

LUCAS RIBEIRO OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA DE EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS
PROTENDIDAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo

Coorientadores: José Luiz Rangel Paes
José Carlos Lopes Ribeiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48a
2020
Oliveira, Lucas Ribeiro, 1989-
Análise estrutural evolutiva de edifícios com lajes lisas
protendidas / Lucas Ribeiro Oliveira. – Viçosa, MG, 2020.
106 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Lajes de concreto. 2. Concreto protendido. 3. Análise
estrutural (Engenharia). 4. Análise dimensional. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.1834

LUCAS RIBEIRO OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA DE EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS
PROTENDIDAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Lucas Ribeiro Oliveira
Autor



Gustavo de Souza Veríssimo
Orientador

Eu dedico este trabalho à minha querida filha,
Clara. Luz da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela vida, pela saúde e por ter me proporcionado essa oportunidade.

Agradeço à minha esposa, Lívia, pela compreensão, incentivo e auxílio sempre que precisei durante o mestrado.

Agradeço aos meus pais, por todo o apoio e por me ensinarem a importância da dedicação aos estudos, ao trabalho e à família.

Ao Prof. Gustavo de Souza Veríssimo, pela orientação e pelos valiosos ensinamentos passados que extrapolam a vida acadêmica e profissional, por ser um exemplo de dedicação ao ensino e à pesquisa.

Aos Professores José Luiz Rangel Paes, José Carlos Lopes Ribeiro e Reginaldo Carneiro da Silva, da UFV, pelos ensinamentos e contribuições indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Robson Luiz Gaiofatto, da Universidade Católica de Petrópolis, pelas sugestões que contribuíram para o engrandecimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço aos professores e funcionários do DEC, aos amigos da UFV e a todos aqueles que me apoiaram ao longo dessa jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

OLIVEIRA, Lucas Ribeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Análise estrutural evolutiva de edifícios com lajes lisas protendidas.** Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientadores: José Carlos Lopes Ribeiro e José Luiz Rangel Paes.

Nos últimos anos, com a difusão do uso das lajes lisas protendidas, alguns projetistas vêm usando projetar lajes com dimensões cada vez maiores, e isto tem levado à manifestação de alguns problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje devido às estruturas de apoio. A restrição ao encurtamento da laje gera uma descompressão na laje e esforços de flexão adicionais nos pilares. Neste tipo de estrutura, uma série de fenômenos dependentes do tempo acontecem simultaneamente, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas com uma abordagem mais realista do que a análise clássica. Um método adequado para essas situações é a análise estrutural evolutiva, que permite levar em conta as diversas etapas do processo construtivo e a introdução dos carregamentos em etapas, bem como os efeitos diferidos no tempo. Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre os resultados de uma análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e a análise clássica linear-elástica (AC) de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, utilizando-se o software SAP2000 v20, com base em modelos simplificados via Método dos Pórticos Múltiplos, e com base em modelos completos da estrutura, que foram discretizados em elementos finitos. Por fim, os resultados das análises estruturais dos modelos evolutivos são comparados com os dos modelos clássicos, comprovando a importância de se considerar uma AEE, principalmente nos edifícios com lajes protendidas de maior comprimento. Observou-se que as lajes do primeiro pavimento sofrem uma descompressão significativa em decorrência da restrição ao seu encurtamento provocada pelos pilares engastados na fundação e, como consequência, os pilares sofrem esforços adicionais de flexão importantes. A partir do segundo pavimento, constatou-se que a influência da restrição ao encurtamento da laje foi desprezível para os casos estudados e, portanto, os resultados das análises clássica e evolutiva para os pavimentos superiores foram semelhantes.

Palavras-chave: Lajes lisas protendidas. Análise Estrutural Evolutiva. Análise incremental. Análise Não-Linear. Retração. Fluência. Restrição ao encurtamento da laje.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Lucas Ribeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Staged construction analysis of post-tensioned building structures.** Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-advisers: José Carlos Lopes Ribeiro and José Luiz Rangel Paes.

