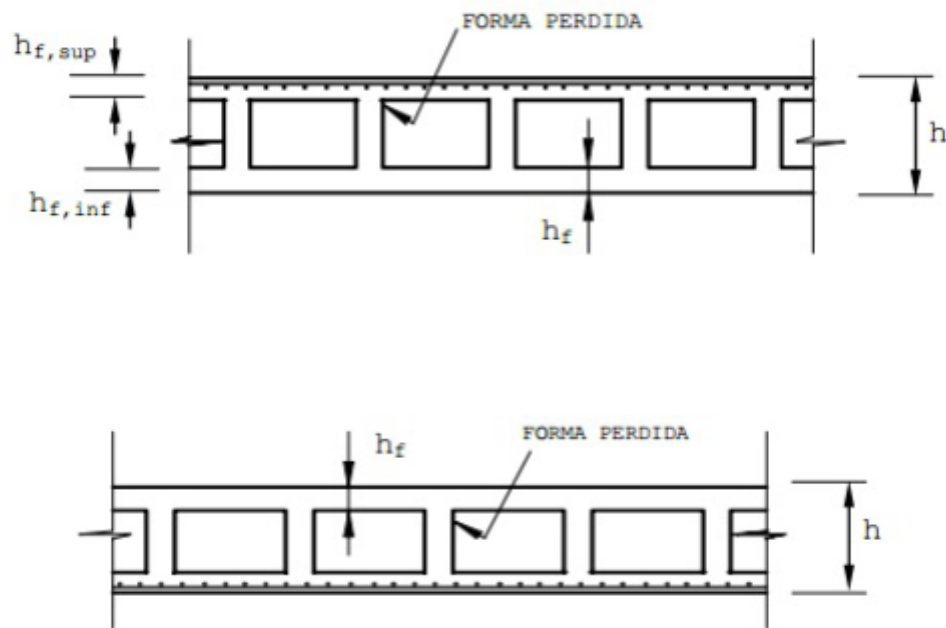


Figura 8 - Lajes Nervuradas Duplas. (Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas, 2007. GIONGO, J.S. e BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando)

Ainda em relação às posições transversais das lajes, estas podem apresentar as faces das nervuras em formato curvo ou fôrma perdida em forma de tubo. Quanto à posição das nervuras em planta, as lajes nervuradas de concreto armado, moldadas in loco podem ser unidirecionais quando armadas apenas em uma direção ou bidirecionais, quando armadas nos sentidos transversal e longitudinal.

As lajes nervuradas podem não apresentar material de enchimento entre as nervuras, com o intuito de possibilitar uma redução maior do consumo de materiais. Desde as primeiras execuções de lajes nervuradas são aplicados blocos cerâmicos como material de enchimento, porém a busca por soluções alternativas de materiais leves levou ao uso de concreto celular e poliestireno expandido (isopor) para preenchimento dos vazios entre as nervuras, ver Figura 9. Por muitas vezes, evita-se a manutenção dos vazios para proporcionar melhor estética e, é também nesse contexto que se justifica a necessidade de aplicação de materiais de enchimento leves.

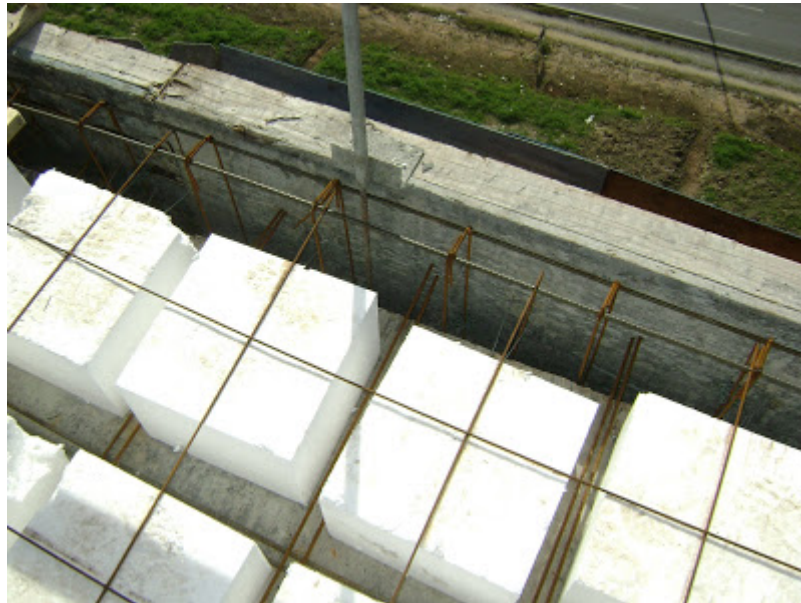


Figura 9 - Laje nervurada constituída de poliestireno expandido como material de enchimento. (Santorini Residencial, AMC Construtora)

2.3.2. Lajes Nervuradas Pré-moldadas

As lajes nervuradas pré-moldadas são aquelas em que parte da nervura é produzida fora do local da obra. Essas partes são as vigotas pré-fabricadas constituintes das nervuras. O concreto adicional à composição das nervuras e a capa de compressão solidarizada às nervuras são moldadas in loco.

Os materiais construtivos empregados são classificados em dois grupos, um é relativo à fabricação das vigotas pré-moldadas e outro devido à concretagem da capa de compressão e de parte da nervura no local definitivo da obra; porém são os mesmos utilizados na execução de lajes nervuradas moldadas in loco. As diferenças referem-se apenas aos procedimentos executivos, os quais serão detalhados no próximo tópico.

Para este tipo de laje não é necessário o uso de fôrmas para concretagem da mesa e de parte da nervura, as vigotas pré-fabricadas e o material de enchimento realizam a função das fôrmas. Os cimbramentos servem como apoios temporários para sustentação para as fôrmas das vigas e o posicionamento das nervuras após o transporte.

As lajes nervuradas pré-moldadas de concreto armado podem se subdividir, segundo a geometria e composição da seção transversal, em dois tipos: laje tipo trilho ou volterrana e laje treliçada, esquematicamente representadas nas figuras 10

e 11 abaixo, respectivamente. A laje tipo trilho possui seção transversal tipo T invertido com armadura envolta pelo concreto da vigota pré-fabricada. A laje treliçada tem seção transversal retangular de concreto com armadura em forma de treliça espacial parcialmente envolta pelo concreto da nervura.

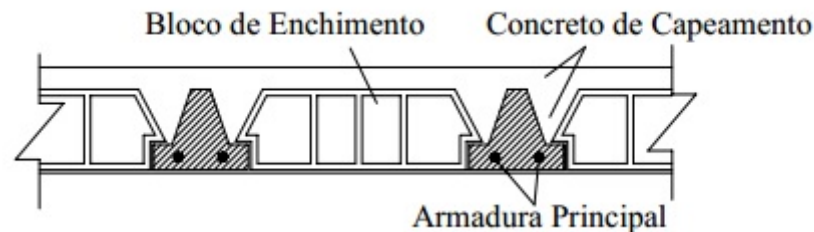


Figura 10 - Laje Nervurada Pré-Moldada Tipo Trilho ou Volterrana. (Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado. São Carlos, 2005. DA SILVA, Marcos Alberto Ferreira)

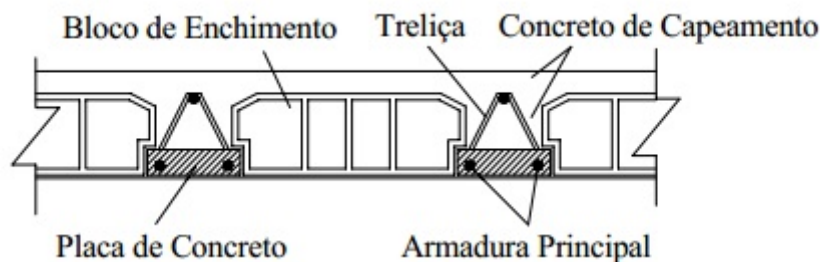


Figura 11 – Laje Nervurada Pré-Moldada Treliçada. (Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado. São Carlos, 2005. DA SILVA, Marcos Alberto Ferreira)

2.4. Procedimento Executivo

2.4.1. Lajes Nervuradas Moldadas in Loco

As etapas a serem desenvolvidas para a execução de pavimentos de lajes nervuradas de concreto armado moldadas no local exigem diversos cuidados e determinada sequência construtiva. O procedimento executivo consiste da aplicação dos escoramentos; montagem das fôrmas; colocação dos materiais de enchimento, caso existam; montagem das instalações prediais embutidas; colocação das armações do projeto estrutural; limpeza das fôrmas antes da concretagem; concretagem; cura; desfôrma e retirada dos escoramentos.

A colocação dos escoramentos de madeira ou metálicos, exige o prévio nivelamento do piso de base. O escoramento é normalmente composto de pontaletes, guias, barrotes, tablado ou tábuas de madeira, onde os primeiros servem

de apoio para as guias, estas para os barrotes e estes para o tablado ou tábuas de madeira.

Quando se utiliza fôrmas de polipropileno, as travessas (tábuas) servem de apoio para elas. Caso haja a utilização de um material de enchimento, este é apoiado sobre um compensado de madeira (tablado). Outra opção bastante comum utilizada é a aplicação de escoramento metálico, normalmente realizado por empresas terceirizadas.



Figura 12 – Escoramento Metálico. (Universidade Feevale, Departamento de Arquitetura)

A etapa posterior de montagem das fôrmas requer uma estrutura auxiliar denominada assoalho, cuja função principal é servir de fôrma para a face inferior das nervuras e apoio para os materiais de enchimento. Vale ressaltar que, nessa ocasião, o assoalho é sustentado pelo cimbramento. Os elementos de enchimento servem de fôrma para a face inferior da mesa e para as faces laterais das nervuras.

Caso opte-se por fôrmas de polipropileno (ver figura 13), elas são colocadas diretamente sobre a estrutura de escoramento, dispensando-se o assoalho. Para melhorar a estética resultante da visualização dos vazios deixados entre nervuras neste último caso, são utilizadas amplamente nas obras, placas de gesso como forro para esconder os espaços vazios. Ainda na situação de não haver material de enchimento, deve ser efetuada a colocação das instalações prediais embutidas.

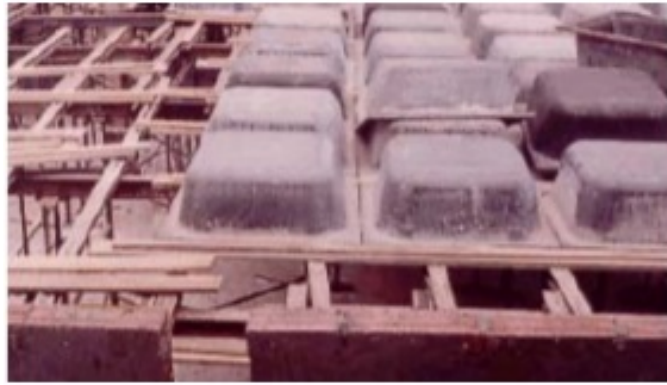


Figura 13 – Montagem de Fôrmas de Polipropileno. (www.atex.com.br)

Na colocação dos elementos de enchimento, é recomendável a utilização de espaçadores de bloco nas interseções entre nervuras longitudinais e transversais, para a garantia das corretas dimensões transversais da laje. Os espaçadores reduzem bastante a movimentação relativa dos materiais entre nervuras durante a concretagem da laje. É também nessa fase que são colocados os componentes elétricos e hidrosanitários.



Figura 14 – Bloco Celular Como Material de Enchimento da Laje. (UFMG, Departamento de Engenharia Civil)

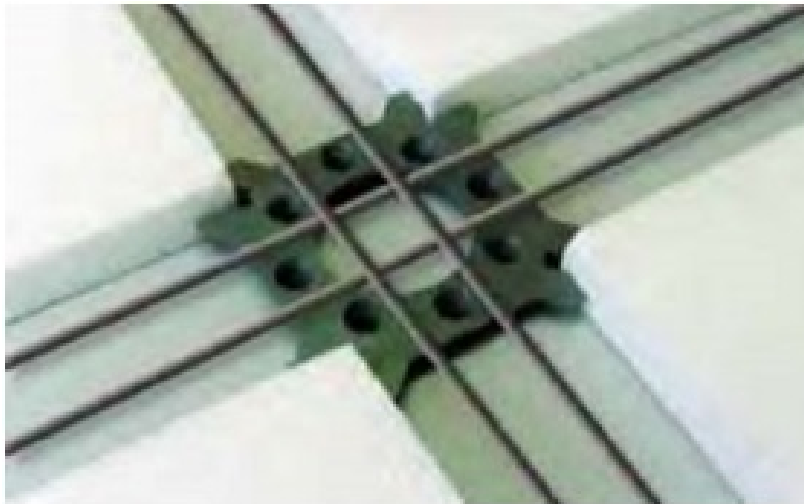


Figura 15 – Espaçador de Blocos Posicionado na Interseção das nervuras. (UFMG, Departamento de Engenharia Civil)

As lajes nervuradas moldadas in loco podem ou não necessitar de armadura transversal. Caso haja estribo previsto em projeto, ele deve ser amarrado à armação longitudinal principal (ver figura 16) e à armação longitudinal secundária (porta-estribos) e montado fora das nervuras para, por fim, ser montado nelas.

Na situação de ausência de armadura transversal, deve-se primeiramente colocar a armadura longitudinal principal das nervuras e em seguida, a armação de distribuição na mesa (ver figura 17). Em diversas ocasiões, é indispensável uma armadura superior negativa na mesa cuja colocação deve ser realizada após o posicionamento da armadura de distribuição.

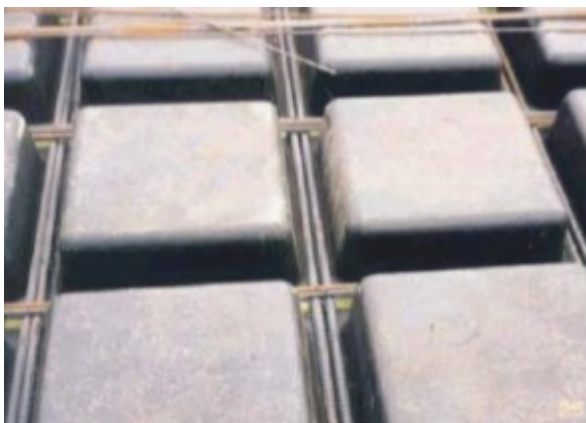


Figura 16 – Armadura Longitudinal das Nervuras. (www.atex.com.br)



Figura 17 – Armadura de Distribuição de uma Mesa. (www.atex.com.br)

Há também a necessidade da implantação de outros espaçadores comumente denominados pastilhas, com a finalidade de se garantir o cobrimento

especificado em projeto para proteção das armaduras da laje. Os espaçadores devem ser amarrados às armações por meio de arames.

