

## **ANÁLISE NUMÉRICA COMPARATIVA ENTRE LAJES MACIÇAS E NERVURADAS COM DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS DE ENCHIMENTO**

**André F. de O. Lopes, Giuliana F. F. Bono, Gustavo Bono**

*Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) – Núcleo de Tecnologia – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104 km 59, Caruaru-PE, CEP 55002-970, Brasil, andrelopesengenharia@gmail.com, giuliana.franca@gmail.com, bonogustavo@gmail.com, <http://www.ufpe.br/caa>*

**Palavras chave:** Concreto Armado, Laje Maciça, Laje Nervurada, Método dos Elementos Finitos.

**Resumo.** O presente artigo apresenta uma aplicação do Método dos Elementos Finitos na mecânica estrutural através de um estudo técnico comparativo entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento, tais como: blocos de EPS, blocos cerâmicos e caixotes reaproveitáveis de polipropileno. As simulações numéricas foram efetuadas utilizando o software CYPECAD versão 2010b, fundamentado na norma NBR 6118 de 2003 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Os cálculos dos esforços e deformações, assim como o dimensionamento da estrutura, foram determinados através do referido programa, obtendo-se os quantitativos referentes aos esforços cortantes, momentos fletores, deslocamentos, consumo de fôrmas, consumo de concreto, taxa de armadura e a composição do custo total da estrutura para cada sistema estrutural analisado.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento acelerado da industrialização no Brasil, houve um aumento considerável no setor da construção civil, sendo este setor responsável por grande consumo de recursos naturais no mundo. Neste cenário a indústria da construção civil tem importância fundamental dentre os objetivos do Desenvolvimento Sustentável, não apenas pela sua contribuição para a economia como também pelos seus grandes impactos gerados tanto em termos ambientais como em termos sociais. Construir de forma sustentável consiste em minimizar o consumo de recursos naturais e maximizar a sua reutilização. Neste sentido um diferencial competitivo para as empresas desse setor é reduzir o consumo de material utilizado na construção civil. Por isso as empresas do setor vêm investindo incessantemente no conhecimento de novas técnicas que permitam minimizar o desperdício e, conseqüentemente, o custo total da obra.

Nos edifícios de vários pavimentos, as lajes respondem por elevada parcela do consumo de concreto. Por esta razão, torna-se oportuno o estudo aprofundado dos critérios de escolha dos tipos de laje a serem empregadas nos edifícios de vários pisos, tendo em vista a obtenção de soluções técnicas e economicamente otimizadas, onde essa compensação não é alcançada somente pelo lado da economia de materiais, mas também pela rapidez proporcionada pelo método construtivo.

Atualmente existem diversos sistemas estruturais que empregam lajes de concreto armado como lajes maciças, nervuradas (pré-fabricadas ou moldadas “in loco”), protendidas, mistas etc. Cada sistema possui sua especificidade de aplicação com vantagens e desvantagens. Devido ao grande número de sistemas estruturais encontrados no mercado da construção civil, é extremamente importante à busca por soluções que possibilitem a otimização nas obras de engenharia através dos conhecimentos técnicos aplicados à escolha de sistemas estruturais que conduzam ao dimensionamento ótimo de estruturas. A escolha do sistema estrutural mais adequado para um determinado pavimento, assim como a definição do processo construtivo a ser utilizado, deve ser feita considerando alguns parâmetros básicos: finalidade da edificação; projeto arquitetônico; cargas de utilização; tamanho dos vãos a vencer; disponibilidade de equipamentos, materiais e mão-de-obra; custos e interação com os demais subsistemas construtivos da edificação.

Diante deste panorama o objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo técnico comparativo entre os pavimentos de um edifício executados com lajes maciças e lajes nervuradas moldadas “in loco” utilizando diferentes tipos de materiais de enchimento. Onde os cálculos dos esforços e das deformações, assim como o dimensionamento da estrutura, são obtidos através do software CYPECAD versão 2010b, o qual permite a obtenção dos quantitativos referentes aos esforços cortantes, momentos fletores, deslocamentos, consumo de fôrmas, consumo de concreto e taxa de armadura.

## 2 LAJES DE CONCRETO ARMADO

De modo geral as lajes têm uma dupla função estrutural, uma vez que funcionam como placas, ao suportarem as cargas verticais aplicadas ao longo dos pisos, e como chapas, ao se constituírem em diafragmas rígidos horizontais que distribuem pelos diferentes pilares da estrutura as forças horizontais atuantes. Sendo assim, as lajes podem ser entendidas como elementos estruturais bidimensionais que têm a dupla função de resistir aos esforços normais que atuam perpendicularmente ao seu plano principal e aos esforços tangenciais que atuam paralelamente a este plano, conforme ilustrado na [Figura 1](#).

Nos edifícios altos, a existência deste comportamento de chapa é essencial para a garantia

do contraventamento da estrutura, uma vez que as lajes são os principais responsáveis pela transmissão dos esforços horizontais que permitem aos pilares contraventados se apoiarem nos pilares de contraventamento, garantindo assim a estabilidade global da estrutura. Se por qualquer motivo este comportamento de chapa tiver sua eficiência diminuída, ou mesmo anulada, a segurança da construção em relação a um possível colapso global ficará seriamente comprometida, pela impossibilidade de serem resistidos os esforços horizontais de contraventamento (Franca e Fusco, 1997).