In recent years, with the spread of the use of post-tensioned concrete floors, some designers have dared to design long slabs, and this has led to the manifestation of some problems related to restraint to shortening of the slabs due to the columns. For post-tensioned (PT) concrete floors, the shortening of the slabs occurs due to elastic compression, concrete creep, concrete shrinkage and temperature change. Restrain to shortening can cause decompression and restrain cracks in the slabs as well as additional bending forces on the vertical members. In this type of structure, a series of time-dependent phenomena happen simultaneously, producing variations in stress and strain that can only be determined with a more realistic approach than classical analysis. A suitable method for these situations is the staged construction analysis, which allows to consider the various stages of the construction process and to introduce the load in stages. In this work, a comparative study was carried out between the results of a nonlinear staged-construction analysis with time-dependent material behavior and the classical linear-elastic analysis of post-tensioned building structures, using case studies, with the software SAP2000 v20, based on simplified models with the Simple Frame Method, and based on complete models of the structure, which were discretized into finite elements. Finally, the numerical results of the nonlinear staged-construction analysis models are compared with those of classical models, proving the importance of considering a nonlinear staged construction analysis, especially in buildings with longer PT slabs. It was observed that the slabs on the first floor suffer a significant decompression due to the restraint to shortening caused by the columns connected to the foundation and, as a consequence, the columns suffer additional and important bending forces. From the second floor on, it was found that the influence of the restraint to shortening was negligible for the cases studied and, therefore, the results of the linear-elastic classical analysis and the non-linear staged-construction analysis for the upper floors were similar.

Keywords: Post-tensioned structures. Staged-construction analysis. Incremental analysis. Nonlinear analysis. Creep. Shrinkage. Restrain to shortening problems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	9
1.1	Considerações iniciais	9
1.1	Objetivos	11
1.2	Motivação	12
1.3	Estrutura do documento.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	Histórico	14
2.2	Vantagens e desvantagens do sistema de piso com lajes lisas protendidas.....	15
2.3	Métodos para modelagem do sistema estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas	17
2.4	Tipos de análise estrutural	26
2.4.1	Análise estrutural clássica (AC)	26
2.4.2	Análise estrutural evolutiva (AEE).....	26
2.5	Comportamento de lajes protendidas sob efeito da restrição ao encurtamento devido às estruturas de apoio.....	30
2.5.1	Generalidades.....	30
2.5.2	Efeitos da restrição ao encurtamento de lajes protendidas relacionados ao ato da protensão 31	
2.5.3	Efeitos da restrição ao encurtamento de lajes protendidas relacionados aos fenômenos de variação de temperatura, retração e fluência do concreto	42
2.6	Estratégias para a análise estrutural evolutiva de modelos com lajes lisas protendidas	44
2.7	Propriedades dos materiais dependentes do tempo	56
	ARTIGO 1	58
	ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA E ANÁLISE CLÁSSICA VIA MÉTODO DOS PÓRTICOS MÚLTIPLOS DE EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS PROTENDIDAS	58
1	Introdução	59
1.1	Considerações iniciais.....	59
1.2	Antecedentes	60
1.3	Motivação e objetivos	61

2	Descrição dos pórticos analisados	62
3	Etapas de construção e carregamento	66
4	Propriedades dos materiais dependentes do tempo.....	67
5	Resultados e discussão	70
6	Conclusões	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	ARTIGO 2	79
	ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA E A ANÁLISE CLÁSSICA DE UM EDIFÍCIO COM LAJES LISAS PROTENDIDAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	79
1	Introdução	80
1.1	Considerações iniciais.....	80
1.2	Antecedentes	81
1.3	Motivação e objetivos	82
2	Descrição do modelo	83
3	Etapas de construção e carregamento	87
4	Propriedades dos materiais dependentes do tempo.....	88
5	Resultados e discussão	91
6	Conclusões	98
	AGRADECIMENTOS	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
3	CONCLUSÕES	101
3.1	Considerações finais.....	101
3.2	Sugestões para trabalhos futuros	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, os projetos de edifícios residenciais e comerciais vêm sendo desenvolvidos com concepções arquitetônicas cada vez mais arrojadas, exigindo que os sistemas estruturais utilizados nestas construções sejam igualmente modernos e inovadores. Nesse contexto, a utilização de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas vem se difundindo, por proporcionar maior flexibilidade à arquitetura, permitindo vencer maiores vãos, com estruturas mais delgadas e custo competitivo.

Com a difusão do uso das lajes protendidas com cordoalhas engraxadas e plastificadas, alguns engenheiros vêm ousando projetar lajes com dimensões cada vez maiores e edifícios cada vez mais altos, e isto tem levado à manifestação de alguns problemas relacionados aos esforços adicionais que são gerados pela restrição ao encurtamento da laje devido às estruturas de apoio (pilares, pilares-paredes, núcleos rígidos e cortinas de contenção).