Previamente à concretagem da laje, é muito importante que se faça uma limpeza das fôrmas eliminando substâncias como areia, pó, restos de madeira e de ferro para não comprometer as etapas de lançamento e adensamento do concreto. É importante que a concretagem seja realizada de uma única vez para evitar a formação de juntas, mas se for inviável a não formação de juntas, estas devem ter suas localizações especificadas pelo projetista estrutural.

Outros cuidados essenciais na concretagem, consistem na instalação de mestras para direcionar o lançamento do concreto e na utilização de material desmoldante para facilitar a desfôrma e melhorar o acabamento das superfícies laterais das nervuras e da superfície inferior da capa de compressão. É indispensável uma adequada vibração ao concreto utilizando vibradores de imersão. Isto proporciona ao concreto uma maior homogeneidade e evita a segregação das partículas constituintes.



Figura 18 – Concretagem de Laje Nervurada. (www.ufrgs.br)

Por fim, devem ser realizados os procedimentos de cura, que consistem no umedecimento da superfície de concreto várias vezes ao dia na primeira semana pós-lançamento. A inadequação da cura pode ocasionar fissuras por retração no concreto, provenientes de agentes externos como mudanças bruscas de temperatura, chuvas torrenciais, agentes químicos, etc.

As últimas etapas de retirada de fôrmas e escoramentos só devem ser executadas após o endurecimento mínimo satisfatório do concreto, de modo que o mesmo já possa resistir às solicitações sobre a laje apresentando deformações aceitáveis. É recomendável que a retirada dos escoramentos ocorra, no mínimo, após duas semanas a partir da concretagem da laje.

2.4.2. Lajes Nervuradas Pré-moldadas

Antes da execução propriamente dita, é fundamental o entendimento geral da fabricação das vigotas pré-moldadas. As fôrmas para os elementos pré-fabricados devem ser feitas com chapas de aço laminado para facilitar o manuseio, aumentar a durabilidade, possibilitar o reaproveitamento e impedir a formação de juntas. As fôrmas são agrupadas em até 10 unidades e podem chegar ao comprimento de 30 m.

Em seguida, realiza-se a limpeza das fôrmas com espátula e aplicação de substância desmoldante para auxílio na desfôrma. Posteriormente, há o lançamento do concreto nas fôrmas e colocação das armaduras antes ou após concretagem parcial e, sucedendo as etapas supracitadas seguem-se os procedimentos adequados de vibração, cura e desfôrma.

Por fim, há a necessidade de uma correta estocagem, no interior da obra ou da própria empresa, das vigas pré-fabricadas com o intuito de evitar danos às peças. A estocagem pode ser efetuada manualmente ou com o auxílio de pontes rolantes dependendo das dimensões das vigotas e da produtividade associada à empresa. O transporte das peças até suas posições definitivas deve ser feito por veículos com dimensões apropriadas e capacidade de suportar o peso das vigas.

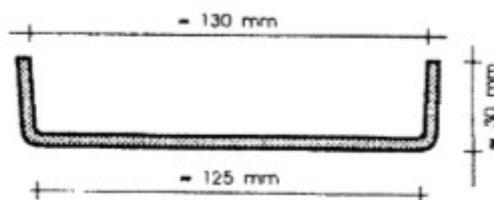


Figura 19 – Exemplo de Fôrma para Laje Pré-moldada Tipo Treliça. (Lajes Nervuradas de Concreto armado: Projeto e Execução. BOCCHI JR, 2005.)

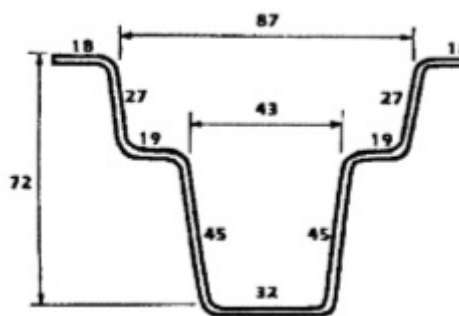


Figura 20 – Exemplo de Fôrma para Laje Pré-moldada Tipo Trilho. (Lajes Nervuradas de Concreto armado: Projeto e Execução. BOCCHI JR, 2005.)

O escoramento deve ser posto de maneira a reduzir os vãos das vigas para que estas suportem as solicitações decorrentes de montagem e concretagem. A colocação das vigas e lajotas entre as primeiras deve proceder cuidados necessários à manutenção das dimensões transversais de projeto. Em sequência, ocorre a colocação da armação de distribuição superior e eventual armação superior negativa (caso exista) procedendo a concretagem da mesa de compressão.

2.5. Aplicações

O emprego das lajes nervuradas de concreto armado é adotado quando se deseja vencer grandes vãos e/ou maiores sobrecargas. O alívio de peso próprio decorrente da ausência de concreto entre as nervuras possibilita um melhor desempenho estrutural para esse sistema. Portanto, esse sistema estrutural é largamente empregado nos mais diversos tipos de edificações, sejam elas comerciais, residenciais, hotéis, ginásios poliesportivos, etc.

O sistema nervurado também pode ser aplicado em pisos de lajes sem vigas, possibilitando assim vantagens relativas à redução da altura interna de um pavimento. Assim, o apoio das lajes é dado diretamente no pilar e é por essa razão que nas regiões em torno dos pilares devem ser executados trechos maciços.

As pequenas lajes maciças nas imediações dos pilares absorvem mais eficientemente os momentos negativos gerados nessas regiões, além de resistir melhor ao puncionamento (tendência de perfuração do pilar na laje).



Figura 21 – Emprego de Laje Nervurada de Concreto Armado. (www.atex.com.br)



Figura 22 – Emprego de Laje Nervurada de Concreto Armado. (www.arcoweb.com.br)



Figura 23 – Emprego da Laje Nervurada de Concreto Armado no Ginásio Poliesportivo da PUC/RS. (www.arcoweb.com.br)

3. LAJES MACIÇAS PROTENDIDAS

Protender uma estrutura de concreto é fazer o uso de uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura. Inteligente, pois permite que se aproveite ao máximo a resistência mecânica dos seus principais materiais constituintes, o concreto e o aço, reduzindo assim suas quantidades; eficaz, devido à sua propriedade técnica sobre soluções convencionais, proporcionando estruturas seguras e confiáveis; duradoura, porque possibilita longa vida útil aos seus elementos. (RUDLOFF, 2011)

A protensão pode ser entendida como a aplicação de tensões em um elemento estrutural com o objetivo de equilibrar tensões que prejudiquem o uso desejado. (EMERICK, 2007)

3.1. Conceito

As lajes são estruturas dimensionadas para suportar a ação de cargas perpendiculares. O principal desafio é combater os momentos gerados pelas cargas ao longo da sua estrutura, seja ela pontual ou distribuída, e guiar essa ação para que ela chegue ao solo através das fundações.

A protensão de lajes constitui na inclusão de uma força contrária as cargas cuja laje está designada a suportar, de modo a criar um esforço para combater o momento gerado pelas cargas aplicadas na superfície, bem como o peso próprio da laje, constituindo. Desta forma, um esquema prático de compensação de esforços, onde devido aos esforços advindos da protensão, a estrutura passe a suportar maiores carregamentos aplicados ao centro do vão (pior caso para estruturas biapoiadas), o que em primeira instância, resulta em um ganho de área livre entre os apoios das lajes. Essas forças de protensão são transmitidas por armaduras tensionadas, destinadas a impedir ou limitar a fissuração do concreto, pois limitam a presença da tração no mesmo.

A ideia pode ser demonstrada na figura a seguir, de modo simplificado, onde consta a disposição do cabo (cordoalha), no segmento pilar-laje-pilar, bem como a representação da carga solicitante (Q) e da tensão (T) aplicada pelos cabos em sentido contrário ao da carga.

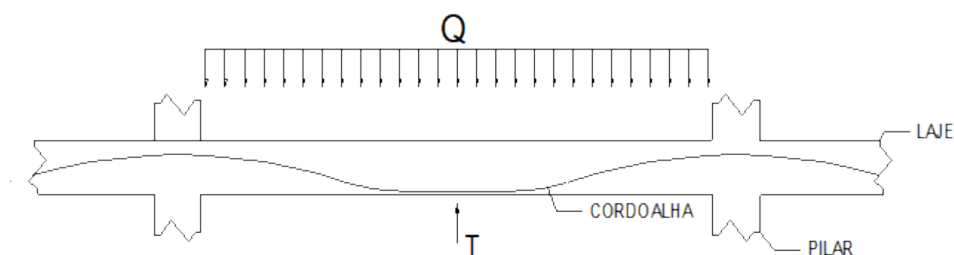


Figura 24 – Esquema Representativo da Ação das Cargas.

A laje protendida possui deformações inferiores em relação aos outros modelos, visto que a sua armadura ativa (protensão) impede a sua deformação devido ao peso próprio da estrutura.

A aplicação da protensão na laje, além do esforço interno proporcionado pela disposição geométrica que a armação possui, proporciona esforços nas extremidades (bordas) onde as armações são ancoradas, causando uma forma de compressão na lâmina da laje, fornecendo desta forma, estabilidade para a peça. A estabilidade obtida permite que a laje não fique a mercê de se apoiar em vigas em nenhuma das suas posições, eliminando potencialmente o procedimento de execução destas, exceto quando que por motivos excepcionais se faça a utilização de alguma(s) viga(s) para satisfazer uma necessidade específica.

Além das vantagens de projeto e construtivas encontrada no modelo, há os ganhos arquitetônicos advindos da sua sútil área de ocupação, aproveitamento da área útil dado por ambientes amplos e livres de pilares, e a ausência das vigas “penduradas” na estrutura propiciando a diminuição da distância entre pavimentos, resultando numa perda considerável da altura final da edificação. Sem as vigas, os pilares perdem a necessidade de estarem alinhados e também de ficar totalmente na parte externa da estrutura, facilitando desta forma o aproveitamento dos vãos por parte dos usuários finais da edificação.

Apesar de todos os benefícios que as lajes lisas protendidas proporcionam as edificações em geral, a sua aplicação não é equilibrada em relação às demais lajes, visto que por ser uma forma construtiva que exige um dimensionamento diferenciado as empresas acabam por preferir a utilização do “comum”, onde já há a credibilidade de serviços anteriores, o que limita muitas edificações quanto à disposição arquitetônica, longos prazos e custo de execução.

3.2. Histórico

Iniciada na década de 50, com desenvolvimento nos Estados Unidos e na Austrália, a utilização dos primeiros modelos de laje lisa protendida foram elaborados em associação com o processo denominado “Lift Slab”, processo no qual as peças de lajes eram moldadas independentes na parte inferior das estruturas e posteriormente erguidas até a altura final necessária, uma á uma, com o auxílio de macacos hidráulico, onde posteriormente eram realizadas as “amarrações” das lajes nos pilares, pilares estes que deveriam possuir suas estruturas já elevadas na altura final.

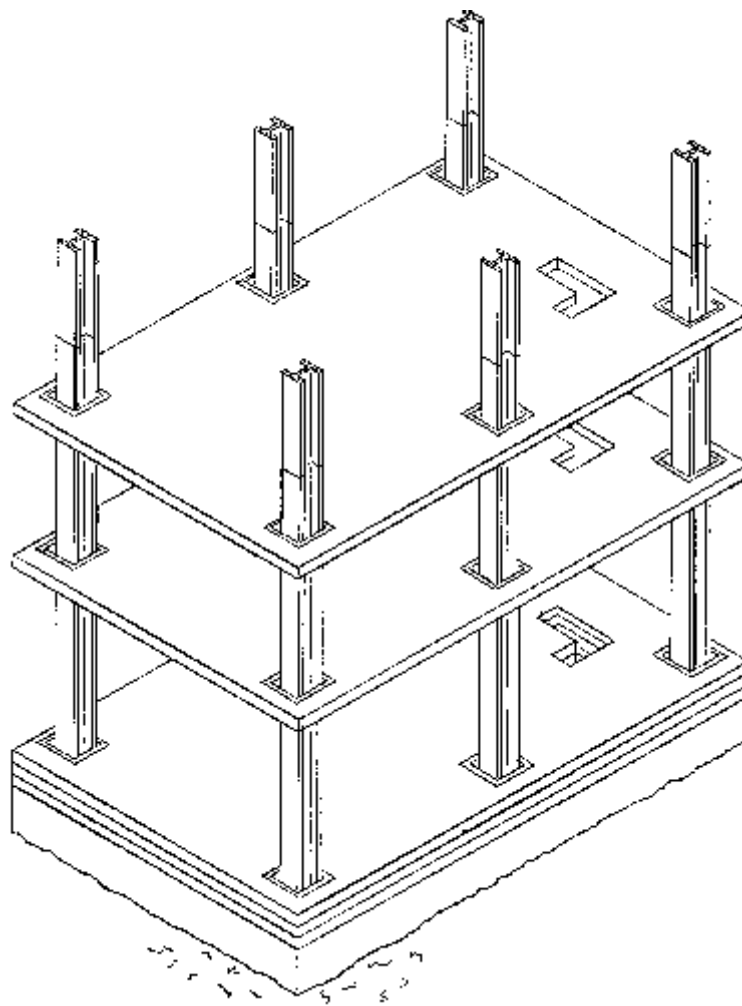


Figura 25 – Lift Slab. (www.dictionaryofconstruction.com)

Os primeiros processos utilizavam apenas a pré-tensão, onde as armações ativas eram tracionadas antes da execução da concretagem da estrutura, e posterior à cura as suas ancoragens eram desprezadas, visto que a própria protensão já era aderente ao concreto.

