

Pavimentos de edifícios de concreto protendido

Prestressed concrete building floors



F. M. Almeida Filho ^a
ffilho@sc.usp.br
M. R. S. Corrêa ^b
mcorrea@sc.usp.br
M.A. Ramalho ^c
ramalho@sc.usp.br

Abstract

The present work deals with the use of the prestressed concrete, bonded and unbonded, for residential buildings, pointing out aspects such as consumption of materials, construction time and structural performance. Three different structural systems are considered: flat plate and columns; waffle slab and columns and waffle slab supported by prestressed strip beams and columns. The studied structural systems are analyzed by the structural analysis program TQS[®], using the so-called grillage analogy method. Initially, a numerical simulation is carried out in order to evaluate the behavior of an experimental model. After, a residential building floor case analysis is carried out, considering the different structural systems afore mentioned, adopting both bonded and unbonded tendons. After several considerations based on the obtained results one can say that the unbonded prestressed waffle slab on columns seems to be the most interesting system for this case.

Keywords: Prestressed concrete; structural system; materials consumption; unbonded prestress; bonded prestress.

Resumo

O presente trabalho aborda a utilização da protensão aderente e não-aderente em edifícios residenciais de concreto, com destaque para aspectos referentes ao consumo de materiais, tempo de execução e desempenho estrutural. São considerados três diferentes arranjos estruturais: laje plana maciça sobre pilares; laje plana nervurada sobre pilares e laje nervurada apoiada em vigas-faixa protendidas sobre pilares. As estruturas são analisadas com o programa TQS[®], utilizando-se a "analogia de grelha". Inicialmente, é apresentada uma simulação numérica de um protótipo experimental em laje protendida, mostrando a adequação da simulação numérica adotada ao comportamento dos pavimentos estudados. Posteriormente, é estudado um caso de um pavimento de edifício residencial, considerando-se os três arranjos estruturais mencionados e ainda a protensão aderente e não-aderente. Com os resultados obtidos são feitas diversas considerações que levam à conclusão que, de forma geral, a laje nervurada sobre pilares com protensão não-aderente parece ser o sistema construtivo mais interessante.

Palavras-chave: Concreto protendido; Arranjos estruturais; Consumo de materiais; Protensão não-aderente; Protensão aderente.

^{a,b,c} Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 13566-590, São Carlos, Brasil

1 Introdução

O concreto, desde sua criação, tem sido amplamente utilizado na construção civil e o advento da protensão tornou esse material ainda mais atraente para diversos sistemas estruturais. Dentre as suas principais vantagens técnicas e econômicas pode-se destacar:

- Viabilidade de grandes vãos e redução de alturas de componentes fletidos, tornando as estruturas mais leves e assim aliviando também o peso próprio a ser suportado pelas fundações;
- Melhoria das condições de utilização das estruturas devido à redução das fissuras no concreto ou limitação de suas aberturas, aumentando assim a sua proteção quanto à agressividade do meio ambiente;
- Maior possibilidade de recuperação da estrutura após um excesso não previsto de carregamento, com o fechamento de algumas eventuais fissuras após a descarga.

Nos anos 50 surgiu a primeira patente de protensão, que utilizava bainhas individuais de plástico extrudadas. Com isso, as soluções estruturais puderam ser melhoradas, com a redução na espessura média dos pavimentos, diminuição da altura total da edificação e incremento da velocidade no processo de execução. Todas essas condições levaram a reduções no custo total da obra, tornando este tipo de solução estrutural uma das escolhas mais interessantes para o projeto de edifícios.

No presente trabalho apresenta-se um estudo do aspecto estrutural da utilização da protensão em pavimentos de edifícios e para tanto se utiliza um procedimento de análise relativamente simples: o Método da Grelha Equivalente.

São avaliados pisos de edifícios em três arranjos estruturais bastante frequentes:

- Laje plana maciça protendida apoiada sobre pilares;
- Laje plana nervurada protendida apoiada em pilares.
- Laje nervurada sem protensão apoiadas sobre vigas-faixa protendidas e pilares;

O estudo envolve a adequação do sistema à geometria do pavimento, aproveitando-se os casos estudados para também comparar as soluções com protensão aderente e não-aderente. Justifica-se a importância deste trabalho pela crescente utilização da protensão não-aderente em pavimentos de edifícios e ainda pela reduzida divulgação do assunto no país, em especial no que se refere às suas possíveis vantagens econômicas.

2 Simulação numérica de laje plana protendida

Foi realizada uma análise numérica comparativa de um modelo experimental de uma laje plana protendida apresentado por Scordelis [1], Figura 1. A simulação foi feita admitindo-se para o modelo numérico um comportamento elástico-linear, condição justificável pelo fato do concreto, nesse tipo de estrutura, permanecer a maior parte da sua vida útil no Estádio I.

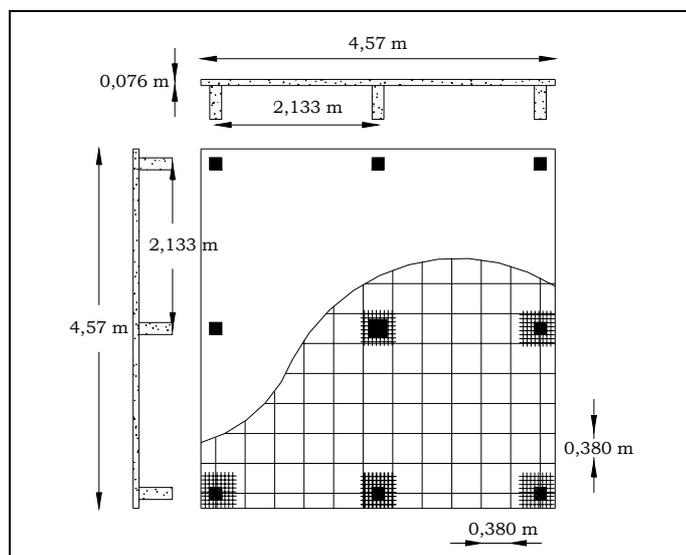


Figura 1 - Modelo experimental estudado (Scordelis [1]).

O objetivo dessa análise foi verificar a acuidade do modelo de grelha equivalente na representação de uma laje protendida em serviço, sendo tal verificação conveniente porque esse foi o procedimento numérico utilizado em todas as análises subsequentes. A escolha desse procedimento se justifica porque o programa adotado para a análise, o TQS[®], apresenta os quantitativos de materiais utilizados, considera automaticamente a influência da protensão e ainda executa de forma eficiente o detalhamento da estrutura.

A ação equivalente de protensão foi calculada segundo o método de Lin [2] para balanceamento de cargas, aplicando-as como forças concentradas nos pontos de interseção dos cabos.