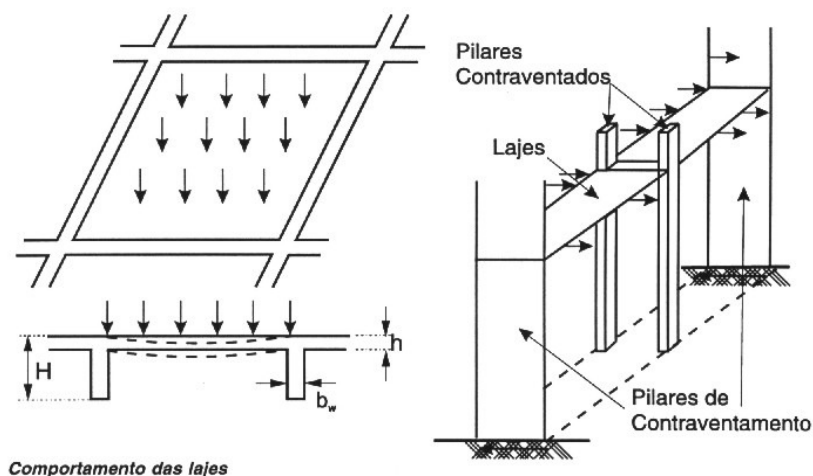


Figura 1 – Funções estruturais das lajes. (a) Laje funcionando como placa e (b) Laje funcionando como chapa (Franca e Fusco, 1997).

## 2.1 Lajes Maciças de Concreto Armado

As lajes maciças de concreto armado são placas de espessura uniforme composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiadas em vigas ou paredes ao longo das bordas.

## 2.2 Lajes Nervuradas de Concreto Armado

Segundo o item 14.7.7 da norma [NBR 6118/03](#) as lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.

As lajes nervuradas são constituídas por uma série de vigas solidarizadas entre si pela mesa, possuem seção transversal em forma de “T” e comportam-se, estaticamente, de maneira intermediária entre placa e grelha (Araújo, 2008). Desta forma, combatem com muita eficiência os esforços de tração, que são absorvidos pela nervura com a devida armadura, e os esforços de compressão que são suportados, em sua maior parte, pela mesa de concreto. Com a linha neutra situada próxima a região da mesa, a parte inferior pouco contribui para a resistência de compressão, servindo apenas para garantir a aderência entre o aço e o concreto. Tal região é considerada inerte e poderá ser preenchida com material mais leve, sem função estrutural, como placas de poliestireno expandido (EPS), elementos cerâmicos, entre outros (Araújo, 2008).

## 3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso trata de um edifício tipo FLAT de 7 andares em estrutura de concreto

armado localizado na Avenida Presidente Afonso Pena, Bairro do Bessa, na Cidade de João Pessoa, Estado da Paraíba, Brasil, com geometria conforme a [Figura 2](#). A arquitetura do edifício exemplo foi gentilmente cedida pela empresa ESCALA – Escritório de Cálculos Estruturais Ltda.

O edifício em questão possui um pavimento de subsolo, um pavimento térreo, quatro pavimentos-tipo, um pavimento de cobertura e um de coberta, bem como o reservatório de água superior e a casa de máquinas. Todos os pavimentos foram considerados com pé-direito de 2,80 metros. O edifício foi numericamente modelado através de 4 modelos de sistemas estruturais convencionais de lajes de concreto armado: lajes maciças, lajes nervuradas com 3 tipos diferentes de enchimento: blocos cerâmicos, blocos de poliestireno expandido (EPS) e blocos reaproveitáveis de polipropileno.

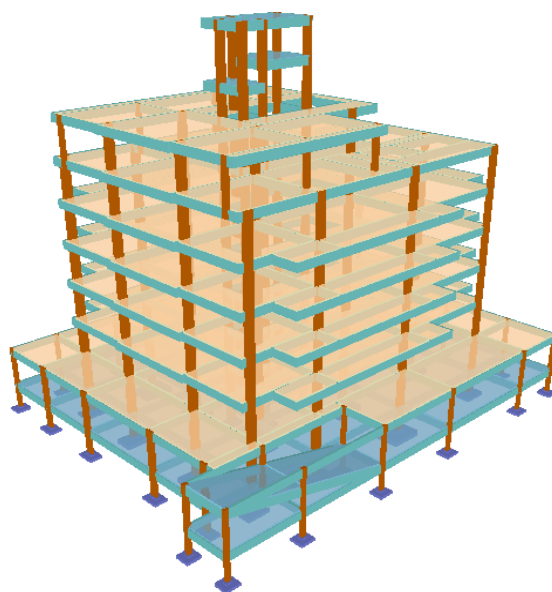


Figura 2 – Estrutura em 3D do edifício tipo FLAT analisada no estudo de caso.

Nos pavimentos, além do peso próprio, foram consideradas uma carga permanente adicional de  $1,0 \text{ kN/m}^2$  (para pisos e revestimentos) e uma sobrecarga de  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Sobre todas as vigas foram consideradas paredes ( $4,50 \text{ kN/m}$  de alvenaria). Supõe-se neste exemplo que todos os pavimentos apresentam as mesmas cargas verticais.