Foi na década de 60 que as lajes protendidas tomaram uma maior proporção, quando houve a normatização da utilização do modelo para edificações nos Estados Unidos. Outro momento em que houve mais aumento na utilização do modelo foi a partir do momento em que implementaram a utilização da protensão não aderente, com o uso de bainhas e cordoalhas, permitindo a execução da protensão da armação ativa posteriormente a concretagem, pós tensão. No Brasil, o uso da protensão sem aderência em escala comercial ocorreu a partir de 1997, com o início da produção de cordoalhas engraxadas pela indústria Belgo-Mineira.

A partir de 2003 houve uma retificação e se passou a haver uma maior e melhor abordagem da utilização da protensão não aderente na NBR 6118. A utilização, entretanto, no Brasil, apesar de estar sendo realizada ainda continua limitada, diante dos diversos questionamentos que são frequentemente apresentados pelos usuários do modelo, tornando esta prática escassa na maioria dos estados.

3.3. Aplicações

As lajes protendidas são utilizadas de modo a transpor obstáculos construtivos e arquitetônicos da forma mais natural possível, agregando resistência e durabilidade nas estruturas em que as contemplam, são soluções tecnicamente viáveis, quando utilizadas de forma inteligente. Podendo ser utilizadas em diversas aplicações, elas se restringem em variedade com o seu tipo, seja a protensão aderente ou não à estrutura, a solução não aderente, por exemplo, não é recomendada à utilização em estruturas que possam vir a ser exposta a algum tipo de agente corrosivo ou até mesmo a água do mar, o que na verdade não a limita de ser explorada e aplicada de forma segura e eficaz nas demais estruturas, quando que na execução apresenta maior número de pontos “críticos” (riscos), razão pela qual tanto o projeto como a execução exigem as providências adequadas.

Outra distribuição verificada neste modelo de lajes está relacionada com a necessidade e posicionamento dos cabos de protensão, que podem vir a ser dispostos de diversas maneiras, variando de acordo com a necessidade de cada estrutura, podendo ela ser dotada de malhas longitudinais e transversais uniformemente distribuídas, dispostas em faixas de feixes de cabos espalhadas ou até mesmo um sistema mesclado de faixas e malhas de protensão.

Para utilização do modelo em estruturas de vãos medianamente longos, temos uma tabela que apresenta a espessura mínima para as faixas de vãos, baseada em resultados de estudos e dimensionamentos realizados ao longo dos anos.

VÃO LIVRE ENTRE APOIOS (metros)	ESPESSURA MÍNIMA (cm)
até 7,0	16
de 7,0 até 8,0	18
de 8,0 até 9,0	20
de 9,0 até 10	22
de 10,0 até 11,0	24

Tabela 1 – Relação Entre Vãos e Espessuras das Lajes Protendidas. (Projeto e Execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)

Um fator bastante preocupante na utilização deste modelo é direcionado para a correta aplicação dos itens de instalações, visto que a possibilidade de posterior execução de aberturas e demolições nestas lajes são mais arriscadas, pois uma alteração em quaisquer dos fios que compunham a cordoalha, o valor da tensão a ser transferida para a mesma na protensão não vai ser condizente.

O problema não está na quebra do segmento e sim a impossibilidade de verificação da avaria causada à peça, visto que nos dias atuais cálculos permitem a utilização de cordoalhas em paralelo com as cordoalhas defeituosas, fixadas traspassando as extremidades.

3.4. Materiais Construtivos

O modelo não se restringe apenas à utilização de itens básicos também utilizados nos sistemas convencionais, pois faz o uso inteligente dos modelos modernos de aços que possuem tensões de escoamento elevadas, a partir de 1500 MPa.

3.4.1. Fôrma

O sistema de fôrmas, que segundo a NBR 14931, compreende as fôrmas, o escoramento, o cimbramento e os andaimes, é o sistema responsável por permitir a execução da laje, pois sem a sua utilização não haveria possibilidade de realização

da contenção e delimitação do concreto, bem como o assoalho destinado a facilitar a movimentação de materiais que compõem a estrutura em si.

Para suportar a carga da fôrma e permitir a execução da laje faz-se necessário o uso de uma estrutura de escoramento dotada com cimbramentos dispostos de modo a sustentar de forma igualitária a estrutura. Estes cimbramentos e escoramentos devem ser dimensionados de modo a garantir o suporte dos componentes que formarão a estrutura, assim como as sobrecargas obtidas na sua execução, advinda dos operários responsáveis pela montagem da laje.



Figura 26 – Conjunto de Cimbramento e Escoramento Metálico. (www.rpaltda.com.br)

As fôrmas são dispostas em painéis, de madeira, metálico ou misto, e são os elementos que permitem a sustentação e imobilidade do concreto em suas posições. Os painéis devem ser conservados durante a utilização, pois é sobre o mesmo que ocorre o carregamento inicial referente às armações e equipes de montagem.



Figura 27 – Conjunto de Fôrma e Escoramento Metálico. (SH FÔRMAS)

O sistema de fôrmas para lajes e seu escoramento são fundamentais para garantirem o seu cronograma, visto que a utilização de padrões para a sua montagem minimiza os períodos gastos entre os processos de fôrma e desfôrma.

No tempo atual, produtos químicos desmoldantes aplicados às faces das fôrmas que irão conter o concreto permitem um isolamento destas superfícies de contato e proporcionam facilidade na execução da desfôrma, aumentando, por conseguinte o número de utilizações das peças.

3.4.2. Armação

As armaduras são elementos que devem vir detalhados no projeto estrutural, suas cotas horizontais e verticais, de forma que possa ser corretamente locada e fixada, para quando posterior à aplicação seja garantido o seu posicionamento, inclusive na concretagem.

3.4.2.1. Armação passiva

“Qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada.” (NBR 6118, 2014)

A armação passiva é a armação responsável pela, subdividida em positiva quando combate a flexão e negativa quando combate o cortante, e é constituída por barras de aço CA50 e CA60, disposta em bitolas variando de 5,0mm(CA60) à 32,0mm(CA50) e comprimentos conforme especificado em projeto. A tabela 2 evidência a dimensão das barras com o seus respectivos pesos.

DIMENSÕES		PESO APROXIMADO
(pol.)	(mm)	(kg/m)
1/4"	6,3	0,25
5/16"	8	0,4
3/8"	10	0,62
1/2"	12,5	0,99
5/8"	16	1,55
3/4"	20	2,47
1"	25	3,95
1.1/4"	32	6,31

Tabela 2 – Detalhamento das Barras de Aço GG50. (www.belgo.com.br)

As armações passivas positivas neste modelo situam-se no trecho inferior da laje, dispostas por todos os trechos que compõem a estrutura, São utilizadas telas painel eletro soldadas para esta armação, com barras ou fios já fixados longitudinalmente e transversalmente, espaçadas entre si com medidas semelhantes, visto que a sua execução se torna extremamente facilitada, dados os tamanhos em que as telas são comercializadas, 2,45 x 6,0 m, bem como a variedade de diâmetros e espaçamento das barras, minimizando o período de execução dos grandes patamares de lajes. As telas nervuradas soldadas além de melhorar a aderência entre o aço e o concreto, proporcionam controle sobre a fissuração do concreto.

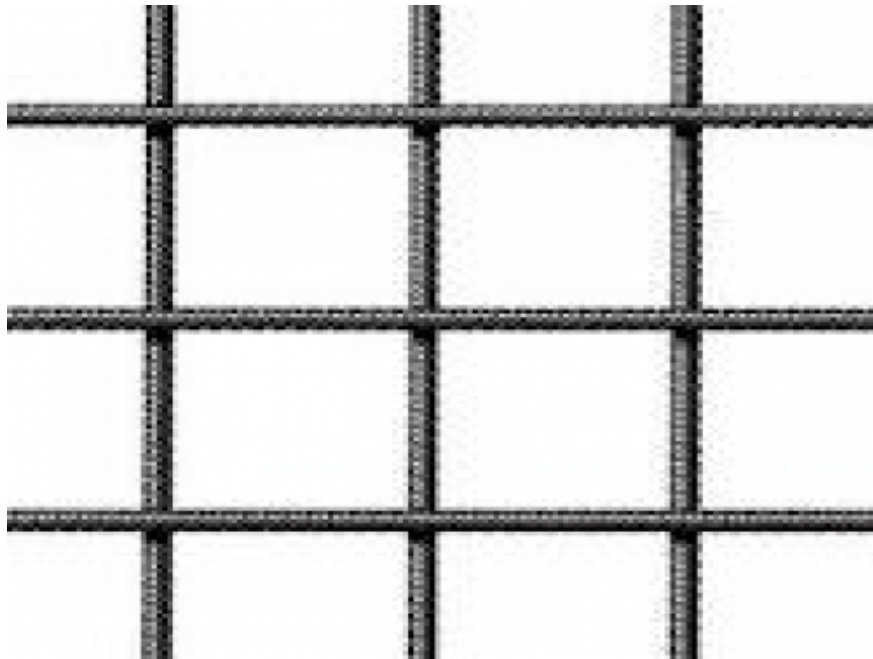


Figura 28 – Modelo de Tela Eletrosoldada. (www.belgo.com.br)

As armações passivas negativas, assim como as ativas, são compostas por barras de aço GG50, entretanto não são dispostas na forma de malha e sim distribuídas. Situam-se na camada de cima, próximo a face superior da laje, e compõem a armação que tem por finalidade combater os esforços cortantes e de punção a que as lajes estão sujeitas. São localizados no eixo de atuação dos pilares na laje, com barras dispostas longitudinalmente e transversalmente, que possuem comprimentos e diâmetros variados, de acordo com as solicitações verificadas em projeto, bem como a determinação dos seus espaçamentos.



Figura 29 – Barras de Aço GG50. (www.belgo.com.br)

3.4.2.2. Armação ativa

“Armadura constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial.” (NBR 6118, 2014)

A armação ativa é disposta em um conjunto de cabos de elevadas tensões, denominada segundo NBR 7483 (2004), de cordoalha constituída de fios de mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, numa forma helicoidal, com um passo uniforme, vendidos em rolos, dispostos em comprimentos muito superiores as armações passivas, que vencem todo o comprimento da estrutura e ainda assim ficam sobressalientes à mesma, de modo a permitir posterior acesso para acoplamento de equipamento para protensão. Essa armação pode ser aderente ou não a estrutura, o que a diferencia é que quando no caso de não aderente, possui um envoltório de graxa protegido com uma camada de um material plástico, polietileno de alta densidade (PEAD), nomeada desta forma por cordoalha engraxada.



Figura 30 – Cordoalha Engraxada Modelo CP 190 RB. (www.impactoprotensao.com.br)

3.4.3. Ancoragem

As ancoragens são dispositivos rígidos localizados nas extremidades dos cabos, destinados a manter as cordoalhas sob tensão, transmitindo desta forma a força de protensão ao concreto. São itens utilizados tanto nos modelos aderentes quanto não aderentes. Assim como as armações, são subdivididas em ativas e passivas, ativas quando permitem a operação de protender os cabos e passivas quando são fixas. No geral, as armações são designadas a possuir uma ancoragem de cada tipo, entretanto, quando o comprimento dos cabos ultrapassa os 40 metros, convém-se aplicar a protensão nas duas extremidades do cabo, utilizando duas ancoragens ativas, ou até mesmo a inclusão de mais ancoragens, quando o processo de execução e concretagem venham a ser executados em parcelas.

Na ancoragem concentra-se toda a responsabilidade por manter a força de protensão. Uma falha nesta peça significa desativação instantânea do cabo e perda total de sua colaboração.

Os blocos de ancoragem são exatamente os mesmos para as ancoragens ativas e passivas, o que as diferencia são as etapas e ordem de execução.

- Ativa

“Ancoragem na qual se promove o estado de tensão no cabo, através de equipamento de protensão.” (NBR 14931, 2004)

As ancoragens ativas são fixadas nas fôrmas e tensionadas por utilização de um macaco hidráulico. A mesma é realizada após em um período de tempo suficiente para que o concreto possa a resistência mínima necessária, especificada em projeto pelo calculista.

- Passiva

“Dispositivo embutido no concreto, destinado a fixar a extremidade do cabo oposta àquela da ancoragem ativa. Embora de configuração análoga àquela da ancoragem ativa, pode ou não permitir acesso para operação de protensão e possibilita verificação do grau de protensão e a eventual ocorrência de deslizamentos.” (NBR 14931, 2004)

As ancoragens passivas são fixadas às extremidades dos cabos do mesmo modo que as ativas, o que as diferenciam é o fato de que as passivas são postas quando os cabos não estão sob nenhum tipo de tensão.