A equação (1) mostra a ação equivalente proposta por Lin [2] para sistemas bidirecionais. Ela incorpora as forças de protensão nas duas direções que equilibram a ação q , parcela do carregamento distribuído por unidade de área a ser equilibrado.

$$q = \frac{8 \cdot P_x \cdot e_x}{L_x^2} + \frac{8 \cdot P_y \cdot e_y}{L_y^2} \quad (1)$$

Ainda na equação (1), P_x e P_y correspondem às forças de protensão, nas direções x e y , por unidade de comprimento. Os valores e_x e e_y correspondem às distâncias do cabo em relação à superfície média da laje nas direções x e y , respectivamente. L_x e L_y correspondem aos comprimentos dos trechos parabólicos do cabo nas direções x e y , respectivamente.

A Figura 2 mostra a disposição dos cabos parabólicos na laje plana ensaiada e ainda a esquematização das componentes das cargas balanceadas.

Para o balanceamento das cargas, calculou-se o valor das componentes referentes à protensão de forma a se determinar o valor das forças nas intersecções dos cabos.

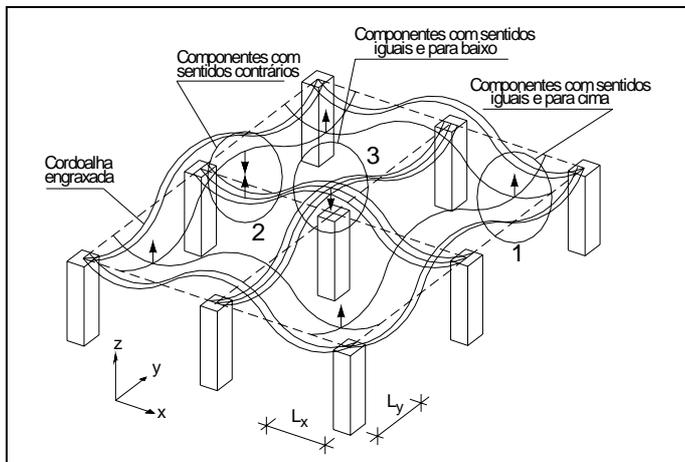


Figura 2 - Perfis de cabos parabólicos em lajes protendidas contínuas.

Tomando-se o perfil da cordoalha, ilustrado na Figura 3, Scordelis [1], pode-se calcular as forças nas interseções dos cabos. Ressalta-se que as unidades aqui adotadas são as mesmas do trabalho original.

$P = 6840.0 \text{ Lb}; e = 1.0 \text{ in.}$
 $S = 15 \text{ in. (spacing between tendons)}$
 $L_1 = 66 \text{ in.}; L_2 = 48 \text{ in.}$

Then:

$$q_1 = \frac{8 \cdot 6840 \text{ (lb)} \cdot 1 \text{ (in.)}}{66^2 \text{ (in.)}^2} = 12,562 \text{ lb / in.}$$

$$q_2 = -\frac{8 \cdot 6840 \text{ (lb)} \cdot 1 \text{ (in.)}}{48^2 \text{ (in.)}^2} = -23,75 \text{ lb / in.}$$

$q_1 = W_{bal1} = \text{força distribuída para cima};$
 $q_2 = W_{bal2} = \text{força distribuída para baixo}.$

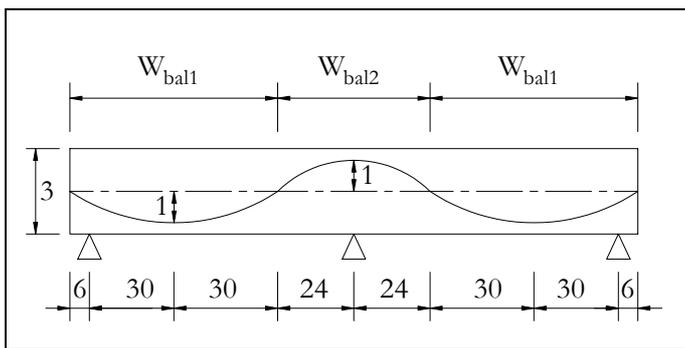


Figura 3 - Perfil da cordoalha (in).

A Figura 4 ilustra as três possíveis situações para o cálculo das forças que surgem nas interseções dos cabos parabólicos, sendo o comprimento L a distância entre os pontos nodais.

Assim, os valores das forças nodais para as interseções dos cabos resultam:

$W_1 = 376,86 \text{ lb}$
 $W_2 = -167,82 \text{ lb.}$
 $W_3 = -712,50 \text{ lb.}$

Em que W_1 , W_2 e W_3 são as forças equivalentes de protensão para as regiões 1, 2 e 3, respectivamente, mostradas na Figura 2.

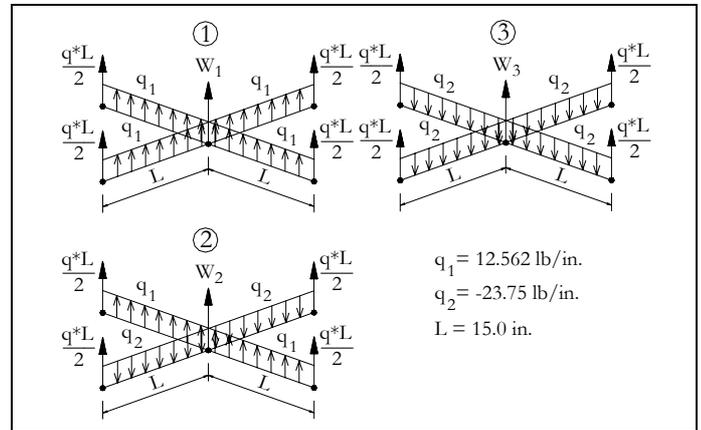


Figura 4 - Esquema de forças nodais nas interseções dos cabos.

O método de Lin [2] baseia-se no princípio de que a protensão pode ser entendida como uma ação que equilibra parte do carregamento de uma estrutura em serviço, o que explica a sua denominação "ação equivalente de protensão". Assim, uma estrutura sob essa condição pode ser considerada sem protensão, mas com uma redução de carregamento transversal que é devida a essa pré-compressão introduzida pela protensão. Dessa forma, a protensão pode ser projetada para equilibrar parte da carga, ou combinação de carga, de tal maneira que as tensões de tração na peça sejam anuladas ou significativamente reduzidas.

De acordo com Aalami [3], o balanceamento de carga é o principal método de análise de estruturas de concreto protendido. Esse procedimento é ainda extremamente vantajoso no cálculo de sistemas estaticamente indeterminados porque, mesmo neste caso, mantém a sua simplicidade.