Para as ações horizontais, considerou-se vento não turbulento com velocidade básica de  $30 \text{ m/s}$ , com fator topográfico  $S_1$  e fator estatístico  $S_3$  iguais a  $1,0$  segundo a norma [NBR 6123/88](#). As ações horizontais de sismos foram desprezadas, supondo-se que o edifício se encontra na zona sísmica 0 segundo a norma [NBR 15421/06](#).

As vigas e pilares são constituídas de concreto C25, com módulo de elasticidade tangente de  $28 \text{ GPa}$ . Adotou-se, para fins de comparação, a tensão admissível do solo local igual a  $0,6 \text{ MPa}$  para todos os sistemas analisados. Foram utilizadas sapatas como elementos de fundação direta, em que os quantitativos de concreto e armadura das sapatas foram obtidos através de listagens emitidas pelo programa de cálculo, enquanto que o quantitativo da área de fôrmas foi obtido segundo [Alonso \(2010\)](#).

Para a realização dos cálculos e detalhamentos do diversos sistemas estruturais utilizou-se o software comercial de cálculo estrutural de concreto armado CYPECAD versão 2010b. Esse programa permite a modelagem de estruturas de concreto armado para o dimensionamento de lajes maciças, nervuradas moldadas no local e pré-moldadas, dentre outras finalidades.

Devido ao fato do CYPECAD não calcular a flecha diferida no tempo em lajes maciças e nervuradas, levando em conta a fluência, a verificação da flecha diferida nas lajes foram realizadas conforme o processo do item 17.3.2.1.2 da norma [NBR 6118/03](#) para cálculo da flecha diferida no tempo em estruturas de concreto armado.

As análises foram feitas considerando-se o comportamento elástico-linear dos elementos estruturais e foram extraídas do programa plantas de fôrmas, detalhamentos de armaduras e quantitativos, tais como o volume de concreto, taxa de armadura e o índice de fôrmas.

As composições adotadas, com pequenas adaptações, foram obtidas da coletânea publicada periodicamente pela PINI. Essas composições são apresentadas nas “Tabelas para Composições de Preços para Orçamentos” – TCPO (PINI, 2008). As composições consideram apenas os serviços propriamente ditos, sendo assim, não se consideram os custos relacionados aos serviços iniciais, de instalação da obra, do terreno, administrativos ou quaisquer outros não relacionados diretamente com os serviços abordados neste trabalho. Também não estão sendo considerados os custos com a estrutura da escada e dos cimbramentos.

Os valores em reais dos insumos para as composições de custos foram obtidos na tabela SINAPI de preços de insumos, disponível no site da Caixa Econômica Federal, para o estado de Pernambuco (Brasil) referente ao mês de agosto de 2012.

#### **4 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO EXEMPLO TIPO FLAT REALIZADA PELO CYPECAD**

A análise das solicitações pelo programa CYPECAD foi realizada através de um cálculo espacial em 3D, pelo Método dos Elementos Finitos, considerando todos os elementos que definem a estrutura: pilares, vigas e lajes. A estrutura discretizada mostra-se na [Figura 3](#).

Os pilares foram discretizados como barras verticais entre cada piso, com um nó no arranque de fundação ou em outro elemento, como uma viga ou laje, e na interseção de cada piso, sendo o seu eixo o da secção transversal. Consideram-se as excentricidades devidas à variação de dimensões em altura e o comprimento da barra é a altura ou a distância livre à face de outros elementos.

As vigas definem-se em planta fixando nós na intersecção com as faces de elementos de suporte (pilares, paredes ou muros), assim como nos pontos de corte com elementos de laje ou com outras vigas. Assim se criam os nós no eixo e nos bordos laterais e, analogamente, nas extremidades de consolos e extremos livres ou em contato com outros elementos das lajes. Por isso, uma viga entre dois pilares é constituída por várias barras consecutivas, cujos nós são as interseções com as barras de lajes. Possuem sempre três graus de liberdade, mantendo a hipótese de diafragma rígido entre todos os elementos que se encontram em contato.

A discretização dos panos de laje maciça realiza-se em malhas de elementos tipo barra de tamanho máximo de 25 cm e efetua-se uma condensação estática de todos os graus de liberdade. Tem-se em conta a deformação por corte e mantém-se a hipótese de diafragma rígido e considera-se a rigidez à torção dos elementos.

A discretização dos panos de laje nervurada realiza-se em malhas de elementos tipo barra cujo tamanho é um terço da dimensão entre eixos definida entre nervuras da zona nervurada e cuja inércia à flexão é metade da zona maciça, e a inércia à torção, o dobro da de flexão. A dimensão da malha mantém-se constante tanto na zona nervurada como na maciça, adotando em cada zona as inércias médias antes indicadas.

Após o processamento do cálculo estrutural o programa fornece informações do comportamento mecânico da estrutura diante das combinações de ações, como envoltórias de esforços normais, cortantes e momentos fletores bem como as flechas. Na [Figura 4](#) tem-se o

diagrama de isovalores de deslocamentos (flechas imediatas) das lajes do piso 1 para uma determinada combinação de ações atuantes nos panos de lajes. Neste diagrama é possível analisar e determinar os valores máximos e a posição das flechas de cada laje do pavimento. Com esses valores aplica-se o coeficiente de fluência determinado pela [NBR 6118/03](#) para calcular as flechas diferidas no tempo e compara-se com o limite máximo permitido na norma.