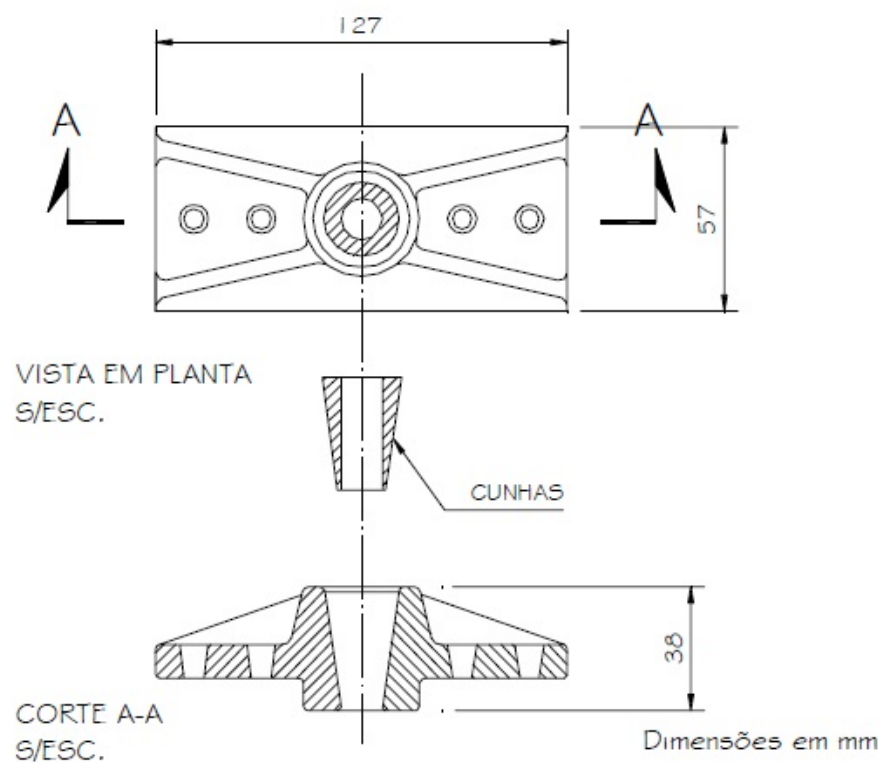


Figura 31 – Ancoragem de Cordoalhas. (Projeto e execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)

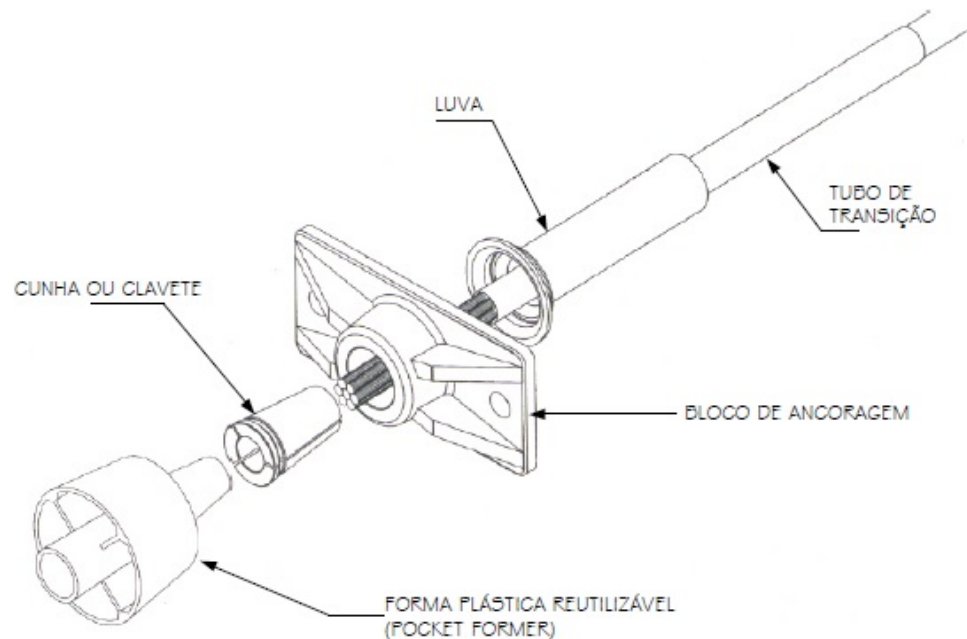


Figura 32 – Detalhamento Prático de Ancoragem. (Projeto e execução de Lajes Protendidas, 2005. EMERICK, Alexandre A.)

3.5. Tipos de Lajes Planas Protendidas

A depender da necessidade e funcionalidade do projeto, a laje pode ser disposta de maneira a atenuar a funcionalidade da protensão, bem como majorar o combate aos esforços de punção causados pela ação dos pilares às lajes. Desta forma, são separadas em tipos distintos de acordo com as suas singularidades apresentadas, sem abrir mão das características principais do modelo geral.

3.5.1. Plana lisa

A maciça simplesmente lisa é o tipo mais “simplificado” do modelo, pelo fato de que a mesma não faz a utilização de nenhum tipo de vigas, tanto centrais quanto de bordas, constituindo-se como uma estrutura com toda a sua espessura uniforme, definidas de acordo com a necessidade de cada projeto.

Ela contempla um esquema de armações que trabalham em conjunto, permitindo a estabilidade da estrutura.

Há a disposição transversal e longitudinal dos cabos de protensão, formando uma “malha” uniformemente distribuída, bem como feixes de cabos extras situados nas faixas dos pilares. A distribuição das armações ativas é elaborada de modo a manter o espaçamento uniforme entre os elementos, transversalmente e longitudinalmente, trabalhando desta forma como uma espécie de malha distribuída em toda a superfície da laje.

As ancoragens são localizadas nos bordos extremos das lajes, podendo haver ancoragens extras intermediárias, a depender da área total da laje e do procedimento de execução adotado.

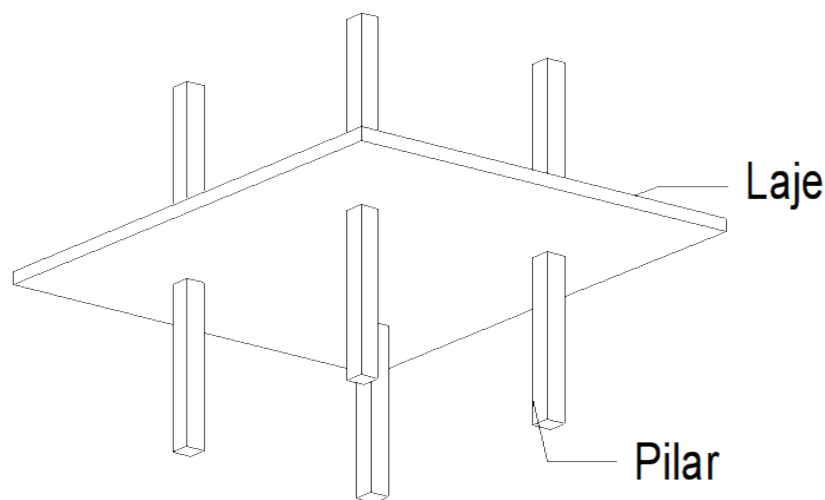


Figura 33 – Laje Plana Lisa.

3.5.2. Plana com capitel

O aumento das áreas entre vãos de pilares, aliado a não utilização de vigas para distribuição das cargas das lajes, resultam numa ação mais intensa de punção dos pilares na laje, necessitando desta forma a inclusão de reforços nas áreas de contato.

Um reforço eficaz para suportar esta ação é adicionado neste tipo de laje na forma de capitel, uma estrutura mais robusta e mais armada, capaz de suprir a necessidade de estabilidade da estrutura.

Este capitel por ser mais armado, necessita de mais espaço para a sua estrutura, vindo a ter, portanto sua espessura mais elevada do que a laje propriamente dita, esta diferença é projetada para a superfície inferior da laje, no encontro desta com o pilar.

Com exceção das armações adicionais impostas nos capitéis, as demais armações são dispostas na mesma configuração das lajes planas simplesmente lisas.

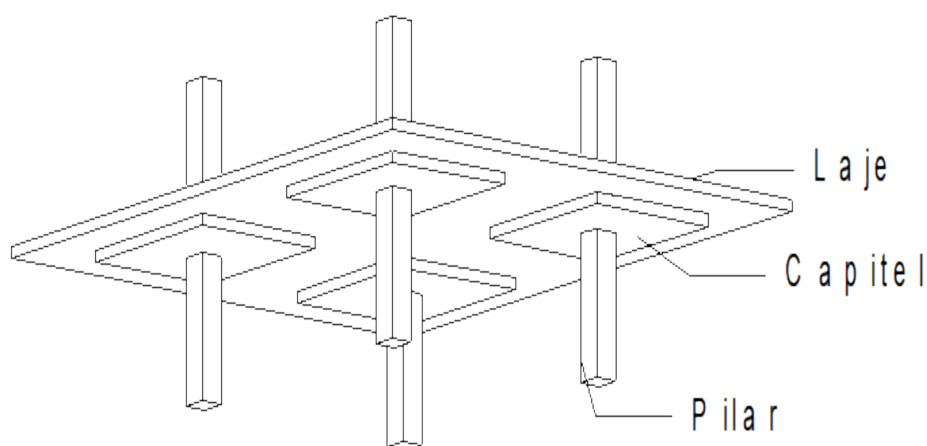


Figura 34 – Laje Plana com Capitel.

3.5.3. Plana com vigas

A laje maciça com vigas, utiliza um implemento na sua estruturação, este implemento é nomeado como viga faixa, visto que são vigas com larguras muito maiores que a altura, assemelhando-se a uma faixa horizontal na laje. Possuem espessuras superiores às lajes pois o esqueleto da armação passiva é dimensionado a suportar maiores esforços na faixa em que são posicionados, são armadas com armações passivas externamente dotadas de ativas no seu interior.

Com exceção das armações adicionais impostas nas vigas faixas, as demais armações são dispostas na mesma configuração das lajes planas simplesmente lisas.

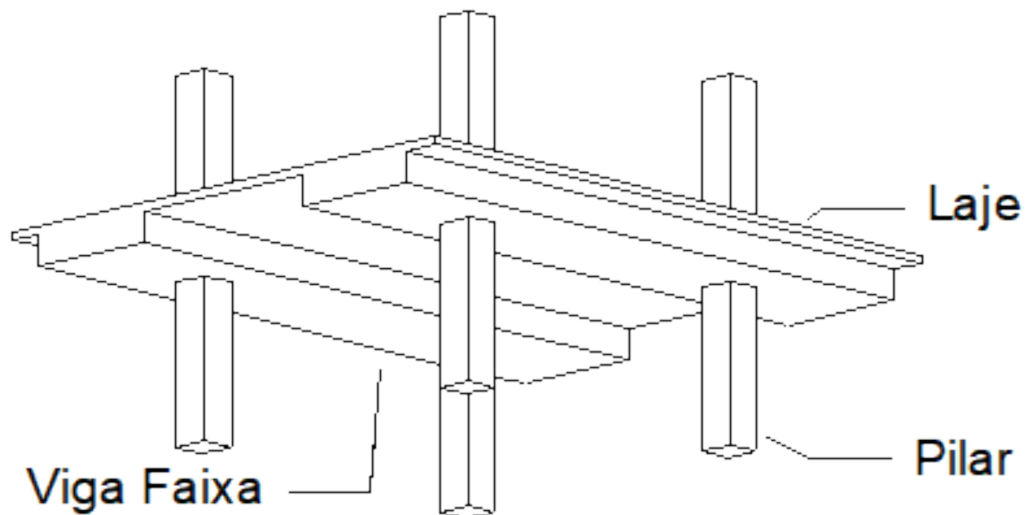


Figura 35 – Laje Plana com Viga.

3.6. Procedimento Executivo

O processo de execução desta laje inicia-se com a montagem das fôrmas, onde serão locadas as escoras e lançados os cimbramentos que darão suporte a fôrma propriamente dita. Nesta etapa deve-se atentar para verificação das distribuições e posições de cada peça, bem como uma pré-determinação do nível em que as mesmas irão trabalhar. Faz-se então o lançamento das fôrmas das lajes sobre o assoalho executado, extremamente simplificada neste modelo por não possuir vigas, alinhando e fixando as mesmas de modo a garantir imobilidade às peças. Após fôrma da base definida, executa-se a fôrma de borda, definindo a geometria lateral da estrutura, bem como o posicionamento das saídas dos cabos de protensão.



Figura 36 – Assoalho de Chapa Compensado Plastificado.

Após finalização das fôrmas inicia a colocação das armações, onde as passivas positivas, painéis de barras de aço malhadas e eletrosoldadas, serão inicialmente distribuídas e aplicadas por toda a estrutura da laje, bem como aplicados os espaçadores de concreto que irão garantir o cobrimento inferior da armação. Os traspases dos painéis devem ser respeitados e a amarração destes se faz necessária, imobilizando desta forma a armação como um todo.

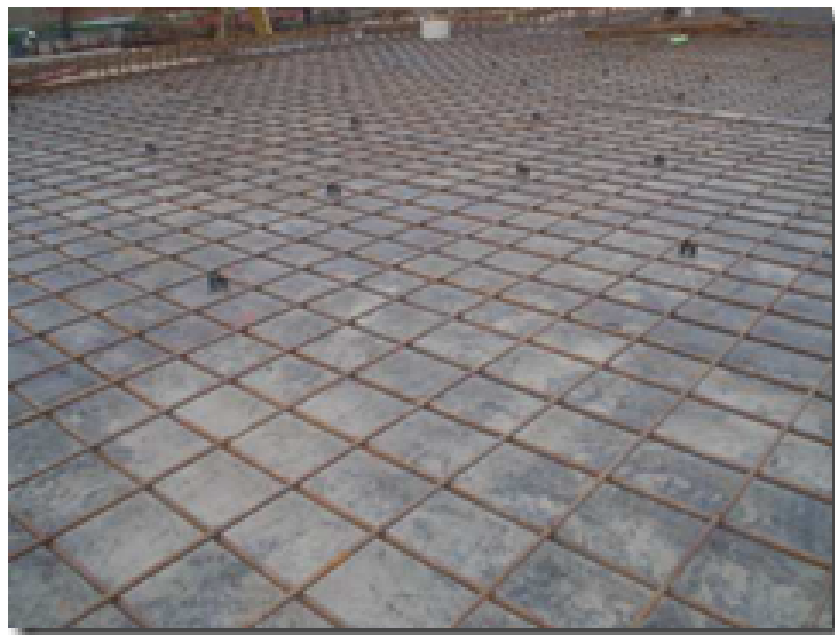


Figura 37 – Armação Passiva Positiva de Tela (painel) Soldada.

Em seguida as ativas são dispostas sobre elas, dispostas uniformemente nos vãos e em feixes do tipo faixas nas linhas que interligam os pilares e/ou bordas. Pelo menos um, mas de preferência três cabos devem passar pelo interior da armadura longitudinal dos pilares, visto que segundo estudos, os cabos situados nas faixas dos pilares têm maior influência na capacidade de carga da laje do que os demais.

Na execução desta etapa as cotas horizontais e verticais, bem como a correta amarração, são pontos chave para a obtenção. O arranjo dos cabos em planta pode ser feito de diversas maneiras, a depender da distribuição dos vãos e pilares, obedecendo a quantidade máxima de 4 cabos por feixe de cabos e espaçamento mínimo entre os feixes de 15cm para feixes de 2 cabos, 20cm para feixes de 3 cabos e 25cm para feixes de 4 cabos. O traçado vertical dos cabos é em geral parabólico, sendo convexo aos centros das lajes e côncavos aos eixos dos pilares. Segundo a NBR 6118 - 2014, o espaçamento máximo dos cabos ou de agrupamentos de cabos deve ser de até 6 vezes a altura da laje, não podendo exceder o valor de 120cm. Após as armações ativas há um novo processo de lançamento de armações passivas, sendo agora as passivas negativas, que são situadas em sua maioria sobre a área de influência dos pilares sob a laje.