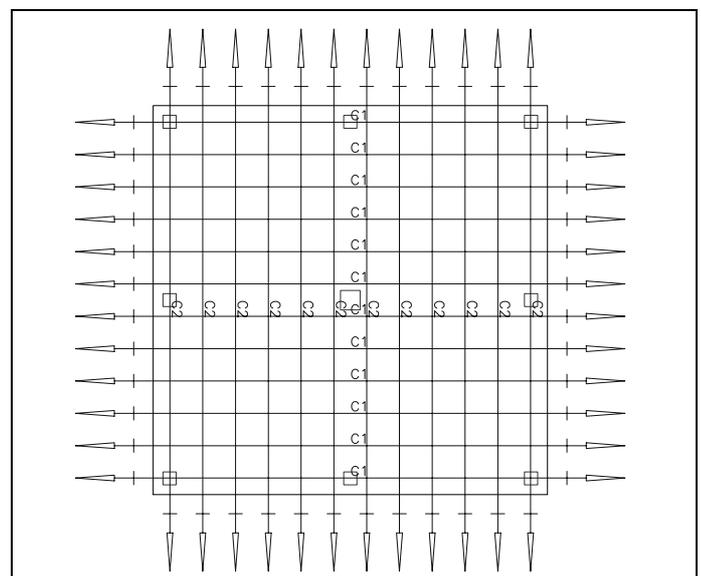


Figura 5 - Disposição dos cabos para o modelo de grelha.

A Figura 5 mostra a disposição dos cabos no modelo experimental, que foi também a adotada na modelagem por analogia de grelha.

Para a modelagem numérica do exemplo em questão, foram considerados os mesmos carregamentos e as mesmas características do concreto, apresentados pelos autores do trabalho experimental.

Para o concreto adotou-se:

- Coeficiente de Poisson = 0,14;
- Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_c) = 2413 kN/cm²;
- Módulo de Elasticidade Transversal (G_c) = 965 kN/cm².

Para o aço, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Limite de escoamento = 1533 kN/cm²;
- Limite de ruptura = 1744 kN/cm²;
- Módulo de elasticidade longitudinal (E_p) = 20670 kN/cm²;
- Área da seção do cabo (A_s) = 0,32 cm²

Na Tabela 1 apresentam-se os deslocamentos máximos no ponto central da laje. Nessa tabela, o carregamento 1 corresponde apenas à força de protensão aplicada no modelo, o carregamento 2 equivale ao limite de fissuração igual a $9,6 \cdot 10^{-4}$ kN/cm² e o carregamento 3 à ação vertical distribuída igual a $1,7 \cdot 10^{-3}$ kN/cm², representando a ruptura do modelo.

Tabela 1 - Deslocamentos para os modelos numérico e experimental (em centímetros).

Carregamento	Exp.	Numérico
1	-0,11	-0,08
2	0,12	0,13
3	0,39	0,28

A modelagem numérica com o programa TQS® apresentou bons resultados, com diferenças da ordem de 9 % com relação ao modelo experimental na fase elástica, revelando uma acuidade adequada para as análises a serem realizadas no presente trabalho. Com relação ao carregamento de ruptura, que não constitui objetivo deste trabalho avaliar, a diferença foi de 29 %, mostrando um maior afastamento entre os resultados experimentais e numéricos. Essa diferença era já esperada, pois a simulação numérica é um procedimento apenas linear e, após a fissuração, o comportamento do modelo experimental é tipicamente não-linear.

Dos resultados obtidos no exemplo pode-se concluir que o procedimento da grelha equivalente é suficientemente preciso para as análises a serem realizadas. Entretanto, para análise de efeitos localizados, pode ser requerida uma discretização mais refinada.

3 Exemplo de pavimento para estudo

Para o presente estudo de caso, foi tomado como exemplo um pavimento de edifício residencial anteriormente analisado por Albuquerque [4] num trabalho que apresentava uma análise semelhante ao estudo aqui realizado, porém, com o enfoque voltado para estruturas em concreto armado.

Na Figura 6 ilustra-se a planta baixa de arquitetura do pavimento tipo da edificação. É um edifício residencial com 20 pavimentos de 254m² de área. A modelagem numérica foi realizada de acordo com os parâmetros discutidos no item anterior, ou seja, análise por grelha equivalente com a utilização do programa TQS®.

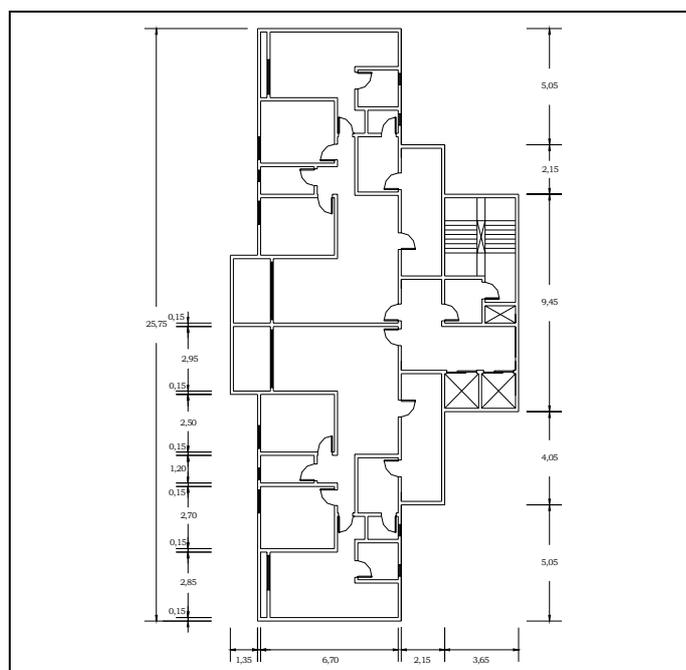


Figura 6 - Pavimento tipo (Albuquerque [4]).

4 Arranjos estruturais analisados

Para as comparações pretendidas, foram adotados seis arranjos estruturais em concreto protendido, três com protensão aderente e três com protensão não-aderente. A descrição geral de suas características é dada na tabela 2.

Tabela 2 - Arranjos estruturais analisados.

Arranjo	Descrição
E01	Laje plana maciça com protensão não-aderente.
E02	Laje plana maciça com protensão aderente.
E03	Laje plana nervurada com protensão não-aderente.
E04	Laje plana nervurada com protensão aderente.
E05	Laje plana nervurada com vigas-faixa com protensão não-aderente.
E06	Laje plana nervurada com vigas-faixa com protensão aderente.

Maiores detalhes sobre esses arranjos são fornecidos nos itens seguintes. Entretanto, ressalta-se que para todos os casos de lajes nervuradas analisadas, as nervuras têm as seguintes características: espessura média igual a 7cm, altura total de 25cm (4cm de capa) e distância entre eixos igual a 60cm.

Como os pavimentos são lajes planas, mesmo no caso dos arranjos em vigas-faixa, existem poucos pórticos na

estrutura de contraventamento, que, entretanto, apresenta rigidez adequada como se pode verificar na Tabela 4 e na Tabela .