O encurtamento em lajes protendidas com pós-tração ocorre devido à compressão elástica do concreto no ato da protensão, à fluência e à retração do concreto e devido à variação de temperatura. Quanto mais longa a laje, maior o efeito cumulativo dos problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje.

Normalmente, em estruturas de edifícios, existem algumas restrições ao encurtamento da laje que são provocadas pelos elementos estruturais verticais de apoio que são concretados monoliticamente à laje, como pilares, cortinas de contenção, pilares-paredes e núcleos-rígidos. Quanto maior a rigidez das estruturas de apoio, maior a restrição ao encurtamento da laje.

Dependendo das condições de contorno, a restrição ao encurtamento da laje promove uma diminuição da pré-compressão da laje e o possível aparecimento de fissuras

de restrição que prejudicam a sua durabilidade, além de gerar esforços adicionais de momento fletor e esforço cortante nos elementos verticais de apoio.

Para se realizar análises estruturais em edifícios com lajes lisas protendidas, uma das formas é utilizar modelos simplificados pelo Método dos Pórticos Múltiplos (MPM), ou modelos completos da estrutura. O modelo completo integra o pórtico espacial e as lajes, que normalmente são discretizadas em elementos finitos ou por uma malha de grelha equivalente.

É prática comum no dimensionamento de lajes lisas protendidas considerar o modelo simplificado do pavimento isolado durante a análise estrutural, em que a laje deste pavimento é modelada conjuntamente com os pilares do andar inferior e do andar superior, com as extremidades destes engastadas.

Na avaliação do comportamento das estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos, seja utilizando modelos simplificados de pórticos múltiplos ou modelos completos da estrutura, pode-se utilizar análise estrutural clássica (AC) ou análise estrutural evolutiva (AEE).

A análise estrutural clássica é aquela em que se considera a estrutura pronta, com todos os pavimentos montados e todos os carregamentos aplicados em uma única etapa. Ou seja, este tipo de análise não leva em conta o caráter sequencial das etapas de construção e carregamento da estrutura, podendo apresentar diferenças significativas em relação à estrutura real.

Por outro lado, a análise estrutural evolutiva considera o efeito incremental do processo construtivo, permitindo que se defina uma sequência de estágios nos quais pode-se adicionar ou remover partes da estrutura, aplicar cargas em determinadas partes da estrutura e considerar a variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo. A análise estrutural evolutiva também é conhecida como análise incremental ou análise sequencial.

No caso de estruturas de edifícios de andares múltiplos com lajes lisas protendidas, uma série de fenômenos dependentes do tempo acontecem simultaneamente, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas com uma abordagem mais realista do que a análise clássica. Portanto, para essas situações, a análise estrutural evolutiva é mais adequada, porque permite levar em conta as diversas etapas do processo construtivo e a introdução dos carregamentos em etapas. Esse método de análise permite computar os esforços e deformações em cada etapa da construção, para cada porção da estrutura que vai sendo montada, seguindo a sequência de construção.

Dessa forma, efeitos de fenômenos como protensão, retração e fluência do concreto, relaxação do aço de protensão, restrição à deformação de elementos protendidos devido à rigidez à flexão das estruturas de apoio, variação de temperatura, etc., podem ser considerados em instantes específicos, reproduzindo de forma mais aproximada o que ocorre com a estrutura real.

Grande parte das ações permanentes (peso próprio, protensão, revestimento, alvenaria, entre outros) solicita a estrutura durante a fase de construção, enquanto a estrutura não foi finalizada e o concreto ainda apresenta módulo de elasticidade diferente do final. Diante disso, a adoção de processos de análise estrutural que considerem a sequência de construção e de carregamento permite simular melhor o comportamento das estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas.

Recentemente, diversos casos de manifestações patológicas, e até falhas estruturais, tem sido observados em estruturas de edifícios com lajes protendidas de grandes comprimentos, projetadas sem uma análise mais rigorosa dos efeitos que interferem na evolução dos esforços e deformações nessas estruturas, chamando a atenção dos profissionais da área e evidenciando a necessidade de novos estudos para avaliar o comportamento estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas.

Neste trabalho, comparam-se os resultados de uma análise estrutural evolutiva não-linear de edifícios com lajes lisas protendidas com os resultados de uma análise estrutural clássica. Para a análise estrutural evolutiva, são consideradas a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (variação do módulo de elasticidade, efeitos da retração e fluência do concreto), as perdas de protensão imediatas e progressivas, a relaxação do aço, bem como a sequência construtiva e de carregamento da estrutura.