Figura 38 – Aplicação da Armação Ativa. (www.gaussprotensão.com.br)

Concluída as etapas de execução de fôrma e armação é dado início do lançamento do concreto, onde o principal fator a se observar é a distribuição uniforme do concreto por toda a superfície e controle da utilização do vibrador de imersão para não causar a segregação do concreto.

Após a concretagem deve ser aguardado o período suficiente para que a resistência mínima necessária seja atingida para que seja realizada a protensão dos cabos, com a utilização do equipamento destinado e funcionário especializado para tal, visto que os cabos irão ser tensionados a elevadas cargas e a confiabilidade da sua execução deve ser analisada no procedimento. Posterior ao tensionamento dos cabos das lajes, devem ser executados os cortes das sobre saliências dos cabos, com equipamentos adequados para prevenir alterações nas propriedades dos cabos, bem como realizado um tratamento para preenchimento dos nichos, isolando completamente armação e ancoragem do meio, com uma proteção especial contra a corrosão para que conservem nas ancoragens as suas características iniciais, visto que a força de protensão será transferida ao concreto somente através destas.

Todas as etapas de execução citadas para o modelo são descritas em procedimentos operacionais e devem ser atentamente executadas na sequência em que forem designadas. Além dos procedimentos, todas as execuções são dotadas de projetos específicos elaborados por profissionais habilitados. Os posicionamentos e observações descritos nos projetos devem ser fielmente acompanhados e conferidos durante a execução, garantindo desta forma que aquilo que foi projetado para ser executado irá garantir a segurança da estrutura e daqueles que estão envolvidos na sua execução e posterior utilização.

A seguir, na figura 39, é apresentado um pequeno roteiro com uma sequência de execução para uma melhor interpretação.

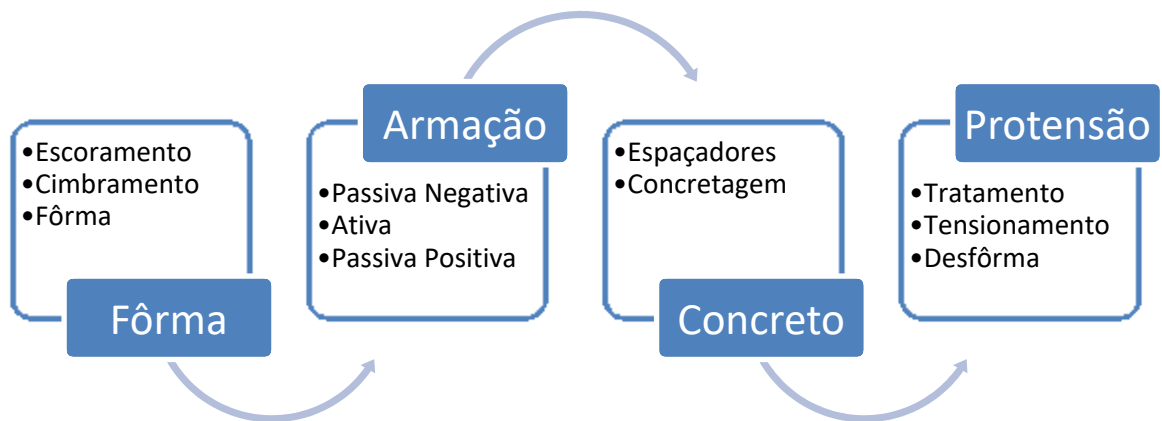


Figura 39 – Roteiro de Execução da Laje Protendida.

4. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo se deu a partir da análise presencial dos modelos escolhidos para estudo, utilizando os dados reais e atualizados, considerando para efeito de modulação dos critérios, valores de construção em si, sem levar em consideração os valores que foram na realidade utilizados, para tanto, foram acompanhadas duas obras em execução nos respectivos modelos de laje, bem como analisados as suas composições em geral, de forma a obter parâmetros de consumos e produtividades unitárias.

Os custos a serem apresentados são livres de desoneração, pois foi optado pelos autores a utilização destes, logo os valores que serão apresentados neste trabalho não incluem nenhum tipo de impostos e encargos sociais em suas composições.

As composições e custos em geral dos dois modelos de estudo, serão elaboradas individualmente para cada um destes, de acordo com os períodos de realização de um ciclo de cada laje propriamente dita, sem levar em consideração às concepções dos pilares, que são realizadas à parte.

4.1. Estudo de Caso A – Laje Nervurada de Concreto Armado

O estudo de caso A consiste em um modelo real de aplicação de laje nervurada de concreto armado de um edifício residencial em Boa Viagem, Recife-PE. O edifício é constituído de 29 pavimentos, sendo 23 deles pavimentos-tipo, 3 pavimentos vazados, 1 pavimento para área de lazer, 1 pavimento para área de coberta e outro para casa de máquinas.

O projeto consta de lajes nervradas de concreto armado, moldadas no próprio local da obra, em todos os pavimentos-tipo, nos pavimentos vazados e na área de lazer. Para fins deste trabalho, será considerada somente a análise do pavimento tipo do edifício, ilustrado na figura 40.

É importante salientar que houve acesso irrestrito dos autores ao projeto estrutural e à obra em andamento, porém a divulgação dos nomes dos responsáveis

pelo projeto e pela execução não será possível. Serão atendidos os pedidos de privacidade tanto da empresa responsável pelo projeto como da construtora da referida edificação.

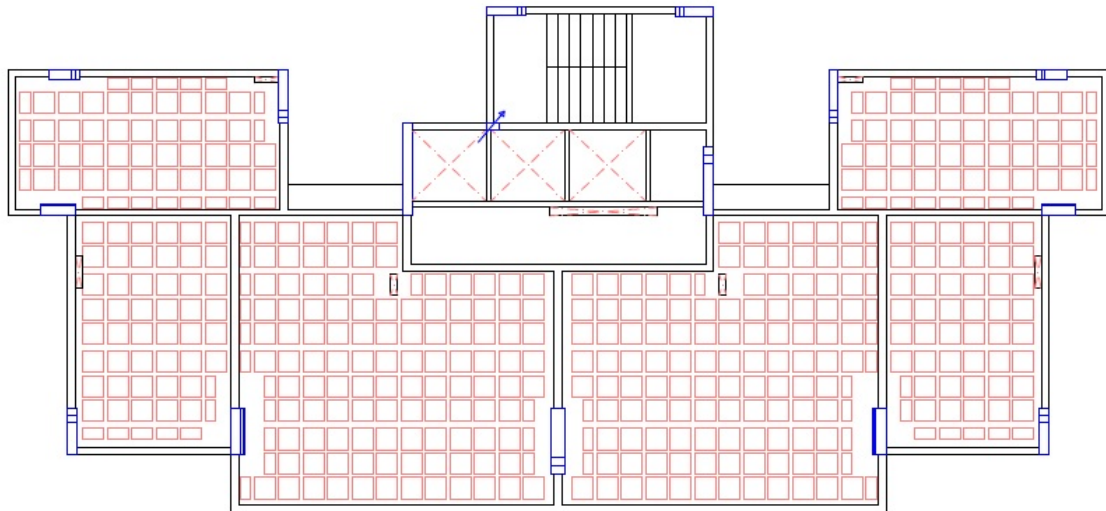


Figura 40 – Estudo de Caso A: Modelo Fôrma Laje Nervurada do Pavimento Tipo.

A estrutura é composta, na sua maioria, por lajes nervuradas de concreto armado moldadas in loco com capitéis nas regiões dos pilares. Apenas nas regiões dos elevadores, dos halls e da escada foram empregadas lajes maciças. A análise desse modelo levará em consideração somente as lajes nervuradas do pavimento tipo. As fôrmas são reutilizáveis de polipropileno, de dimensões 52cm x 52cm x 18cm; não foi empregado material de enchimento. As nervuras têm espessura de 8 cm e as nervuras das faixas de reescoramento tem largura de 17 cm, a espessura da mesa é de 6 cm e a altura total da laje é de 24 cm, como mostram as figuras 41 e 42 abaixo.

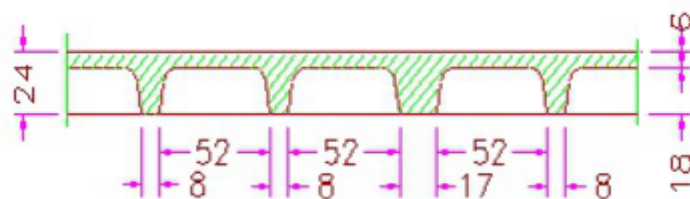


Figura 41 – Seção Transversal da Laje.

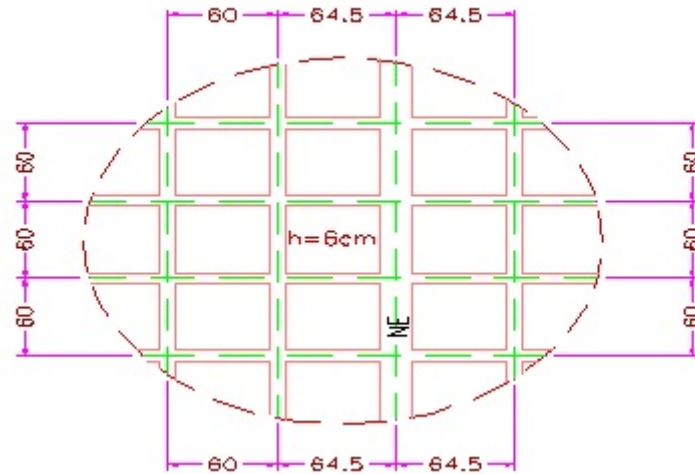


Figura 42 – Planta das Nervuras.

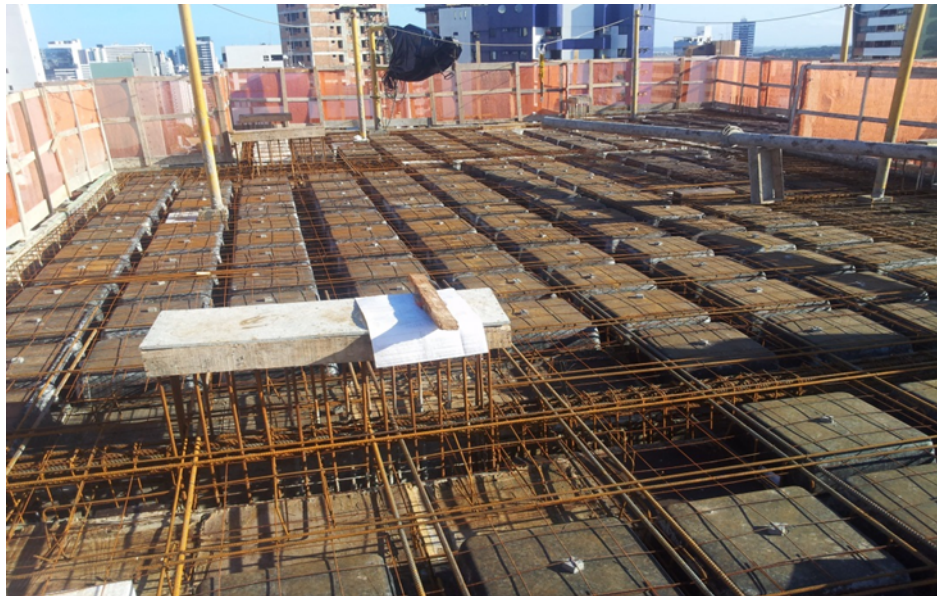


Figura 43 – Vista Geral do Pavimento de Laje Nervurada Pré Concretagem.

4.1.1. Análise do consumo dos materiais para laje nervurada

Os itens fundamentais da execução da laje nervurada de concreto armado em si serão apresentados na forma de tabelas, acompanhados dos seus respectivos quantitativos. Foram ignorados os itens em que a sua ordem de grandeza indeferem no consumo a depender do seu modelo, como espaçadores de concreto, pregos, desmoldantes, etc.

As fôrmas, que como previsto nos capítulos anteriores contemplam os escoramentos e as fôrmas. Os escoramentos foram quantificados a partir de dados de fornecedores dos equipamentos, que indicaram que a distribuição média das escoras pode ser obtida a partir do valor final do peso de concreto a ser escorado. Já as fôrmas foram quantificadas de acordo com a área da superfície de contato das peças de madeira destinadas a conter o concreto. A tabela 3 apresenta este quantitativo.

DESCRIÇÃO	QTDD
Fôrma(Vigas)	121 m ²
Fôrma(Lajes)	185 m ²
Escoramento + Cimbramento	35 m ³

Tabela 3 – Consumo de Fôrmas Caso A.

O consumo de aço da estrutura foi obtido a partir dos quantitativos de armação das vigas e lajes do pavimento em análise e são representados com os seus respectivos diâmetros na tabela 4.

DESCRIÇÃO		φ DIÂMETRO (mm)								
		3.4	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0
LA-JE-S	TELAS	209	-	-	-	-	-	-	-	-
	CAPITÉIS	-	-	54	-	-	-	-	-	-
	ESTRIBOS	-	1	3	9	6	-	-	-	-
	POSITIVO LONGITU-DINAL	-	-	44	98	44	34	117	-	-
	POSITIVO TRANS-VERSAL	-	-	49	116	42	-	61	-	-
	NEGATIVO LONGITU-DINAL	-	-	14	17	51	17	87	-	-
	NEGATIVO TRANS-VERSAL	-	-	28	66	74	12	-	-	-
VI-GA-S	-	-	153	15	23	41	194	338	357	63
TOTAL GERAL		209	154	207	329	258	257	603	357	63

Tabela 4 – Consumo de Aço Caso A.

4.1.2. Análise econômica das fôrmas para laje nervurada

Na tabela 5, é apresentado o cálculo para o custo da confecção da laje nervurada com cabaças, com a utilização de fôrma de compensado sob elas.

DESCRIÇÃO	QTDD	\$ UNIT	\$ TOTAL
Fôrmas (vigas e Lajes)	306 m ²	R\$ 23,31	R\$ 7.134,49
Aluguel Cimbramento	35 m ³	R\$ 26,58	R\$ 942,00
Aluguel Cabaças	390 un	R\$ 5,10	R\$ 1.989,00
Aluguel 1/2 Cabaças	82 un	R\$ 4,20	R\$ 344,40
TOTAL GERAL			R\$ 10.409,89

Tabela 5 – Custo de Fôrma Caso A.