4.1 Laje maciça protendida

Na Figura 7 pode-se ver a estrutura adotada para o pavimento, considerando-se ambos os sistemas de protensão: aderente e não-aderente. As lajes têm espessura de 16cm.

4.2 Laje nervurada protendida

A Figura 8 ilustra o segundo arranjo estrutural adotado, ressaltando-se que ele é válido tanto para a protensão aderente quanto para a protensão não-aderente. Foi adotada a razão vão/espessura igual a 30, o que resulta em uma laje com nervuras de 25 cm de altura.

4.3 Laje nervurada com vigas-faixa protendidas

Para este caso, apresentado na Figura 9, uma razão vão/espessura igual a 30 levaria a uma espessura da estrutura igual a 27 cm. Foi adotada uma espessura igual a 25 cm como tentativa inicial de pré-dimensionamento em função de sua adequação às fôrmas plásticas usualmente encontradas no mercado.

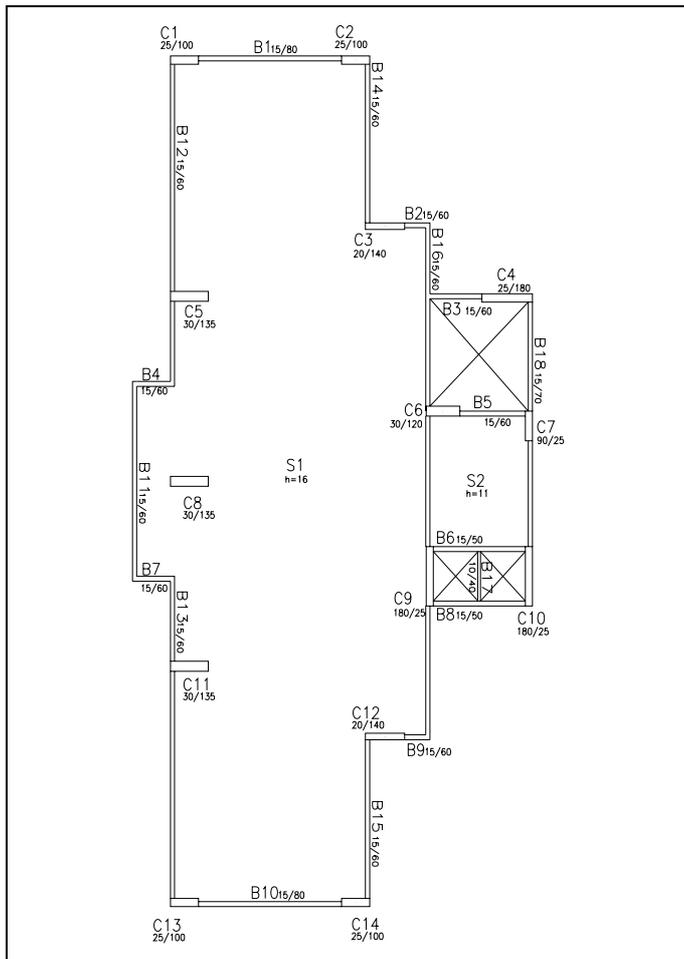


Figura 7 - Laje maciça protendida.

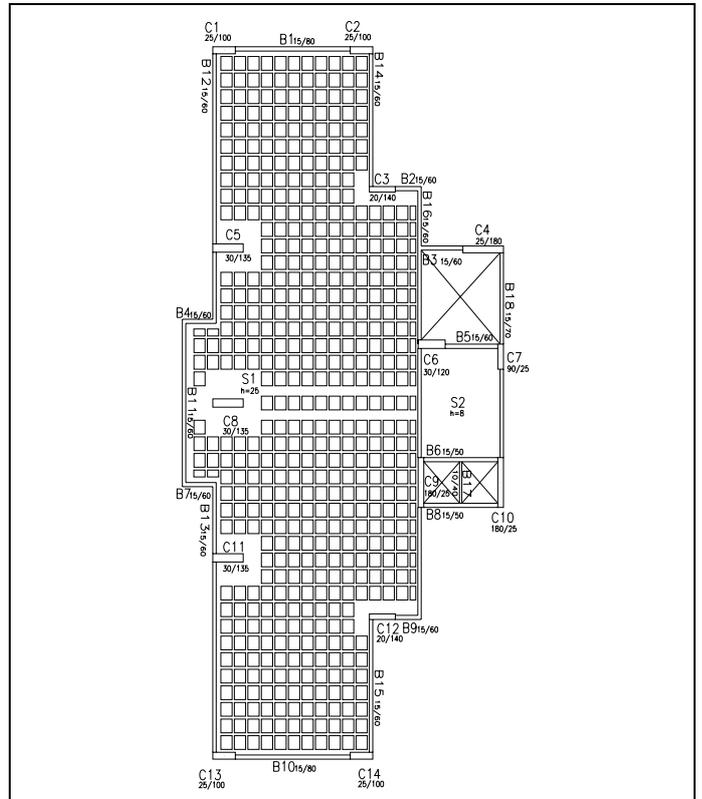


Figura 8 - Laje nervurada protendida.

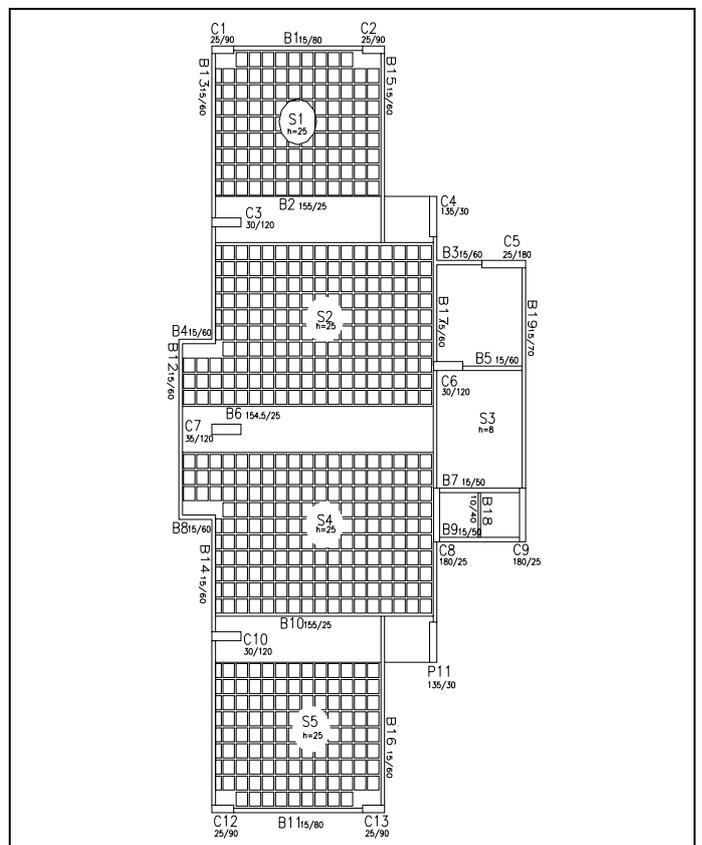


Figura 9 - Laje nervurada apoiada em vigas-faixa protendidas.