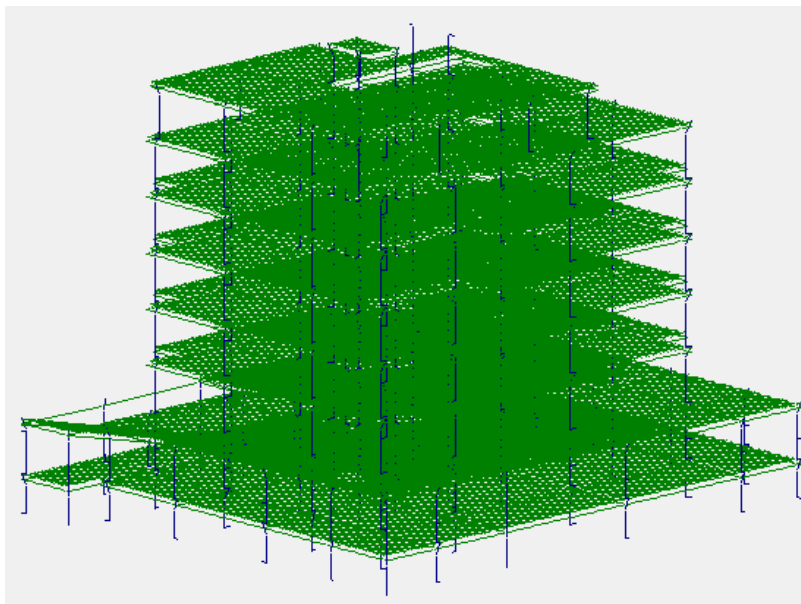


Figura 3 – Discretização do modelo 3D do edifício tipo flat analisado

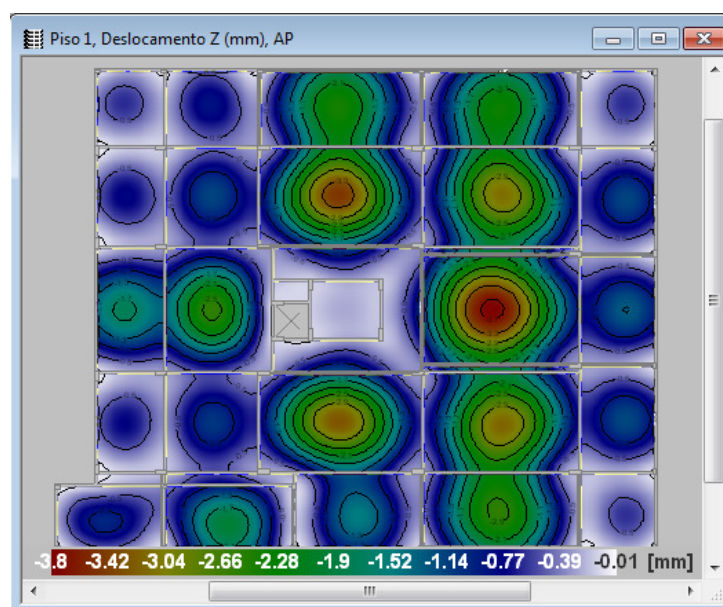


Figura 4 – Diagrama de isovalores das flechas de cada pano de laje por pavimento

A [Figura 5](#) mostra o modelo 3D da estrutura deformada para um determinado tipo de combinação de ações e através da escala de cores é possível identificar os elementos (vigas e pilares) que apresentam os maiores valores de deformação.

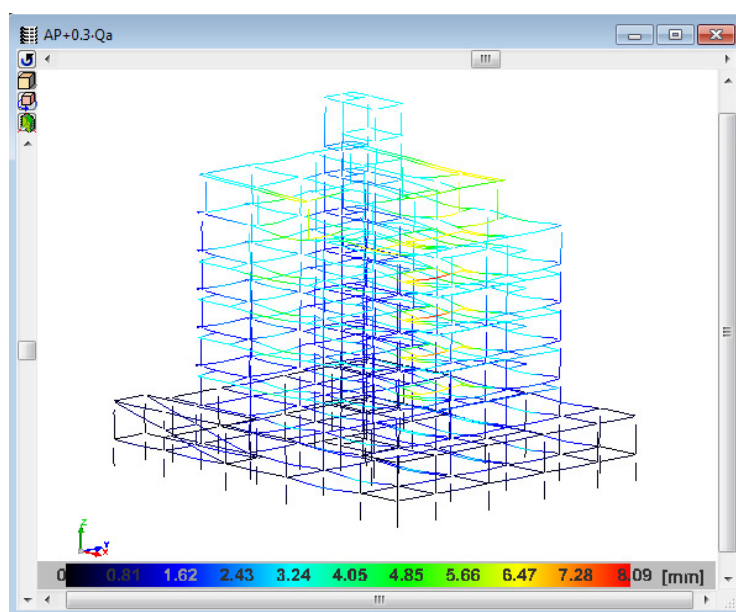


Figura 5 – Estrutura deformada do modelo 3D para cada tipo de combinação de ações

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o lançamento e o dimensionamento da estrutura com todos os quatro modelos de sistemas estruturais, serão apresentados os resultados da análise estrutural e de custo de todos os modelos avaliados na pesquisa.