4.1.3. Análise econômica do aço e do concreto para a laje nervurada

Na tabela 6, são apresentados os cálculos para os custos totais de aço e de concreto usados na confecção da laje nervurada de concreto armado.

DESCRIÇÃO		QTDD	\$ UNIT	\$ TOTAL
Armação	3.4 (tela Q61)	209 kg	R\$ 6,63	R\$ 1.385,67
	5.0	154 kg	R\$ 4,02	R\$ 619,08
	6.3	207 kg	R\$ 4,05	R\$ 838,35
	8.0	329 kg	R\$ 4,01	R\$ 1.319,29
	10.0	258 kg	R\$ 4,07	R\$ 1.050,06
	12.5	257 kg	R\$ 3,90	R\$ 1.002,30
	16.0	603 kg	R\$ 3,90	R\$ 2.351,70
	20.0	357 kg	R\$ 3,79	R\$ 1.353,03
	25.0	63 kg	R\$ 3,90	R\$ 245,70
Concreto Usinado (35MPa)		35 m ³	R\$ 319,45	R\$ 11.321,31
TOTAL GERAL				R\$ 11.567,01

Tabela 6 – Custo de Aço e de Concreto Caso A.

4.1.4. Análise econômica da mão de obra para a execução da laje nervurada

Na tabela 7, são apresentados os cálculos para os custos totais de mão de obra utilizados para execução dos serviços que contemplam a estrutura. Os valores são referentes apenas aos funcionários ligados diretamente à produção dos serviços descritos.

DESCRIÇÃO	QTDD	DIAS	HRS	\$ UNIT	\$ TOTAL
Carpinteiro	3	6	162 hr	R\$ 9,53	R\$ 1.543,86
Ajudante Carpintaria	3	6	162 hr	R\$ 7,18	R\$ 1.163,16
Armador	2	7	126 hr	R\$ 9,53	R\$ 1.200,78
Ajudante Armação	1	7	63 hr	R\$ 7,18	R\$ 452,34
TOTAL GERAL					R\$ 4.360,14

Tabela 7 – Mão de Obra Caso A.

4.2. Estudo de Caso B – Laje Maciça Protendida

A obra escolhida para análise do modelo de laje maciça protendida foi uma obra de uma edificação comercial, situada em Paulista-PE, onde o seu projeto contempla a utilização do método de protensão em mais de 95% da sua estrutura, onde a porcentagem restante contempla a área de vigas armadas convencionais, destinadas a apoiar os lances de escada e serão, portanto, dispensadas na presente análise.

A obra em questão possui o modelo de laje plana lisa em quase toda a sua superfície, não sendo na totalidade por conta da presença de um único capitel sobressaliente na superfície inferior da laje em um dos seus pilares. Possui vãos principais variando de 10 a 15 metros de comprimento e a espessura total da laje maciça é de 27 cm. A estrutura possui um fck de 40 MPa, porém, para otimização do processo de execução, foi definido a utilização do cimento CP-V (ARI) como material ligante na mistura de fabricação do concreto, e o traço definido para que a mistura atinja a resistência mínima necessária para tensionamento dos cabos aos três dias.

A protensão da laje é realizada três dias após a sua concretagem, período mínimo para que a estrutura esteja com uma resistência de 30MPa.

O modelo é dotado de um sistema de fôrmas mistas, madeira e aço, que não faz necessidade do uso de cimbramentos, onde os escoramentos são aplicados diretamente às fôrmas.

As faixas de feixes de cabos sobre os pilares possuem comprimentos bastante elevados, visto que a distribuição deve contemplar toda a estrutura e a fixação da sua ancoragem nas extremidades opostas.

Os pares de ancoragem foram definidos como uma ancoragem ativa e uma ancoragem passiva, e são dispostos intercaladamente nos bordos das lajes, os feixes de cabos dos pilares também seguem o mesmo raciocínio.

Para facilidade de execução da estrutura como um todo, foram definidos trechos de execução de modo que os materiais e mão de obra envolvidos fossem devidamente empregados, esta subdivisão permite o ré uso de escoramentos e fôrmas porém cria um novo item a se considerar.

A não execução integral da estrutura impossibilitaria a sua execução, visto que as ancoragens são dispostas nas extremidades opostas dos bordos das lajes, desta forma, para a obra em questão, foi necessário que houvesse um cronograma de execução da estrutura do pavimento em si, com intervalos suficientes para transferência dos materiais e mão de obra para os trechos subsequentes, precisando por fim de que as cordoalhas fossem ancoradas em seções distintas das prevista, funcionando desta forma como uma ancoragem ativa inicialmente, no interior da laje e funcionando como passiva na ancoragem final que já era prevista.

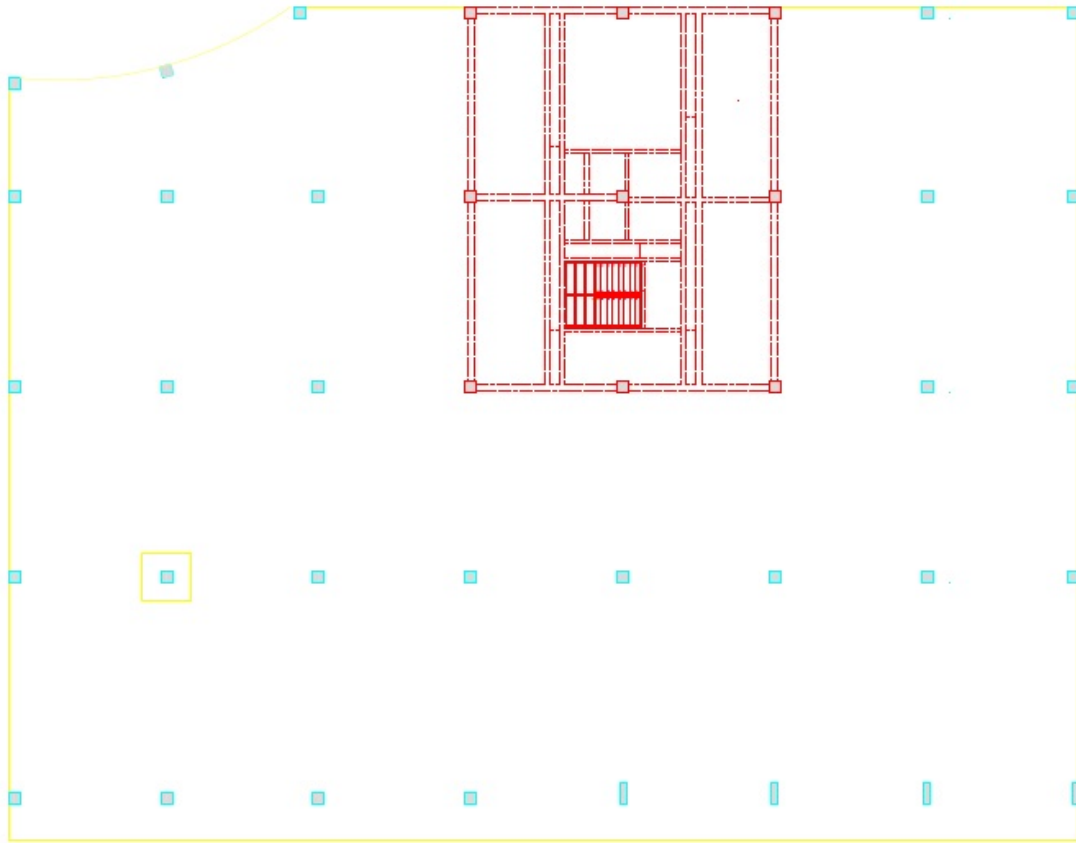


Figura 44 – Estudo de Caso B: Modelo Fôrma Laje Maciça.



Figura 45 – Vista Geral do Pavimento de Laje Lisa Protendida Pré-concretagem.

4.2.1. Análise do consumo dos materiais para laje protendida

O parâmetro de utilização do escoramento será o mesmo utilizado no modelo do caso A, onde o escoramento será dimensionado para suportar o peso final da estrutura de concreto sobre a fôrma, baseado, portanto no volume de concreto da estrutura. Já a fôrma, no modelo de laje protendida, é descrita pela área da superfície inferior de concreto acrescida da área da superfície lateral que irá conter o concreto. A tabela 8 apresenta este quantitativo.

DESCRIÇÃO	QTDD
Fôrma(Vigas)	2187 m ²
Escoramento + Cimbramento	573 m ³

Tabela 8 – Consumo de Fôrma Caso B.

O aço da laje protendida é compreendido pelas armações passivas e ativas, onde as ativas são as cordoalhas engraxadas, e as passivas são distribuídas em positiva, capitel, fretagem e negativa. Sua composição é apresentada na tabela 9.

DESCRIÇÃO		φ DIÂMETRO (mm)				
		8.0	10.0	12.5	20.0	25.0
LA-JES	CORDOALHA	-	-	15390	-	-
	POSITIVO (TELAS)	21664	-	-	-	-
	CAPITÉIS	-	-	-	185	-
	FRETAGEM	-	503	-	-	-
	NEGATIVO LONGITUDINAL	-	-	-	3527	5119
	NEGATIVO TRANSVERSAL	-	-	-	2386	2845
TOTAL GERAL		21664 kg	503 kg	15390 kg	6098 kg	7965 kg

Tabela 9 – Consumo de Aço Caso B.

4.2.2. Análise econômica das fôrmas para laje protendida

O parâmetro de utilização do escoramento será o mesmo utilizado no modelo do caso A, onde o escoramento será dimensionado para suportar o peso final da estrutura de concreto sobre a fôrma. Já a fôrma, no modelo de laje protendida, é descrita pela área da superfície inferior de concreto acrescida da área da superfície lateral que irá conter o concreto.

DESCRIÇÃO	QTDD	\$ UNIT	\$ TOTAL
Fôrmas (vigas e Lajes)	2187 m ²	R\$ 23,31	R\$ 50.978,97
Aluguel Cimbramento	573 m ³	R\$ 26,58	R\$ 15.230,34
TOTAL GERAL			R\$ 66.209,31

Tabela 10 – Custo de Fôrma Caso B.

4.2.3. Análise econômica do aço e do concreto para laje protendida

O aço da laje protendida é compreendido pelas armações passivas e ativas, onde as ativas são as cordoalhas engraxadas, e as passivas são distribuídas em positiva, capitel, fretagem e negativa. Na tabela 11 é apresentado o resumo do custo dessas, bem como do concreto estrutural.

DESCRIÇÃO		QTDD	\$ UNIT	\$ TOTAL
Armação	8.0 (tela Q503)	21664 kg	R\$ 4,10	R\$ 88.822,40
	10.0	503 kg	R\$ 4,02	R\$ 2.022,06
	12.5	15390 kg	R\$ 4,05	R\$ 62.329,50
	20.0	9098 kg	R\$ 4,01	R\$ 36.482,98
	25.0	7965 kg	R\$ 4,07	R\$ 32.417,55
Concreto Usinado (40MPa)		573 m ³	R\$ 489,13	R\$ 280.271,49
TOTAL GERAL				R\$ 502.345,98

Tabela 11 – Custo de Aço e de Concreto Caso B.

4.2.4. Análise econômica da mão de obra e equipamentos para execução da laje protendida

Na tabela 12, são apresentados os cálculos para os custos totais de mão de obra utilizados para execução dos serviços que contemplam a estrutura. Os valores são referentes apenas aos funcionários ligados diretamente à produção dos serviços descritos.

DESCRIÇÃO	QTDD	DIAS	HRS	\$ UNIT	\$ TOTAL
Carpinteiro	15	5	675 hr	R\$ 9,53	R\$ 6.432,75
Ajudante Carpintaria	12	5	540 hr	R\$ 7,18	R\$ 3.877,20
Armador	8	4	288 hr	R\$ 9,53	R\$ 2.744,64
Ajudante Armação	10	4	360 hr	R\$ 7,18	R\$ 2.584,80
Operador Equipamento	3	7	189 hr	R\$ 9,53	R\$ 1.801,17
Macaco Hidráulico	3	7	-	R\$ 520,56	R\$ 10.931,76
TOTAL GERAL					R\$ 28.372,32

Tabela 12 – Custo de Mão de Obra Caso B.

5. COMPARATIVOS

De posse dos quantitativos e valores apresentados no capítulo anterior serão elaboradas análises técnicas dos consumos, produtividade e custos em modos de comparação unitária.

5.1. Composição de Custo

As composições de custo dos modelos serão exibidas em forma de gráfico para facilitar a visualização de influencia de cada item para o custo total.

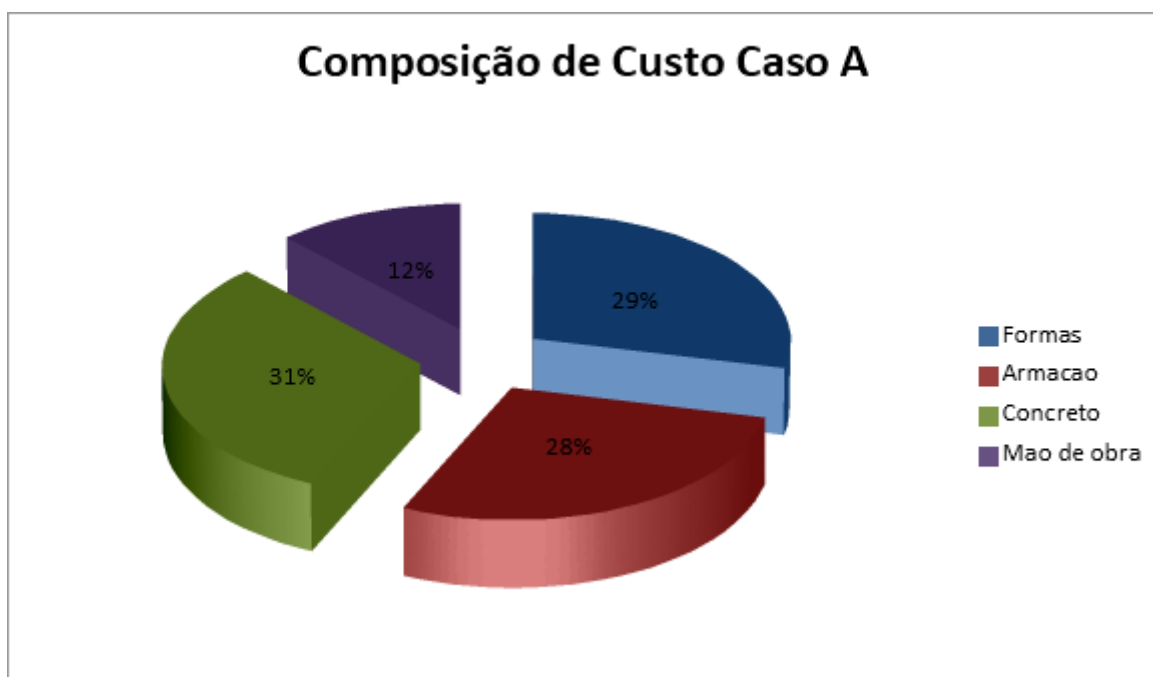


Figura 46 – Gráfico de Composição de Custo Caso B.