5 Análise comparativa para consumo de materiais

Da figura 10 à figura 13 apresentam-se gráficos com os consumos de materiais para as alternativas estruturais consideradas, o que permite estabelecer as devidas comparações.

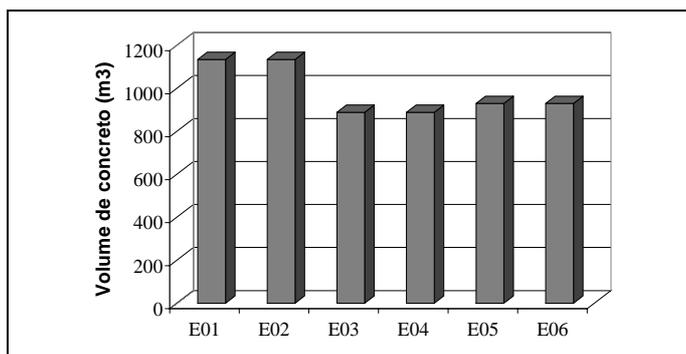


Figura 10 – Volume de Concreto.

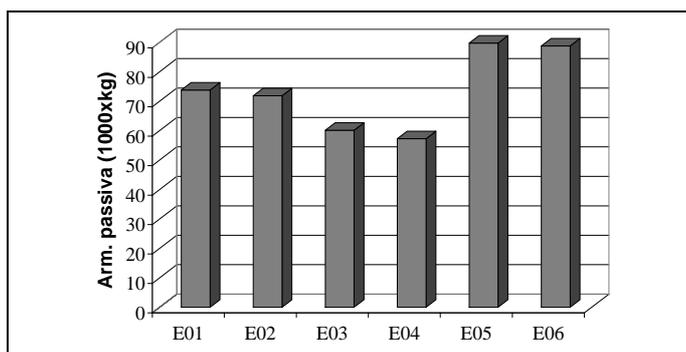


Figura 11 – Armadura Passiva.

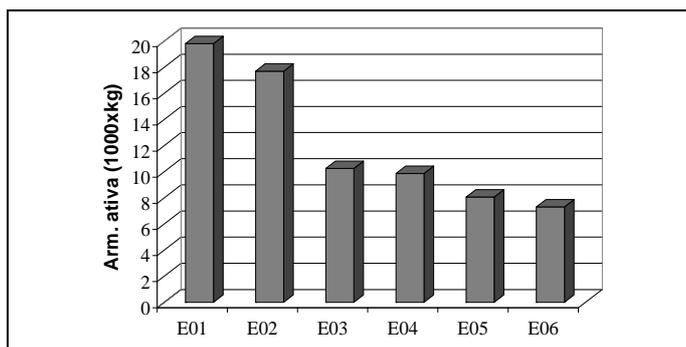


Figura 12 – Armadura Ativa.

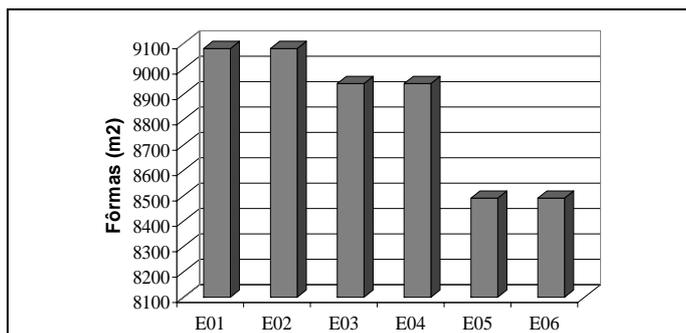


Figura 13 – Consumo de Fôrmas.

Em todas as comparações que são apresentadas a seguir é utilizado o mesmo procedimento: o valor base é o da alternativa que leva ao menor consumo, sendo os valores das demais a ele referenciados.

A figura 14 apresenta as diferenças para o consumo de concreto. Quanto a esse quesito, os arranjos em laje plana nervurada, E03 e E04, são um pouco mais econômicos que os em laje nervurada e vigas-faixa, E05 e E06, e significativamente mais econômicos que os em laje plana maciça, E01 e E02. Esses resultados não são diferentes daqueles que seriam obtidos sem a protensão e, portanto, eram já esperados.

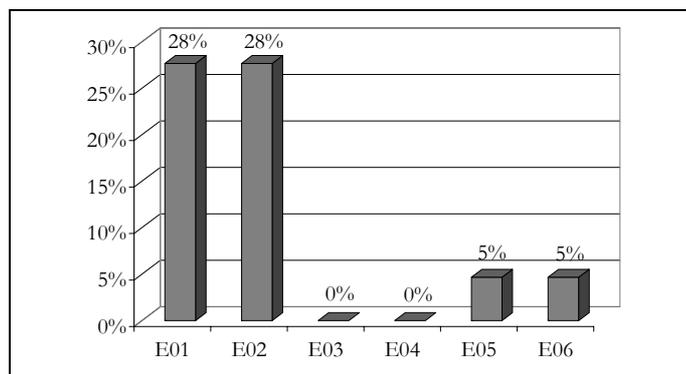


Figura 14 – Diferença de consumo de concreto.

Quanto ao consumo de armadura passiva, a figura 15 mostra as diferenças obtidas. Como valor base foi mais uma vez escolhido o arranjo que leva ao menor consumo, nesse caso o E04, laje nervurada com protensão aderente. Deve-se ressaltar que a diferença entre a protensão aderente e não-aderente não é muito significativa, representando apenas 5% a mais de consumo em cada caso. Claramente menos econômicas nesse quesito são as lajes nervradas com vigas-faixa: aproximadamente 50% a mais de consumo.

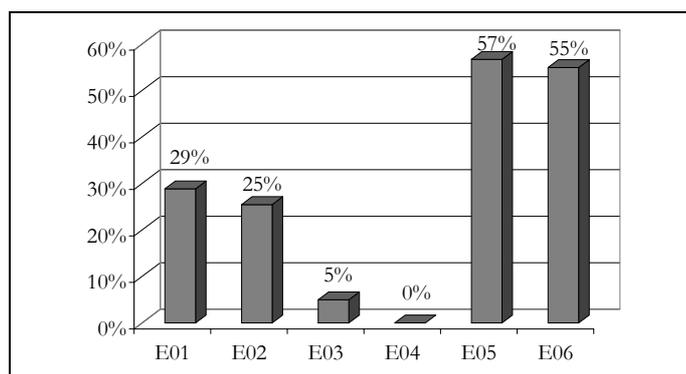


Figura 15 – Diferença de consumo de armadura passiva.