Os modelos estudados seguem a seguinte nomenclatura para efeito de comparação:

**LM:** Estrutura convencional com lajes maciças

**LN1:** Estrutura convencional com lajes nervuradas (enchimento de tijolos cerâmicos)

**LN2:** Estrutura convencional com lajes nervuradas (enchimento de poliestireno expandido ou EPS)

**LN3:** Estrutura convencional com lajes nervuradas (caixote reaproveitável de polipropileno)

### 5.1 Análise Estrutural

A [Tabela 1](#) mostra os valores de espessura, peso próprio e flechas total e admissível para a laje mais solicitada do pavimento tipo, a qual tem dimensões de 10,40 m x 6,70 m. O peso próprio é menor no sistema de lajes nervuradas porque há uma diminuição do volume de concreto na estrutura através da substituição de parte do concreto da região tracionada por materiais inertes sem função estrutural e de menor peso específico. Entre as lajes nervuradas, aquelas que apresentaram os menores valores de pesos próprios foram as que se utilizam de material de enchimento de menor peso específico como o EPS e o polipropileno. O peso próprio da laje é muito importante do ponto de vista estrutural e, conseqüentemente, econômico, uma vez que lajes mais leves transmitem menos cargas para os elementos estruturais de apoio, implicando em uma economia de material resistente na estrutura conforme se verá adiante na análise de custo. As flechas totais foram calculadas a partir das flechas imediatas obtidas do software considerando um coeficiente de fluência igual a 1,46, ou seja, considera-se que o carregamento de longa duração iniciar-se-á após 0,5 mês segundo a Tabela 17.1 do item 17.3.2.1.2 da NBR 6118/2003.

Na [Tabela 1](#) observa-se que a flecha total da laje mais solicitada do pavimento tipo no sistema convencional de lajes maciças encontra-se acima do limite de flecha admissível e,

segundo a tabela 13.2 do item 13.3 da NBR 6118/2003, para suprir essa deformação pode ser dada uma contraflecha máxima de 14,29 mm. Sendo assim, a contraflecha de 0,96 mm (20,96 mm – 20,00 mm) necessária para atender a situação de deformação excessiva é menor do que a contraflecha máxima permitida de 14,29 mm, ou seja, atende aos requisitos da norma.

Sistema construtivo	Espessura da laje (cm)	Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	Flecha total (mm)	Flecha admissível (mm)
LM	15	3,75	20,96	20
LN1	20	2,80	13,87	
LN2	20	2,13	12,99	
LN3	20	2,11	12,84	

Tabela 1 – Espessura, peso próprio e flechas totais e admissíveis.

Na **Tabela 2** encontram-se os valores de momentos fletores máximos, bem como o esforço cortante máximo na laje mais solicitada do pavimento tipo para os modelos estruturais analisados. Foram analisados os esforços tanto na direção *x* quanto na direção *y*, e constatou-se que os esforços eram maiores na direção *y*, pois existe uma carga linearmente distribuída de parede atuando nesta direção da laje. Sendo assim, os esforços da **Tabela 2** representam os esforços de dimensionamento na direção *y* da laje estudada.

Sistema construtivo	Momento fletor máximo positivo (kN.m/m)	Momento fletor máximo negativo (kN.m/m)	Cortante máximo (kN/m)
LM	19,03	29,73	44,44
LN1	14,54	22,76	36,44
LN2	13,55	21,04	21,50
LN3	13,30	21,00	20,81

Tabela 2 – Momentos fletores máximos e cortante máximo na laje mais solicitada do pavimento tipo.

Na **Figura 6** tem-se um gráfico em barras dos valores dos momentos fletores máximos positivos, os quais são responsáveis pelo dimensionamento das armaduras que resistem aos esforços de tração na parte inferior da laje. Observa-se que as lajes de maiores pesos próprios estão submetidas aos maiores carregamentos e, conseqüentemente, resultam em esforços mais elevados. Assim como para as flechas, o sistema de laje maciça apresentou os maiores momentos fletores seguido, respectivamente, das lajes nervuradas com enchimento de tijolo cerâmico, EPS e polipropileno. O sistema estrutural de laje nervurada com enchimento de polipropileno apresentou uma redução de 30,11 % no momento fletor máximo positivo em relação ao sistema de laje maciça.

O gráfico em barras da **Figura 7** mostra os valores dos momentos fletores máximos negativos para os quatro modelos estruturais analisados, onde estes esforços são utilizados para o dimensionamento das armaduras superiores nas regiões de engaste das lajes. O sistema com laje maciça apresentou o maior valor de momento fletor negativo com 29,73 kN.m/m, enquanto que o sistema de laje nervurada com caixotes reaproveitáveis de polipropileno apresentou o menor valor de 21,00 kN.m/m, representando uma redução no momento fletor



negativo de 29,36 %.