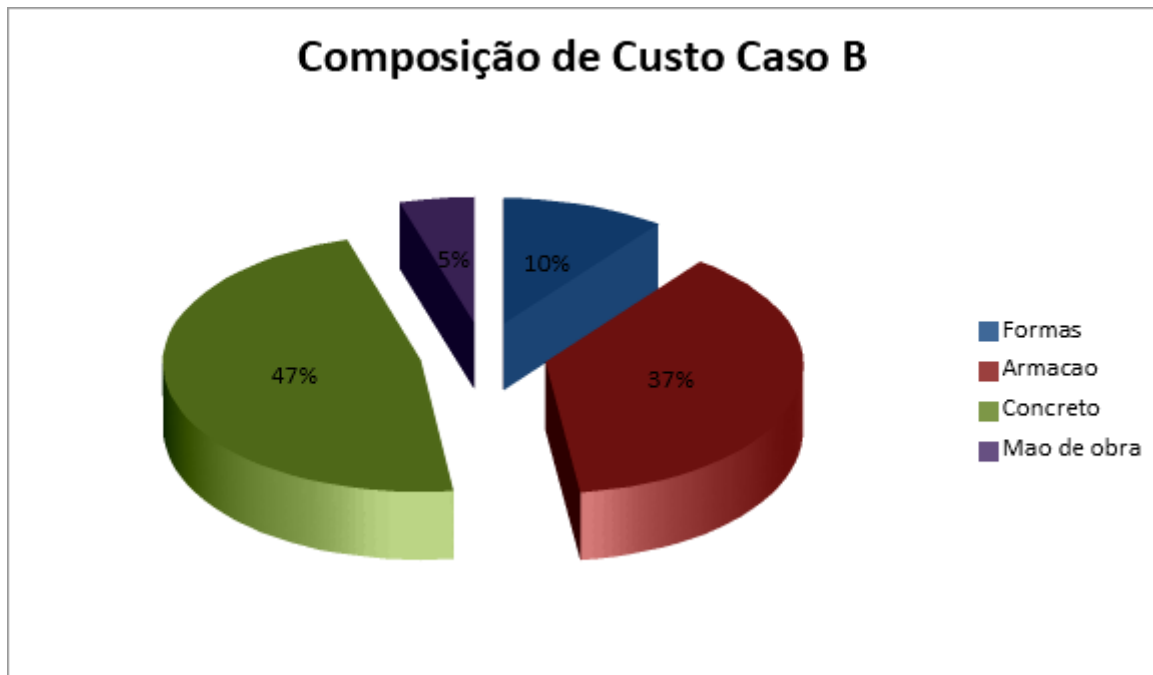


Figura 47 – Gráfico de Composição de Custo Caso B.

5.2. Consumos Individuais

5.2.1. Concreto

O consumo de concreto é dado por modelo de laje e é representativo ao valor do metro quadrado unitário de área útil da estrutura.

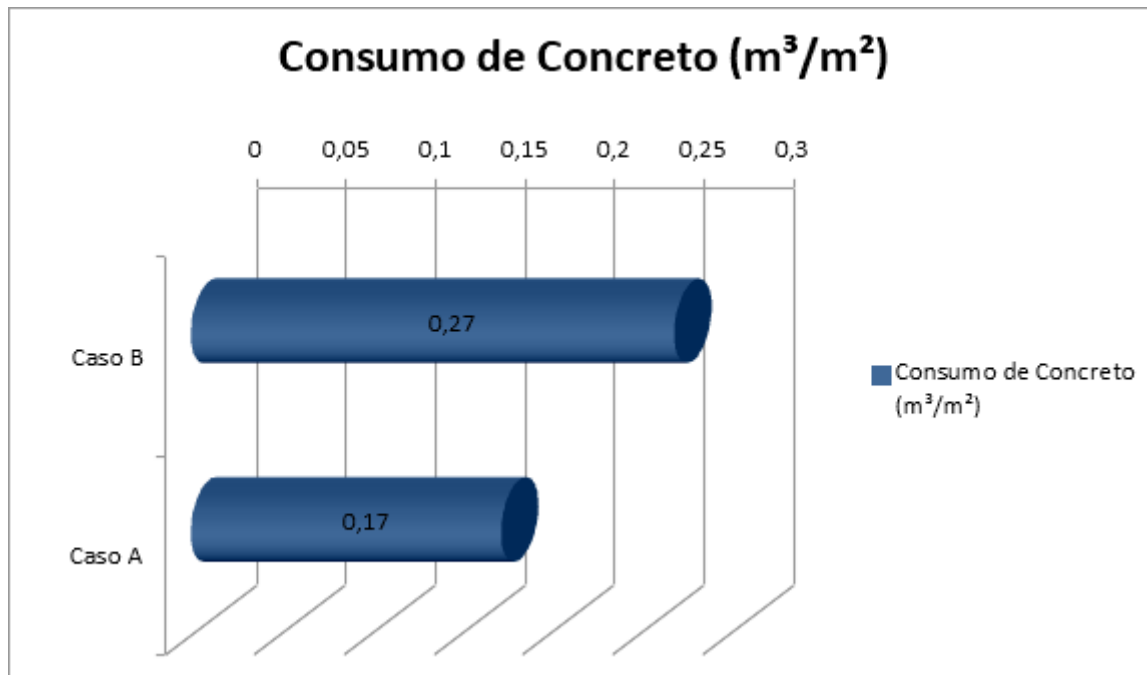


Figura 48 – Gráfico do Consumo de Concreto.

5.2.2. Aço

O consumo de aço é dado por modelo de laje e é representativo ao valor do metro cúbico unitário de concreto da estrutura.

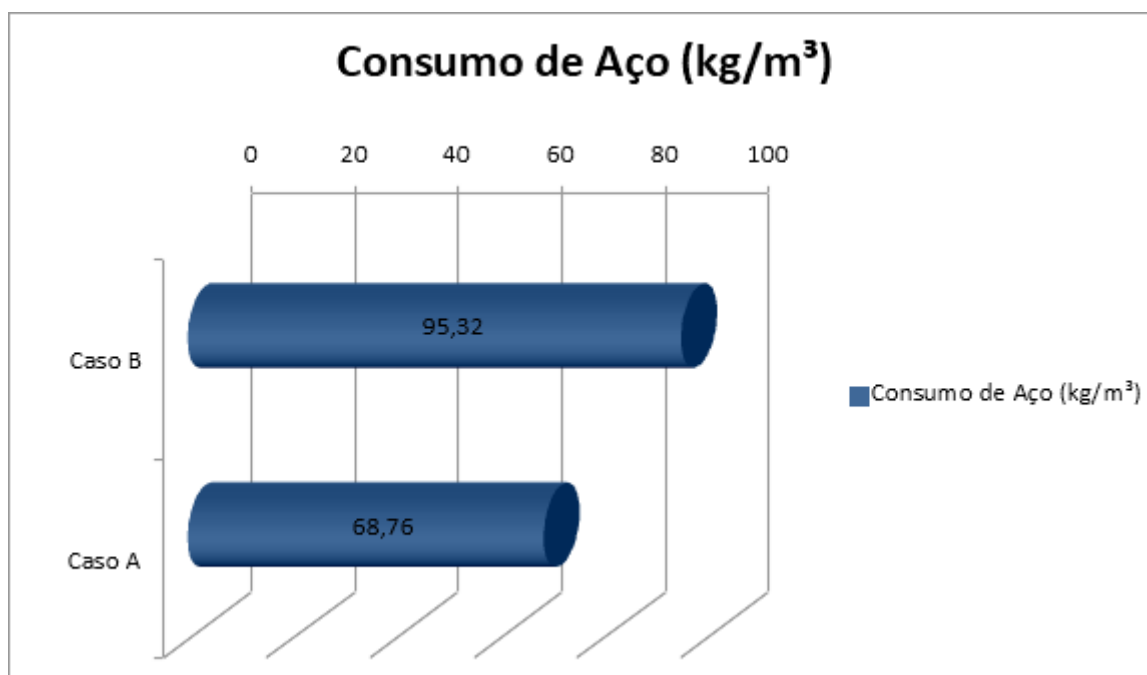


Figura 49 – Gráfico do Consumo de Aço.

5.3. Produtividade

A produtividade de execução dos modelos é relativa ao período de tempo gasto na execução dos serviços em relação à quantidade total dos mesmos.

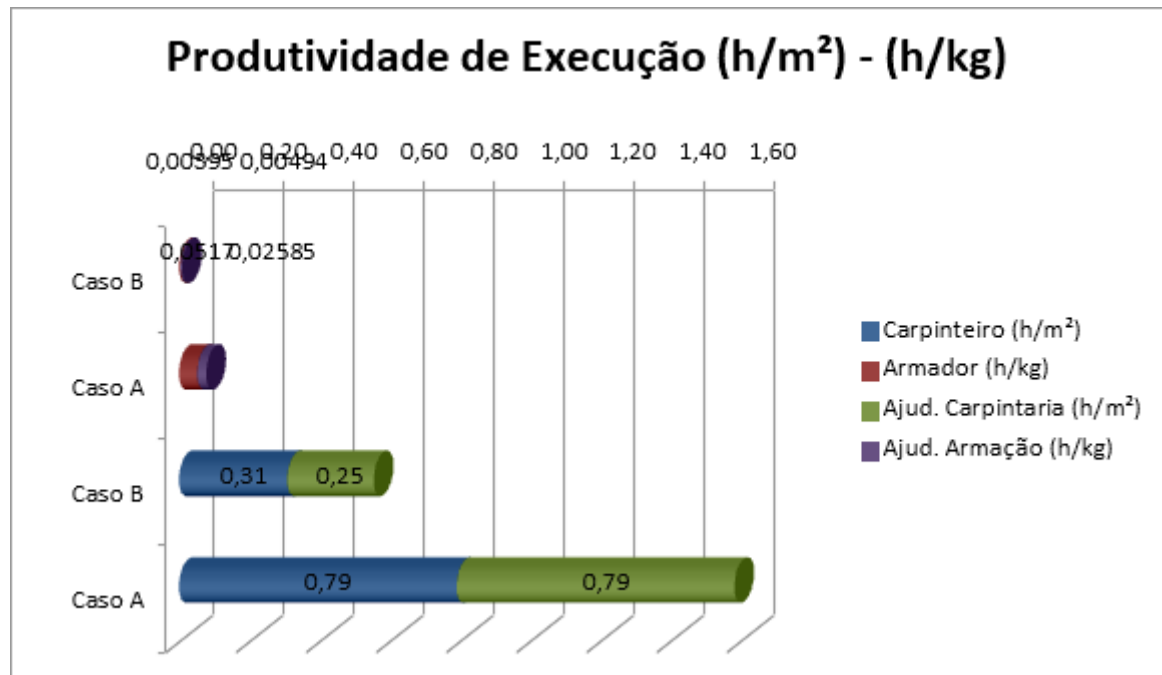


Figura 50 – Gráfico da Produtividade de Execução.

5.4. Custos Unitários

Os custos unitários de produção são referentes aos custos totais de cada modelo por metro quadrado de área útil.

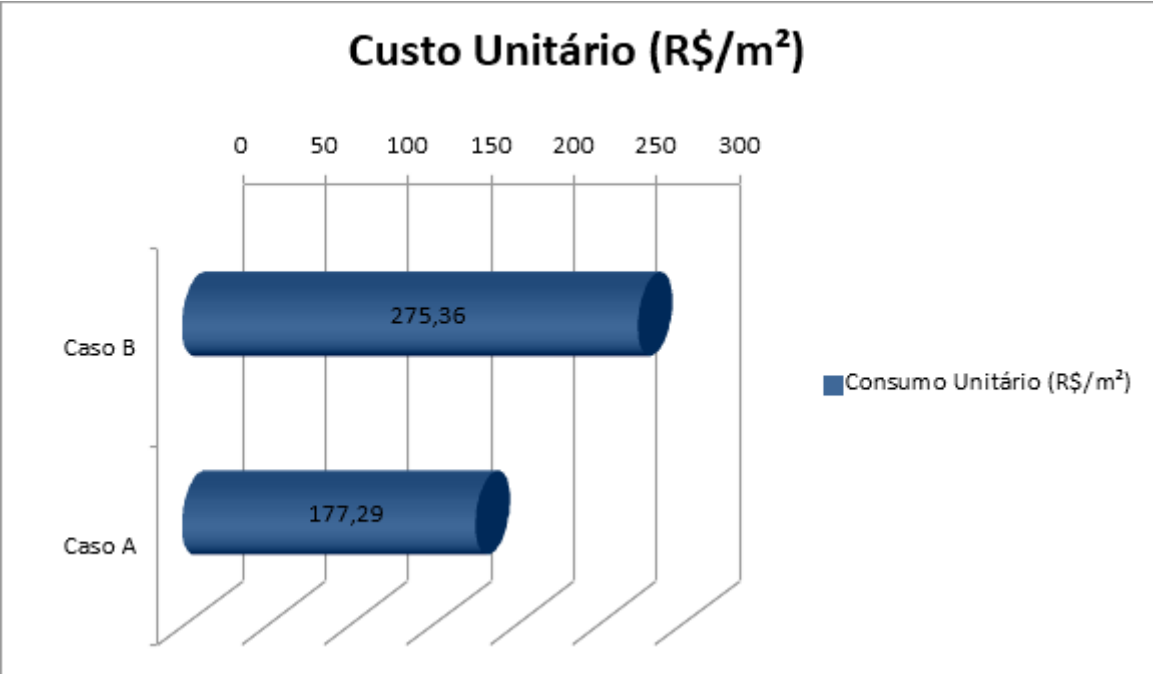


Figura 51 – Gráfico dos Custos Unitários.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As lajes desempenham funções essenciais nas estruturas do edifício, além de serem responsáveis por parcela considerável do volume total de concreto usado. Dessa maneira, a opção por um sistema estrutural para pavimento de edificação deve ser feita sempre estudando diversos aspectos econômicos, de execução, de funcionamento e fatores relacionados à interatividade dos demais subsistemas construtivos da edificação.