As diferenças de consumo de armaduras ativas são bastante significativas, conforme se pode verificar no gráfico da figura 16. Nesse caso os arranjos de lajes nervradas com vigas-faixa são os mais econômicos, podendo-se observar que os casos de lajes planas maciças apresentam um consumo bem maior nesse item. De forma semelhante ao que foi verificado para as armaduras passivas, a diferença entre os sistemas de protensão

aderente e não-aderente é relativamente pequena, entre 5% e 10% apenas para cada caso.

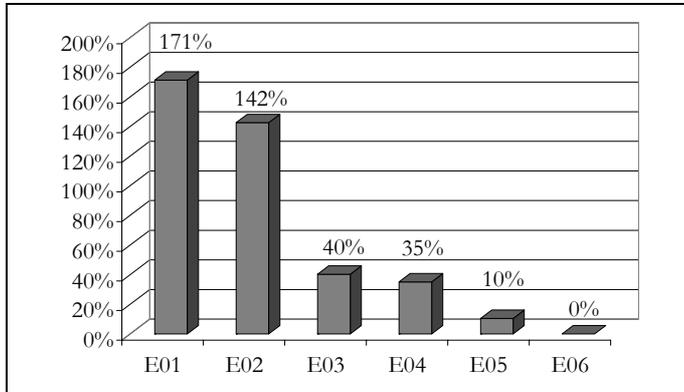


Figura 16 – Diferença de consumo de armadura ativa.

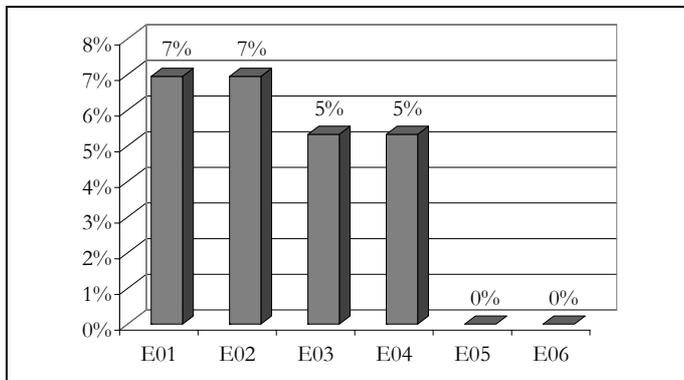


Figura 17 – Diferença de consumo de fôrmas.

Para o consumo de fôrmas, os valores obtidos para todos os arranjos estruturais são, obviamente, muito próximos uns dos outros. Conforme se pode verificar na figura 17, a máxima diferença obtida foi de 7%, sendo que, um parâmetro pouco significativo.

6 Tempo de execução

Neste item, procurar-se-á avaliar o tempo de execução previsto para os exemplos estudados. O interesse nesse aspecto pode ser explicado devido à sua relação direta com o custo da mão-de-obra empregada para a execução de cada uma das alternativas estudadas. Com relação a esse quesito, dois aspectos principais são enfocados: comparação entre os diferentes sistemas estruturais; laje plana maciça, laje plana nervurada com e sem vigas-faixa; e comparação entre protensão aderente e não-aderente.

De acordo com a experiência de diversos engenheiros de obra habituados à execução desse tipo de estrutura, e que foram consultados sobre essa questão, o tempo de execução para o pavimento considerado como exemplo pode ser estimado, em dias de serviço, de acordo com o que se apresenta na Tabela 3. Para essa avaliação tomou como base a atuação de uma equipe bem dimensionada e bem treinada, como as que são normalmente utilizadas pelas boas empresas construtoras.

Ressalta-se que não existem diferenças significativas para a execução das lajes nervuradas com ou sem vigas-faixa. Portanto, neste item serão mencionadas apenas as lajes

nervuradas, não importando se são apoiadas sobre pilares ou vigas-faixa.

Vale lembrar que os arranjos com laje nervurada demandam maior tempo de execução em função da montagem das formas para concretagem das nervuras.

Tabela 3 - Tempo (dias) para execução de um pavimento tipo.

Protensão	Aderente	Não-aderente
Laje Maciça	6	5
Laje Nervurada	7 a 8	6 a 7

Detalhes sobre essas avaliações são discutidos nos próximos dois subitens. É importante mencionar, entretanto, que essa discussão se dá em termos mais qualitativos que na avaliação sobre consumo de materiais. Infelizmente, neste quesito não é possível apresentarem-se dados realmente precisos, pois muitos são os fatores que podem influenciar essa avaliação dos tempos de execução, e como consequência os custos de mão-de-obra previstos para a produção dos diversos arranjos estruturais analisados.

6.1 Comparação entre os sistemas estruturais adotados

De um modo geral, as estruturas que demandam mais tempo para execução são aquelas que apresentam um grande número de vigas e pilares. Quanto a isso, os sistemas estruturais aqui analisados podem ser considerados interessantes, pois todos apresentam um número relativamente pequeno de vigas e pilares, sendo sua característica principal a utilização de lajes de dimensões relativamente grandes.

Entretanto, os sistemas em laje plana nervurada, sejam eles com ou sem vigas-faixa, apresentam uma desvantagem que pode ser considerada significativa em comparação com a laje plana maciça. Com relação ao processo construtivo, essas soluções em laje nervurada tornam-se mais trabalhosas devido às dificuldades encontradas no correto posicionamento das formas plásticas utilizadas para obtenção das nervuras e posterior montagem das armaduras. Ao contrário, a execução das lajes maciças acaba sendo bem mais simples, havendo apenas a necessidade do correto posicionamento das armaduras. De forma geral pode-se afirmar que as lajes planas nervuradas demandam 20% a mais de tempo em relação às lajes planas maciças.

6.2 Comparação entre protensão aderente e não-aderente

Com relação ao tempo de execução para os cabos com e sem aderência, pode-se comparar dois fatores: o tempo para posicionamento dos cabos na fôrma e o tempo necessário para alongamento do cabo.

De modo geral, as cordoalhas engraxadas apresentam maiores facilidades tanto para seu posicionamento na fôrma quanto para a posterior aplicação da protensão. A facilidade no posicionamento se explica porque as cordoalhas engraxadas são mais leves, não possuindo as bainhas metálicas que caracterizam a protensão com aderência. Além disso, a própria aplicação da protensão é facilitada

porque o macaco é muito mais leve, tornando mais fácil seu transporte e posicionamento.

A título de ilustração, pode-se mencionar que uma consulta feita ao catálogo da MAC, Sistema Brasileiro de Protensão, indicou que um macaco hidráulico para 4 cordoalhas aderentes pesaria cerca de 70 kgf, enquanto que o macaco hidráulico para protensão não-aderente pesa apenas cerca de 20 kgf.