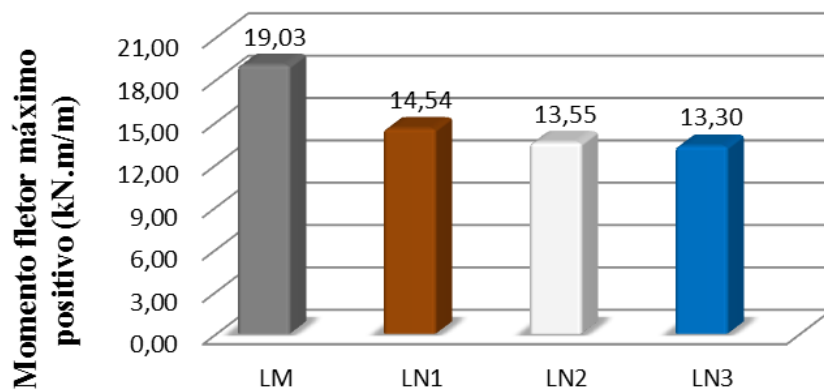


Figura 6 – Momentos flectores máximos positivos na laje L22 do pavimento tipo.

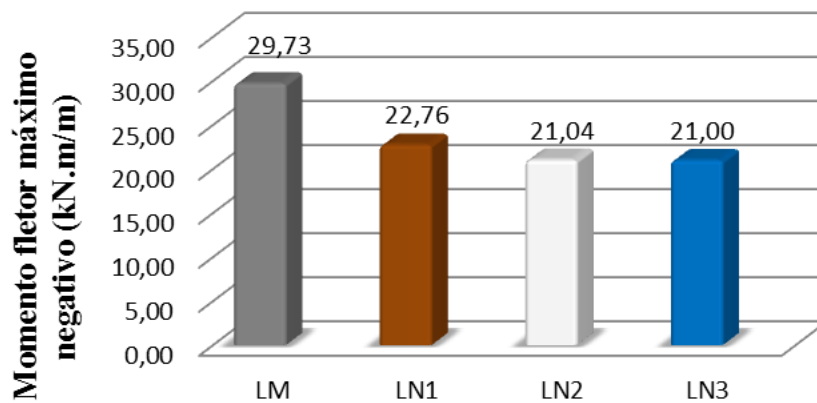


Figura 7 – Momentos flectores máximos negativos na laje L22 do pavimento tipo.

Com relação aos esforços cortantes máximos na laje estudada, a [Figura 8](#) mostra que, assim como nos demais parâmetros estruturais analisados anteriormente, o sistema estrutural de laje maciça apresenta o maior valor de cortante com 44,44 kN/m e o sistema de laje nervurada com caixotes reaproveitáveis de polipropileno obteve o menor valor com 20,81 kN/m, ou seja, no mesmo pano de laje houve uma redução de 53,17 % do esforço cortante somente empregando sistemas estruturais diferentes.

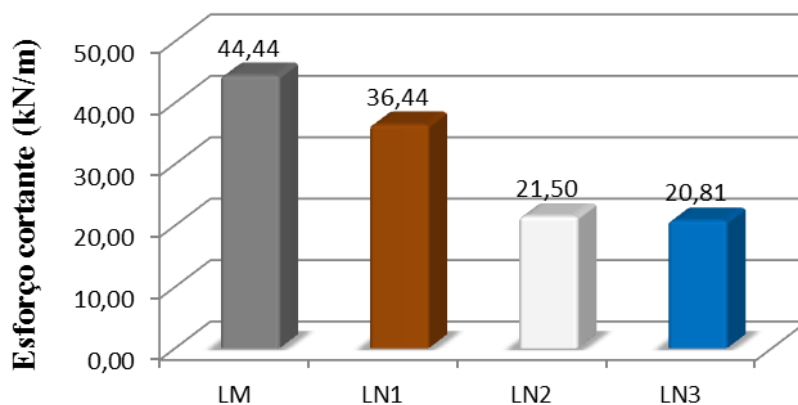


Figura 8 – Esforço cortante máximo na laje L22 do pavimento tipo.

## 5.2 Análise de Custo

### 5.2.1 Análise Comparativa da superestrutura do Flat

A [Tabela 3](#) mostra o consumo de materiais (fôrmas, concreto e aço) por metro quadrado da superestrutura (lajes, vigas e pilares) do Flat nos quatro modelos estruturais estudados.

O índice de fôrmas representa a razão entre a área de fôrma constante no projeto estrutural das lajes, vigas e pilares e a superfície total do pavimento considerado. Observa-se na [Tabela 3](#) que o índice de fôrmas é igual para todos os sistemas de lajes nervuradas, pois se considera o uso do assoalho que serve de apoio para a execução das lajes e as seções transversais das vigas e pilares iguais em todos estes modelos. Contudo no modelo de lajes nervuradas ocorre uma redução da área necessária de fôrmas laterais de algumas vigas, pois a espessura da laje é maior, o que explica o porquê da inferioridade no índice de fôrmas em relação ao sistema de laje maciça. O menor valor de peso próprio no sistema estrutural de lajes nervuradas em relação ao sistema de laje maciça implica em um menor valor total de carga atuando nas lajes, as quais transferem menos cargas para os elementos de apoio como vigas e pilares e, conseqüentemente, necessitam de menor quantidade de material para resistir aos esforços solicitantes. Este fato explica o porquê das reduções nos consumos de concreto e armadura nos sistemas estruturais de lajes nervuradas em relação ao de laje maciça.

Sistema estrutural	Índice de fôrmas (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Consumo de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Taxa de aço (kg/m <sup>2</sup> )
LM	1,773	0,193	13,797
LN1	1,719	0,159	11,910
LN2	1,719	0,159	11,173
LN3	1,719	0,162	11,153

Tabela 3 – Consumo de fôrma, concreto e aço da superestrutura do flat.