Os efeitos relacionados à variação de temperatura, escoramento da laje, interação solo-estrutura, forças do vento e desaprumo da estrutura não fazem parte do escopo deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da utilização de uma análise estrutural evolutiva (AEE) no comportamento de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas.

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- identificar modelos que representam a variação das propriedades do concreto ao longo tempo;

- identificar modelos para a simulação das perdas de protensão imediatas e progressivas;
- obter um modelo estrutural para uma análise estrutural evolutiva (AEE), considerando a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (variação do módulo de elasticidade, efeitos da retração e fluência do concreto), considerando as perdas de protensão imediatas e progressivas, bem como a sequência de construção e de introdução dos carregamentos da estrutura;
- comparar os resultados de uma AEE com a AC de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas.

1.2 MOTIVAÇÃO

Atualmente, tem-se constatado no meio técnico brasileiro que não é tão comum considerar os efeitos da restrição ao encurtamento de lajes lisas protendidas de edifícios, devido às estruturas de apoio. Estes efeitos podem gerar descompressão e fissuras de restrição na laje, além de provocar esforços adicionais nos pilares e outras estruturas verticais que suportam a laje.

Com a evolução dos softwares de análise estrutural, atualmente é possível realizar análises avançadas pelo Método dos Elementos Finitos, levando-se em consideração o efeito incremental das etapas de construção e de carregamento na estrutura, além da variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo. Dessa forma, é possível avaliar o comportamento de estruturas com lajes protendidas de forma mais realista.

Apesar de existirem ferramentas de cálculo que permitem a introdução das etapas de construção e dos efeitos diferidos com o tempo na análise estrutural, o estudo da sua influência nos esforços solicitantes e deslocamentos em estruturas ainda não tem sido objeto de maior atenção, principalmente em edifícios com lajes lisas protendidas.

Neste trabalho, busca-se aprofundar o estudo do comportamento de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas por meio de análise estrutural avançada, considerando-se o efeito incremental das etapas de construção e de carregamento, a não-linearidade física do concreto e as perdas de protensão imediatas e progressivas.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para um melhor entendimento do comportamento estrutural de lajes de concreto protendidas, considerando-se diversos fenômenos complexos que governam a evolução das tensões e deformações nos materiais, bem como da utilização da análise estrutural evolutiva, haja vista a escassez de estudos aprofundados sobre o tema no Brasil.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura sobre os temas abordados neste trabalho, como a análise estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas utilizando modelos simplificados, com base no Método dos Pórticos Múltiplos, ou por meio de modelos do pórtico espacial completo da estrutura, sobre os problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje, bem como sobre a análise estrutural clássica e a análise estrutural evolutiva.

O restante do documento foi organizado na forma de artigos. Assim, na sequência são apresentados dois artigos, denominados Artigo 1 e Artigo 2.

No Artigo 1 é realizado um estudo comparativo entre os resultados de uma análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e a análise clássica linear-elástica (AC) de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, por meio de estudos de caso, utilizando-se o software SAP2000 v20, com base no modelo de pórticos múltiplos.

No Artigo 2 é realizado um estudo comparativo entre os resultados de uma análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e a análise clássica linear-elástica (AC) de um edifício com lajes lisas protendidas, por meio de um estudo de caso, utilizando-se o software SAP2000 v20, com base em um modelo estrutural completo.

Por fim, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRICO

A aplicação da protensão, nos seus primórdios, foi voltada principalmente para construção de pontes e estruturas especiais, com pouca atenção para sua utilização em edificações. Somente na década de 1950 é que surgiram, nos Estados Unidos, as primeiras lajes maciças protendidas, que eram moldadas no terreno e posteriormente içadas e ancoradas em suas posições finais (AALAMI, 2007, *apud* CARNEIRO, 2015).

Houve um grande desenvolvimento das lajes protendidas na década de 1960, graças ao desenvolvimento e difusão do método do balanceamento de cargas (*Load-Balancing Method*) desenvolvido por Tung-Yen Lin, nos Estados Unidos. Em 1963, o concreto protendido foi incorporado à norma de edifícios nos Estados Unidos (ACI 318) e, desde então, diversos trabalhos de pesquisa sobre o assunto vieram sendo desenvolvidos. Com a utilização do concreto protendido em outros países, outras normas também passaram a incluir o sistema (AALAMI, 2007, *apud* CARNEIRO, 2015).