Neste estudo foi constatado, junto a engenheiros com experiência em obras com protensão, que pavimentos usuais com protensão aderente requerem de 15% a 20% a mais de tempo de execução que os similares com protensão não-aderente. No caso do pavimento adotado como exemplo para as análises aqui realizadas isso representaria aproximadamente um dia a mais para a sua execução.

7 Avaliação do desempenho estrutural

Como critério simplificado de desempenho estrutural optou-se por adotar os deslocamentos máximos obtidos para cada arranjo estrutural considerado.

Para tanto foram calculados deslocamentos verticais que incluem uma estimativa dos acréscimos devidos à fissuração e à deformação lenta, cujos valores se encontram apresentados no gráfico da Figura 10. É importante ressaltar que esses valores são obtidos para o mesmo ponto em todos os arranjos e estão abaixo dos limites prescritos pela NBR 6118 [6].

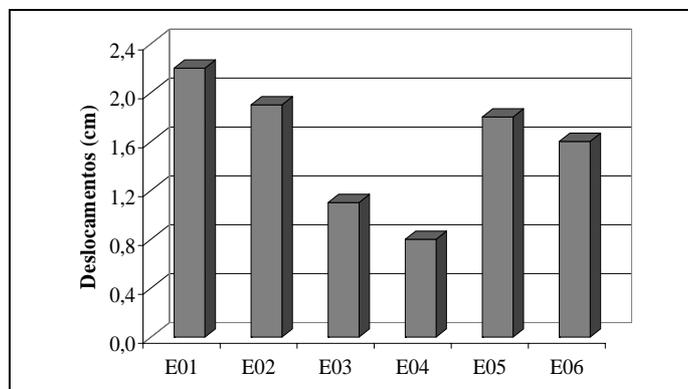


Figura 10 - Deslocamentos verticais máximos.

A Figura apresenta as diferenças obtidas entre os arranjos considerados, sendo que o valor básico adotado é o do arranjo E04, laje nervurada com protensão aderente, ou seja, o menor valor obtido. Observando-se o gráfico da Figura pode-se perceber que os arranjos em laje nervurada com vigas-faixa apresentam deslocamentos que são aproximadamente o dobro dos valores obtidos para as lajes nervradas sem vigas-faixa, sendo ainda um pouco piores os valores obtidos para as lajes maciças.

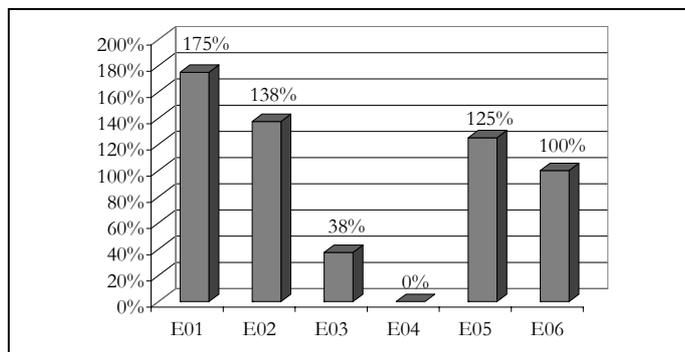


Figura 19 - Diferenças de deslocamentos verticais máximos.

Já para os deslocamentos horizontais, é feita uma estimativa dos valores obtidos para o topo da edificação, considerando-se de forma simplificada apenas os efeitos da fissuração. Os resultados obtidos para cada arranjo analisado são apresentados na Figura . Ressalta-se que para cada caso foi considerada a ação do vento segundo as direções X, maior dimensão em planta, e Y, menor dimensão em planta.

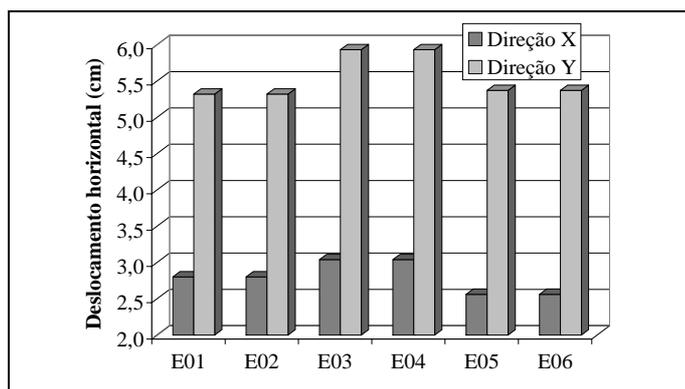


Figura 20 - Deslocamento horizontal nas direções X e Y.

Para se realizar a comparação entre os diversos sistemas construtivos analisados foi preparado o gráfico apresentado na Figura . Neste caso o valor básico adotado é o limite $H/500$, sendo H a altura total da edificação. Esse limite, adotado por alguns autores como o máximo deslocamento horizontal a ser admitido para o topo da edificação, deve ser visto com um certo cuidado, mas pode ser adotado para os simples propósitos de comparação deste trabalho.

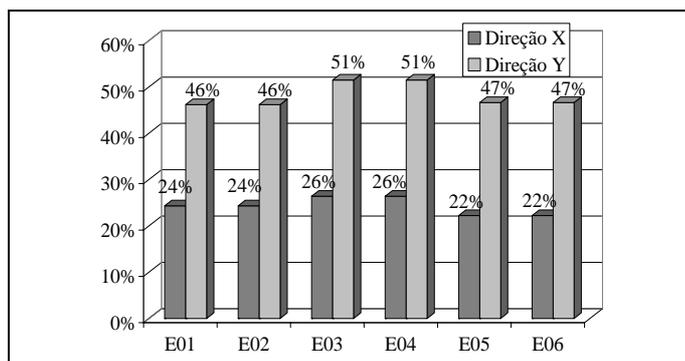


Figura 21 - Percentagem de deslocamento horizontal em relação ao valor $H/500$.

Observando-se a Figura percebe-se que o desempenho dos diversos arranjos é semelhante e não deve causar maiores preocupações. Mesmo na direção Y, a mais deformável, os valores obtidos estão na faixa de 50% do valor H/500. Outro detalhe a ser mencionado é que, neste caso, não há diferença entre a protensão aderente e não-aderente, pois os efeitos não-lineares relativos à fissuração foram considerados de forma simplificada de acordo com a NBR 6118 [6].

A Tabela 4 e a Tabela 5 ilustram os valores de γ_z e α para os arranjos estruturais em concreto protendido.

Assim, embora a estrutura global dos edifícios de cada arranjo estrutural fosse deformável pela falta de pórticos internos, o comportamento global de todos os exemplos foi satisfatório.