Na [Tabela 4](#) estão os custos totais de fôrmas, materiais de enchimento, concreto e armadura da superestrutura em função do sistema estrutural adotado. Observa-se que todas as alternativas estruturais de lajes nervuradas apresentaram o mesmo custo de fôrmas, pois todos estes modelos têm os mesmos índices de fôrmas, como também o custo apresentado pelo modelo de laje maciça é maior porque seu índice de fôrmas é maior.

Sistema estrutural	Custo de fôrmas (R\$)	Custo de enchimento (R\$)	Custo de concreto (R\$)	Custo de armadura (R\$)
LM	148.097,04	-	253.405,38	273.365,63
LN1	143.140,93	33.178,63	208.502,16	252.149,11
LN2	143.140,93	40.612,52	208.044,30	238.157,57
LN3	143.140,93	25.924,18	211.651,77	218.619,92

Tabela 4 – Custo total de fôrmas, concreto e armadura da superestrutura dos sistemas estruturais analisados.

Com relação ao material de enchimento sem função estrutural dos sistemas de lajes

nervuradas, o sistema estrutural com caixotes recuperáveis de polipropileno (com reaproveitamento de 15 vezes) apresentou o menor custo seguido, respectivamente, pelos de tijolos cerâmicos e blocos de EPS. A economia no uso do caixote de polipropileno chega a 36,17% (R\$ 14.688,34) em relação ao bloco de EPS.

O custo de concreto de toda a superestrutura é menor nas alternativas que se utilizam de lajes nervuradas. Embora o sistema de laje nervurada com caixote recuperável de polipropileno apresente o menor peso próprio dos modelos estudados, seu custo de concreto é maior do que os outros sistemas de lajes nervuradas. Uma vez que a geometria das “cubetas” de polipropileno utilizadas neste estudo (Atex 150) favorece um maior consumo de concreto em relação aos demais materiais de enchimento. Sendo assim, a laje nervurada com enchimento de EPS, que é o segundo modelo de menor peso próprio, apresentou o menor custo de concreto seguido, respectivamente, pelo sistema com material cerâmico, caixote de polipropileno e o sistema com laje maciça.

Na **Tabela 5** encontram-se os custos totais, de material e mão de obra da superestrutura para os quatro modelos estruturais analisados. Percebe-se a vantagem econômica devido ao menor custo de material e mão de obra dos sistemas que empregam lajes nervuradas. Observa-se que em todos os modelos estruturais o custo com materiais é maior do que o custo com mão de obra, onde o sistema com laje maciça apresentou o maior valor de custo com material e com mão de obra, enquanto o sistema de laje nervurada com caixotes recuperáveis de polipropileno apresentou os menores valores. Obteve-se uma economia de R\$ 61.707,43 (11,0%) e R\$ 13.823,81 (12,16%), respectivamente, no custo de material e mão de obra do sistema nervurado com enchimento de polipropileno em relação ao modelo com laje maciça.

Sistema estrutural	Custo com Material (R\$)	Custo com mão de obra (R\$)	Custo Total (R\$)
LM	561.215,65	113.652,39	674.868,04
LN1	532.095,22	104.875,62	636.970,83
LN2	527.922,25	102.033,07	629.955,32
LN3	499.508,22	99.828,58	599.336,80

Tabela 5 – Custo com material, mão de obra e total da superestrutura dos sistemas estruturais analisados.

A superestrutura que foi projetada no sistema estrutural de laje maciça apresentou o maior valor de custo com R\$ 674.868,04, enquanto que a dimensionada com enchimento de caixote reaproveitável de polipropileno obteve o menor valor de custo com R\$ 599.336,80, o que representa uma economia de R\$ 75.531,24 (11,19%).

### 5.2.2 Análise Comparativa das fundações

Devido às diferenças existentes entre os pesos totais das estruturas adotadas, as cargas transmitidas ao solo através das sapatas da fundação também são diferentes. Isto acarreta num consumo de material e mão de obra para a execução da fundação diferente entre os sistemas estudados.

Na **Tabela 6** têm-se os quantitativos de fôrmas, armadura e concreto empregados na execução das sapatas da fundação para todos os modelos estruturais analisados. Observa-se que o quantitativo de materiais diminui à medida que se reduzem os pesos totais transmitidos à infraestrutura através da superestrutura, ou seja, ocorre um maior consumo de materiais nas

fundações dos sistemas estruturais projetados com lajes maciças seguidas, respectivamente, pelos sistemas de lajes nervuradas com enchimento de tijolo cerâmico, bloco de EPS e caixotes recuperáveis de polipropileno.

Sistema estrutural	Fôrmas (m <sup>2</sup> )	Armadura (kg)	Volume de concreto (m <sup>3</sup> )
LM	166,45 [ - ]	2.522,98 [ - ]	43,15 [ - ]
LN1	165,09 [0,81%]	2.439,69 [3,30%]	41,35 [4,17%]
LN2	164,22 [1,34%]	2.062,45 [18,25%]	39,87 [7,60%]
LN3	164,01 [1,46%]	2.036,55 [19,28%]	39,69 [8,01%]

Tabela 6 – Quantitativo de fôrmas, armadura e concreto das fundações, e redução percentual em relação ao sistema de laje maciça.