Fintel e Gosh (1978) realizaram pela primeira vez um estudo sobre o efeito incremental das etapas de protensão nas vigas de um edifício de 45 pavimentos.

Posteriormente, o Prof. Bijan Aalami realizou diversos estudos sobre as lajes protendidas com pós-tensão, contribuindo de forma significativa para o melhor entendimento do comportamento estrutural desse tipo de laje, abordando temas como análises estruturais utilizando o Método do Balanceamento de Cargas para obtenção dos efeitos da protensão; utilização de modelos estruturais simplificados pelo Método dos Pórticos Múltiplos, pelo Método dos Pórticos Equivalentes ou de modelos estruturais completos discretizados de acordo com o Método dos Elementos Finitos; aspectos construtivos e de projeto sobre os cabos de protensão; efeitos hiperestáticos de protensão; efeitos da retração e da fluência do concreto, bem como da variação de temperatura e os problemas relacionados à restrição ao encurtamento das lajes protendidas (AALAMI, 1990; 1993, 1998a, 1998b, 1998c, 2000a, 2000b, 2001, 2004, 2016a, 2016b).

Guo, Joseph e Bieberly (2009) realizaram um estudo sobre os efeitos da restrição ao encurtamento em lajes protendidas de garagens em subsolos em decorrência das cortinas de contenção que estão rigidamente ligadas à laje. Avaliaram a descompressão da laje por meio de uma análise linear-elástica com elementos finitos, com auxílio do software ETABS, em que se considerou apenas o efeito das forças horizontais de pré-compressão no ato da protensão, variando-se o grau de interação entre a laje e a cortina.

Guo, Joseph e Darwin (2013) analisaram a redistribuição das forças horizontais de pré-compressão das lajes durante as etapas de protensão por meio de uma análise estrutural evolutiva (*staged construction analysis*) de pórticos de edifícios de múltiplos andares com laje lisa protendida, com auxílio do software SAP2000. Nesse trabalho, aplicaram-se apenas as forças horizontais de protensão no modelo e foi utilizada uma análise linear-elástica, ou seja, não se levou em conta a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo. A perda de protensão no tempo infinito foi considerada de forma simplificada.

Guo e Joseph (2013a, 2013b) realizaram um estudo comparando diversos modelos matemáticos existentes para o cálculo do encurtamento de lajes protendidas levando em conta os efeitos da fluência e da retração do concreto. Além disso, estudaram os benefícios da utilização de faixas de concretagem (*delay strips*) para diminuir os problemas relacionados à restrição ao encurtamento das lajes, considerando diversos períodos com a faixa de concretagem aberta, variando-se a umidade relativa do ar e as propriedades do concreto.

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SISTEMA DE PISO COM LAJES LISAS PROTENDIDAS

Dentre as diversas vantagens dos sistemas de piso com lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, de acordo com Loureiro (2006) e Emerick (2005), podem-se citar:

- a capacidade de vencer grandes vãos com pavimentos de pequena espessura, com fissuração e flechas reduzidas, proporciona uma maior liberdade arquitetônica por evitar vigas em edifícios residenciais e comerciais, além de possibilitar mais vagas de garagem;
- as lajes protendidas sem vigas proporcionam redução do pé-direito, resultando em menor altura total do edifício ou maior número de pavimentos dentro de uma altura pré-fixada;
- o uso de materiais de alta resistência, como cordoalhas CP 190 RB ou CP 210 RB e concretos com f_{ck} maior ou igual a 30 MPa e, portanto, com maior módulo de elasticidade,

contribui, também, para um melhor comportamento em serviço e maior resistência no estado limite último;

- a simplicidade de execução da fôrma plana, a facilidade de fixação das ancoragens individuais e de baixo peso, bem como, a agilidade no manuseio das monocordoalhas engraxadas e plastificadas, que dispensam a operação de injeção, resultam numa maior rapidez de execução da estrutura; além disso, a operação de protensão é simples e rápida, pois utiliza macacos hidráulicos leves;
- a execução de lajes de grande comprimento sem juntas de dilatação, pois a pré-compressão introduzida pela protensão combate a fissuração devida à retração do concreto e à variação de temperatura;
- a economia em relação às estruturas em concreto armado para vãos superiores a 7 metros;
- a maior velocidade na desforma e retirada de escoramentos;
- a maior resistência ao puncionamento, com relação às lajes lisas ou cogumelo de concreto armado, obtida pela colocação adequada dos cabos de protensão nas regiões próximas aos pilares.