Tabela 4 - Parâmetros de instabilidade global – direção Y

	E01	E02	E03	E04	E05	E06
γ_z	1,17		1,17		1,14	
α	0,83		0,83		0,77	

Tabela 5 Parâmetros de instabilidade global – direção Y

	E01	E02	E03	E04	E05	E06
γ_z	1,17		1,17		1,14	
α	0,83		0,83		0,77	

8 Avaliação geral para os arranjos analisados

Para uma avaliação geral sobre a melhor solução, devem ser considerados os três fatores principais anteriormente mencionados: consumo de materiais, tempo de execução e desempenho estrutural.

Também nesta avaliação geral, de forma semelhante ao que havia sido feito no item sobre tempo de execução, dois aspectos principais são enfocados: comparação entre os diferentes arranjos estruturais; laje plana maciça, laje plana nervurada com e sem vigas-faixa; e comparação entre protensão aderente e não-aderente.

Inicialmente aborda-se o aspecto mais complexo, ou seja, a comparação entre os diferentes sistemas estruturais adotados. Dentro desse enfoque, analisando-se em primeiro lugar o consumo de materiais, verifica-se que as lajes nervuradas levam uma certa vantagem sobre a laje maciça. Principalmente no que diz respeito ao volume de concreto e utilização de armaduras ativas, essa vantagem torna-se bem evidente. Entretanto, essa vantagem é ainda mais evidente quando se considera a laje nervurada sem vigas-faixa, que apresenta o menor consumo em todos os itens avaliados.

Quanto ao tempo de execução a situação se inverte e sob esse ponto de vista a laje maciça é que apresenta uma clara vantagem sobre as lajes nervuradas. Isso obviamente se reflete num menor custo de mão-de-obra que, se não elimina a diferença obtida quanto ao consumo de materiais, pelo menos reduz significativamente essa desvantagem.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, pode-se perceber que os arranjos com protensão aderente são um pouco mais rígidos que aqueles que utilizam protensão não-

aderente, apresentando valores para os deslocamentos de 25% a 40% menores.

Finalmente, quanto ao desempenho estrutural, a laje nervurada sem vigas-faixa se destaca claramente quanto ao deslocamento vertical, produzindo pavimentos bem mais rígidos quanto a esse importante parâmetro. Já quando se consideram os deslocamentos horizontais do topo da edificação, todos os sistemas comportam-se de forma semelhante e satisfatória.

Portanto, num balanço geral sobre os três arranjos estruturais adotados, pode-se afirmar que a laje nervurada sem vigas-faixa parece ser o mais indicado para os casos usuais. Uma única dúvida que pode permanecer é quando a velocidade de execução ou o custo da mão-de-obra for realmente muito importante, de forma que se possa pensar na utilização das lajes planas maciças que apresentam um melhor desempenho exclusivamente sob esse aspecto.

Quanto à questão da protensão aderente ou não-aderente, as diferenças sobre o consumo de materiais não são muito significativas, diferenças essas que se restringem às armaduras passivas e ativas. Quando se fala, por exemplo, de lajes nervuradas, seja com ou sem as vigas-faixa, essa diferença se situa no patamar de 5% a 10%, com ligeira vantagem para a protensão aderente.

Situação diferente, se bem que mais acentuada, se verifica quando se discute o tempo de execução. Nesse caso, a protensão não-aderente é mais interessante que a protensão aderente, sendo as diferenças mais significativas que no caso anterior e situando-se na faixa de 15% a 20%. Como o tempo de execução se encontra diretamente relacionado ao custo da mão-de-obra, pode-se concluir que a protensão não-aderente apresenta uma certa vantagem em relação ao custo total, diferença que deve estar na faixa de 10% a 15% quando se considera o consumo de materiais e a mão-de-obra em conjunto.

Entretanto, quando se considera o desempenho estrutural, a protensão aderente releva-se mais interessante, obtendo-se deslocamentos verticais menores, sendo as diferenças da ordem de 25% a 40%. É importante verificar que essas diferenças se verificam nas parcelas correspondentes à deformação lenta e que, portanto, somente poderão ser avaliadas utilizando-se um procedimento não-linear de análise, ainda que de forma simplificada.

Assim, considerando-se então a questão do tipo da protensão a ser adotada, parece que a protensão não-aderente revela-se mais interessante, se bem que apresente deslocamentos verticais maiores quando se considera a deformação lenta. Mas, a menos que esse detalhe seja realmente muito importante para um determinado caso específico, a utilização da protensão não-aderente parece ser mais adequada aos casos usuais.

Portanto, de uma forma geral e respeitando-se condições particulares que possam ocorrer, a laje nervurada sem vigas-faixa com protensão não-aderente pode ser considerado o sistema estrutural que apresentou o melhor desempenho geral. Isso é o que se conclui quando se considera o pavimento tipo adotado neste estudo. Evidentemente, para outros casos com vãos

significativamente diferentes outras conclusões podem ser obtidas.

9 Conclusões

Neste estudo foram analisados seis sistemas estruturais diferentes, compreendendo arranjos em laje maciça, laje nervurada sem vigas-faixa e laje nervurada com vigas-faixa, todos considerados com protensão aderente e não-aderente.

De forma geral pode-se concluir que a laje nervurada sem vigas-faixa e com protensão não-aderente é o mais interessante quanto ao custo total, apresentando ainda bons indicadores quanto ao desempenho estrutural, de acordo com um critério simplificado de verificação de máximos valores obtidos para os deslocamentos, e também quanto ao tempo de execução.

Já o arranjo em laje plana maciça apresenta um consumo de materiais mais elevado e um desempenho estrutural pior que as lajes nervuradas. Apenas no quesito tempo de execução, e conseqüentemente custo da mão-de-obra, é que ele apresenta algumas vantagens.

Finalmente, na comparação entre protensão aderente e não-aderente, este último sistema parece ser mais interessante, não obstante o fato de que os deslocamentos máximos previstos sejam um pouco maiores, quando se considera a parcela devida à deformação lenta.

10 Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada, e à TQS Informática pela ajuda na preparação dos modelos com protensão.

11 Referências bibliográficas

- [1] SCORDELIS, A. C.; LIN, T. Y.; ITAYA, R. (1959). Behavior of a Continuous Slab Prestressed in Two Directions. *ACI Journal*, December, p. 441-459.
- [2] LIN, T. Y. (1963). Load-Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures. *ACI Proceedings*, V. 60, No. 6, June, pp.719-741.
- [3] AALAMI, B. O. (1989). Design of Post-Tensioned Floor Slabs. *Concrete International: Design & Construction*, V. 11, No. 6, June, pp. 59-67.
- [4] ALBUQUERQUE, A. T. (1998). *Análise de Alternativas Estruturais para Edifícios de Concreto Armado*. Dissertação de Mestrado, 100 p., Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [5] ALMEIDA FILHO, F. M. (2002). *Estruturas de Pisos de Edifícios com a Utilização de Cordoalhas Engraxadas*. Dissertação de Mestrado, 284 p., Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2003). NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 180 p, Rio de Janeiro.