Percebe-se a forte influência que a redução do peso próprio nos pavimentos dos sistemas de lajes nervuradas exerce no consumo de armadura em relação ao sistema de laje maciça, principalmente nas que utilizam EPS e polipropileno como materiais de enchimento, em que a redução atingiu, respectivamente, 18,25% e 19,28%.

Com relação à redução do volume de concreto em relação ao modelo de laje maciça destacam-se as reduções de 7,60% e 8,01% obtidas, respectivamente, nos sistemas de lajes nervuradas com enchimento de EPS e polipropileno. As reduções nos consumos de fôrmas dos modelos de lajes nervuradas em relação ao modelo de laje maciça não foram muito significativas, todavia a laje nervurada com enchimento de polipropileno obteve o melhor resultado com 1,46%.

Na Tabela 7 têm-se os valores de custos de material, mão de obra e totais das fundações para os modelos estruturais estudados. As reduções dos consumos de materiais nos sistemas de lajes nervuradas implicam em reduções de custos tanto de material quanto de mão de obra. Observa-se que a fundação mais atraente do ponto de vista econômico é aquela cuja superestrutura fora executada no sistema de laje nervurada com enchimento de polipropileno.

Destacam-se as reduções de 11,95% (R\$ 3.276,34) no custo de material, 10,98% (R\$ 1.073,24) no custo de mão de obra e 11,70% (R\$ 4.349,58) no custo total da fundação obtida com o emprego do sistema de laje nervurada com enchimento reaproveitável de polipropileno. Também é importante destacar as reduções obtidas com o emprego do sistema estrutural de laje nervurada com enchimento de EPS em relação ao modelo de laje maciça.

Sistema estrutural	Custo total de material (R\$)	Custo total de mão de obra (R\$)	Custo Total (R\$)
LM	27.407,58 [ - ]	9.773,60 [ - ]	37.181,18
LN1	26.391,79 [3,71%]	9.500,33 [2,80%]	35.892,13 [3,47%]
LN2	24.302,10 [11,33%]	8.758,66 [10,38%]	33.060,76 [11,08%]
LN3	24.131,24 [11,95%]	8.700,36 [10,98%]	32.831,60 [11,70%]

Tabela 7 – Custo de material, mão de obra e total das fundações, e redução percentual em relação ao sistema de laje maciça.

## 6 CONCLUSÕES

As lajes desempenham importantes funções nas estruturas dos edifícios, além de serem responsáveis pelo consumo de elevada parcela do volume total de concreto utilizado. Portanto, a escolha de um sistema estrutural do pavimento de uma edificação deve sempre ser feita analisando-se aspectos econômicos, de funcionamento, de execução, e os relacionados à interação com os demais subsistemas da edificação. Diante disto, busca-se a solução economicamente mais viável, influenciada por diversos fatores, salientando-se que, na composição dos custos, devem ser incluídos fatores tais como mão de obra, tempo de execução, equipamentos, materiais necessários e a reutilização das fôrmas.

O sistema com o melhor desempenho do ponto de vista da análise estrutural é aquele constituído por lajes nervuradas executadas com polipropileno reaproveitável, uma vez que não adiciona carga permanente na estrutura como nos outros tipos de materiais de enchimento. Este sistema obteve as maiores reduções, na laje mais solicitada do pavimento tipo, de peso próprio (43,73%), flecha total (38,74%), momento fletor positivo (30,11%), momento fletor negativo (29,26%) e esforço cortante máximo (53,17%) em relação ao sistema estrutural constituído por lajes maciças.

O sistema estrutural mais econômico é aquele constituído por lajes nervuradas executadas com caixotes reaproveitáveis de polipropileno, em função, especialmente, do baixo consumo de material e mão de obra em relação aos outros modelos analisados. Neste caso, foi possível obter uma economia de R\$ 79.880,82 (aproximadamente 11,22%) no custo total da obra em relação ao sistema estrutural constituído por lajes maciças.

Este trabalho revela a importância e as vantagens do uso do programa de dimensionamento estrutural CYPECAD, podendo-se citar: a rapidez no processamento de informações; a realização de cálculos e detalhamentos de diferentes concepções estruturais que modelam determinada estrutura, o que torna possível análises e comparações de diferentes soluções; permite a procura de soluções mais confiáveis e arrojadas com rapidez e agilidade na modificação de projetos.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 221p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira. *Forças devidas ao vento em edificações*, NBR 6123. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira. *Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimentos*, NBR 15421. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- Alonso, U. R., *Exercícios de fundações*. São Paulo, Ed. Blucher, 2a ed., 2010, 203 p.
- Araújo, A. da R., *Estudo Técnico comparativo entre pavimentos executados com lajes nervuradas e lajes convencionais*. 2008. 150 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.
- Bocchi Jr., C. F., Giongo, J. S., *Concreto armado: projeto e construção de lajes nervuradas*. Universidade de São Carlos, São Carlos, 2010.
- Franca, A.B.M., Fusco, P.B., *As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios*. São Paulo, AFALA & ABRAPEX, 1997.
- PINI. TCPO: *Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos*. São Paulo, Ed. Pini, 13a ed., 2008.
- <http://cypecad.multipius.com/>