Normalmente se considera que o sistema estrutural mais adequado para um determinado pavimento é aquele que apresenta menor custo final, contabilizando-se somente os insumos (material e mão-de-obra) utilizados, não considerando, por exemplo, os custos de manutenção que ocorrem no período após construção e ocupação. No entanto, o que deve ser verificado não é o custo final, mas sim, os custos em relação aos benefícios obtidos.

Atualmente as lajes nervuradas de concreto armado constituem uma das melhores alternativas para a construção de pavimentos de edificações, em virtude de apresentarem uma série de vantagens. O peso próprio é reduzido devido ao alívio que ocorre pela eliminação de grande parte de concreto da região tracionada, a construção de vãos maiores é otimizada, há resistência a maiores cargas que as lajes convencionais maciças de concreto armado, possibilitam segurança na estrutura sem o perigo de corrosão precoce, as armações e a mão-de-obra são simplificadas.

No caso de utilização de fôrmas de polipropileno (grande emprego nas lajes nervuradas), pode ser dispensado o uso de compensados, as seções transversais de projeto são mais fáceis de serem obtidas na execução, por causa do emprego das fôrmas plásticas, existe grande facilidade de montagem e desmontagem, menor consumo de madeira, maior velocidade de execução, possibilidade de reutilização das fôrmas, redução do custo final da obra, aumentando consequentemente a viabilidade do sistema construtivo.

Em relação ao material de enchimento, os blocos cerâmicos ou de concreto celular são melhores isolantes térmicos do que o concreto maciço, porém uma de suas restrições é o peso específico elevado. Nesse contexto, os blocos de poliestireno expandido vêm ganhando espaço na execução de lajes nervuradas. As principais características desses blocos são a facilidade de corte, maior possibilidade

de planificação do teto, eficiente distribuição de cargas, isolamento termo-acústico e ótima resistência aos procedimentos de colocação das armaduras e concretagem.

As lajes maciças protendidas, assim como todas as lajes que utilizam o artifício da protensão de aços suportam maiores carregamentos, principalmente aplicados ao centro do vão, caso mais crítico em estruturas biapoiadas. Consequentemente, permite vencer grandes vãos livres, ou seja, sem a necessidade de pilares e vigas de sustentação.

É aproveitado ao máximo a resistência mecânica dos seus principais materiais constituintes, o concreto e o aço. Isto decorre do fato de que, a laje maciça protendida possibilita flechas consideravelmente inferiores em relação a outros modelos, tendo em vista que a armação protendida (ativa) impede deformações provenientes do peso próprio da estrutura em concreto.

O aço total também é reduzido devido à alta tensão resistente de escoamento dos cabos de protensão, os quais suportam satisfatoriamente as mesmas solicitações que uma maior quantidade de aço não protendido suportaria. Apesar do baixo domínio da tecnologia de protensão no Brasil como um todo e do elevado nível de detalhamento de projeto, estados como o Ceará já avançam bastante na utilização de modelos estruturais protendidos de lajes.

Entre outras notáveis vantagens da aplicação de lajes maciças protendidas, é possível destacar a boa estética proporcionada e possibilidade de menor pé direito em edificações. Uma menor distância piso a piso em um pavimento implica, principalmente para prédios altos, em uma ótima redução de custos com revestimentos, elementos de fachada e instalações embutidas.

Em relação aos estudos de caso aqui apresentados, se faz necessário enfatizar que a abordagem realizada teve como intuito divulgar parâmetros relativos aos custos gerais de materiais, mão-de-obra e por consequência, breve análise de produtividade para cada caso. A temática principal do presente estudo consiste na exposição da aplicabilidade econômica de cada caso a partir dos cálculos ilustrados no capítulo 4 e comparados no capítulo 5; foge ao escopo do trabalho uma análise comparativa com fins de determinação de maior economia de um modelo em detrimento do outro.

Analisando os modelos reais apresentados, pode-se inferir que a parcela de custo da laje maciça protendida com concreto é aproximadamente 55% maior do que a mesma despesa na laje nervurada de concreto armado, ratificando a redução proveniente do uso de nervuras nas zonas tracionadas. A execução de uma laje de

estrutura mista, ou seja, laje nervurada protendida pode ser uma ótima alternativa quando se deseja minimizar gastos com concretagem. Para a relação de consumo individual de concreto, foi adotada a grandeza m^3/m^2 , ou seja, a razão entre a produção do volume de concreto e a área superficial da laje. Como resultado, tem-se que o consumo individual de concreto na laje maciça protendida é 58% maior do que na laje nervurada de concreto armado.

Em relação, as armações, a laje maciça protendida consta de um custo com aço 36% maior do que a laje nervurada de concreto armado. A maior disparidade consiste na diferença percentual do uso de fôrmas entre os modelos, a laje nervurada de concreto armado gasta 163% mais com fôrmas do que a laje maciça protendida. Nesse sentido, lajes maciças economizam significativamente mais com fôrmas.

Por fim, é necessário destacar a parcela de mão-de-obra no orçamento total, apesar de ambos os percentuais, 12% e 5%, para a laje nervurada de concreto armado e para a laje maciça protendida, respectivamente. Ambos representam baixos índices de porcentagem, porém o gasto com equipes ainda é bem mais alto, proporcionalmente, para a laje nervurada.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

____. NBR 12721: **Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios**. Rio de Janeiro, 2006.

____. NBR 14931: **Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

CARVALHO, Roberto Chust, FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. São Carlos, 2007.

EMERICK, A. A., **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Brasília, 2007.

FREYSSINET, **SISTEMA FREYSSINET PARA PROTENSÃO E ESTAIS**. Catálogo Técnico, 2011.

GIONGO, J.S., BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando. **Concreto armado: Projeto e Construção de Lajes Nervuradas**. São Carlos, 2007.

NAZAR, N. **Fôrmas e Escoramentos Para Edifícios**. São Paulo, 2005.

RUDLOFF., **Projeto/Catálogo de Lajes Protendidas**. Catálogo Técnico, 2011.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira Da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. São Carlos, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI, Julho/2014. Disponível em www.caixa.gov.br, acesso em 01/09/14.

<http://www.belgo.com.br>, acesso em 20/08/14

<http://www.construpor.com.br>, acesso em 30/08/14

<http://www.dictionaryofconstruction.com>, acesso em 25/08/14

<http://www.gaussprotensao.com.br>, acesso em 02/09/14

<http://www.rpaltda.com.br>, acesso em 02/09/14

ANEXO I – PROJETOS DE FORMA DOS MODELOS EM ESTUDO

ANEXO II – TABELA DE TELAS SOLDADAS

Aço CA 60		Espaçamento entre fios (cm)		Diâmetro (mm)		Seções (cm²/m)		Apresentação	Dimensões (m)		Peso	
Série	Designação	Long.	X Transv.	Long.	X Transv.	Long.	X Transv.		Larg.	X Comp.	kg/m²	kg/Peça
61	Q 61	15	X 15	3,4	X 3,4	0,61	X 0,61	ROLO	2,45	X 120,00	0,97	285,2
75	Q 75	15	X 15	3,8	X 3,8	0,75	X 0,75	ROLO	2,45	X 120,00	1,21	355,7
92	Q 92	15	X 15	4,2	X 4,2	0,92	X 0,92	ROLO	2,45	X 60,00	1,48	217,6
	T 92	30	X 15	4,2	X 4,2	0,46	X 0,92	ROLO	2,45	X 120,00	1,12	329,3
113	Q 113	10	X 10	3,8	X 3,8	1,13	X 1,13	ROLO	2,45	X 60,00	1,80	264,6
	L 113	10	X 30	3,8	X 3,8	1,13	X 0,38	ROLO	2,45	X 60,00	1,21	177,9
	T 113	30	X 10	3,8	X 3,8	0,38	X 1,13	ROLO	2,45	X 60,00	1,22	179,3
138	Q 138	10	X 10	4,2	X 4,2	1,38	X 1,38	ROLO	2,45	X 60,00	2,20	323,4
	Q 138	10	X 10	4,2	X 4,2	1,38	X 1,38	PAINEL	2,45	X 6,00	2,20	32,3
	R 138	10	X 15	4,2	X 4,2	1,38	X 0,92	PAINEL	2,45	X 6,00	1,83	26,9
	M 138	10	X 20	4,2	X 4,2	1,38	X 0,69	PAINEL	2,45	X 6,00	1,65	24,3
	L 138	10	X 30	4,2	X 4,2	1,38	X 0,46	ROLO	2,45	X 60,00	1,47	216,1
	T 138	30	X 10	4,2	X 4,2	0,46	X 1,38	ROLO	2,45	X 60,00	1,49	219,0
159	Q 159	10	X 10	4,5	X 4,5	1,59	X 1,59	PAINEL	2,45	X 6,00	2,52	37,0
	R 159	10	X 15	4,5	X 4,5	1,59	X 1,06	PAINEL	2,45	X 6,00	2,11	31,0
	M 159	10	X 20	4,5	X 4,5	1,59	X 0,79	PAINEL	2,45	X 6,00	1,90	27,9
	L 159	10	X 30	4,5	X 4,5	1,59	X 0,53	PAINEL	2,45	X 6,00	1,69	24,8
196	Q 196	10	X 10	5,0	X 5,0	1,96	X 1,96	PAINEL	2,45	X 6,00	3,11	45,7
	R 196	10	X 15	5,0	X 5,0	1,96	X 1,30	PAINEL	2,45	X 6,00	2,60	38,2
	M 196	10	X 20	5,0	X 5,0	1,96	X 0,98	PAINEL	2,45	X 6,00	2,34	34,4
	L 196	10	X 30	5,0	X 5,0	1,96	X 0,65	PAINEL	2,45	X 6,00	2,09	30,7
	T 196	30	X 10	5,0	X 5,0	0,65	X 1,96	PAINEL	2,45	X 6,00	2,11	31,0
246	Q 246	10	X 10	5,6	X 5,6	2,46	X 2,46	PAINEL	2,45	X 6,00	3,91	57,5
	R 246	10	X 15	5,6	X 5,6	2,46	X 1,64	PAINEL	2,45	X 6,00	3,26	47,9
	M 246	10	X 20	5,6	X 5,6	2,46	X 1,23	PAINEL	2,45	X 6,00	2,94	43,2
	L 246	10	X 30	5,6	X 5,6	2,46	X 0,82	PAINEL	2,45	X 6,00	2,62	38,5
	T 246	30	X 10	5,6	X 5,6	0,82	X 2,46	PAINEL	2,45	X 6,00	2,64	38,8
283	Q 283	10	X 10	6,0	X 6,0	2,83	X 2,83	PAINEL	2,45	X 6,00	4,48	65,9
	R 283	10	X 15	6,0	X 6,0	2,83	X 1,88	PAINEL	2,45	X 6,00	3,74	55,0
	M 283	10	X 20	6,0	X 6,0	2,83	X 1,41	PAINEL	2,45	X 6,00	3,37	49,5
	L 283	10	X 30	6,0	X 6,0	2,83	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	3,00	44,1
	T 283	30	X 10	6,0	X 6,0	0,94	X 2,83	PAINEL	2,45	X 6,00	3,03	44,5
335	Q 335	15	X 15	8,0	X 8,0	3,35	X 3,35	PAINEL	2,45	X 6,00	5,37	78,9
	L 335	15	X 30	8,0	X 6,0	3,35	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	3,48	51,2
	T 335	30	X 15	6,0	X 8,0	0,94	X 3,35	PAINEL	2,45	X 6,00	3,45	50,7
396	Q 396	10	X 10	7,1	X 7,1	3,96	X 3,96	PAINEL	2,45	X 6,00	6,28	92,3
	R 396	10	X 15	7,1	X 7,1	3,96	X 2,64	PAINEL	2,45	X 6,00	5,24	77,0
	M 396	10	X 20	7,1	X 7,1	3,96	X 1,98	PAINEL	2,45	X 6,00	4,73	69,5
	L 396	10	X 30	7,1	X 6,0	3,96	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	3,91	57,5
	T 396	30	X 10	6,0	X 7,1	0,94	X 3,96	PAINEL	2,45	X 6,00	3,92	57,6
503	Q 503	10	X 10	8,0	X 8,0	5,03	X 5,03	PAINEL	2,45	X 6,00	7,97	117,2
	R 503	10	X 15	8,0	X 8,0	5,03	X 3,35	PAINEL	2,45	X 6,00	6,66	97,9
	M 503	10	X 20	8,0	X 8,0	5,03	X 2,51	PAINEL	2,45	X 6,00	6,00	88,2
	L 503	10	X 30	8,0	X 6,0	5,03	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	4,77	70,1
	T 503	30	X 10	6,0	X 8,0	0,94	X 5,03	PAINEL	2,45	X 6,00		70,0
636	Q 636	10	X 10	9,0	X 9,0	6,36	X 6,36	PAINEL	2,45	X 6,00	10,09	148,3
	L 636	10	X 30	9,0	X 6,0	6,36	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	5,84	85,8
785	Q 785	10	X 10	10,0	X 10,0	7,85	X 7,85	PAINEL	2,45	X 6,00	12,46	183,2
	L 785	10	X 30	10,0	X 6,0	7,85	X 0,94	PAINEL	2,45	X 6,00	7,03	103,3
1131	L 1131	10	X 30	12,0	X 7,1	11,31	X 1,32	PAINEL	2,45	X 6,00	10,09	118,6