Dentre as desvantagens das lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, podem-se citar:

- trata-se de um tipo de laje que possui uma maior complexidade para a análise estrutural, dimensionamento e detalhamento;
- em relação à estabilidade global dos edifícios, há a necessidade de se projetar estruturas de contraventamento mais robustas, pois a estrutura com laje lisa não forma pórticos, devido à inexistência de vigas;
- necessidade de se ter um maior controle de qualidade da execução da obra, tanto em relação aos materiais empregados, quanto em relação à mão-de-obra;
- necessidade de empresas especializadas na região da obra para realizar os serviços de montagem e protensão das cordoalhas engraxadas.

2.3 MÉTODOS PARA MODELAGEM DO SISTEMA ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS PROTENDIDAS

De acordo com Aalami (2001), atualmente, existem diversas metodologias adotadas para a análise estrutural de estruturas com lajes lisas protendidas. Nos Estados Unidos, por exemplo, é comum utilizar modelos simplificados de acordo com o Método dos Pórticos Múltiplos (MPM) ou o Método dos Pórticos Equivalentes (MPE), bem como utilizar modelos mais complexos da estrutura completa por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MPM é um método aproximado que consiste em calcular a laje dividindo-a em faixas apoiadas sobre os pilares, formando pórticos. O processo é feito nas duas direções principais a fim de manter os momentos fletores na laje e dimensionar as armaduras (ativa e passiva) em ambas as direções.

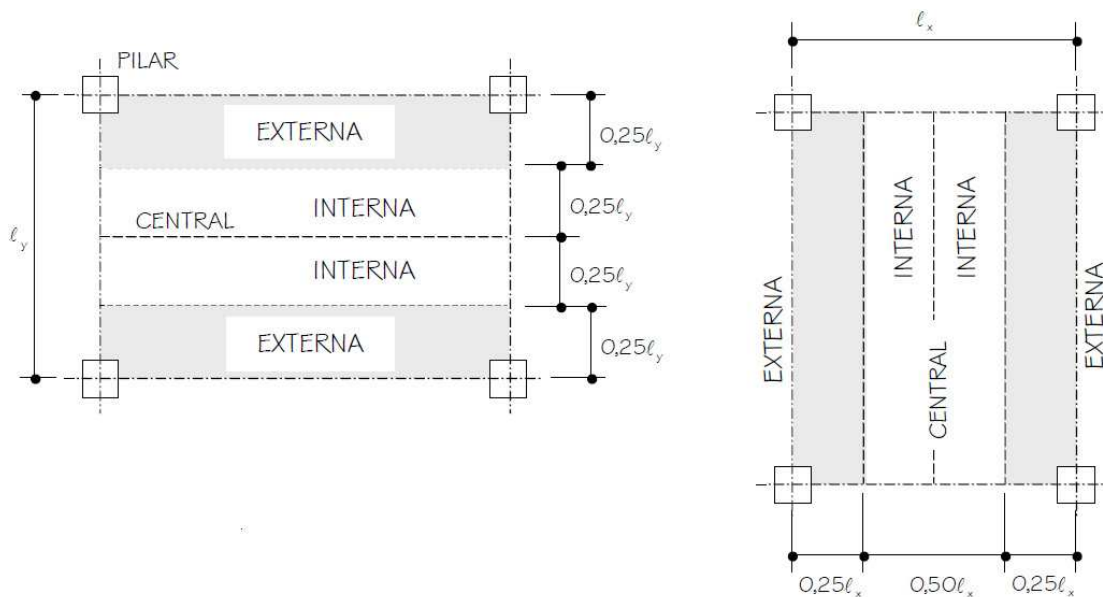
Os pórticos formados pelas lajes e pilares nas duas direções principais são calculados com a carga total nas duas direções. Normalmente, a análise é realizada considerando o pórtico por pavimento, ou seja, não se considera o pórtico completo contemplando todos os pavimentos.

O método dos pórticos múltiplos proposto pela ABNT NBR 6118:2014 consiste em dividir a estrutura em cada direção em uma série de pórticos constituídos por colunas e barras horizontais, cujas inércias serão iguais às da laje limitada pela metade da distância entre duas linhas de pilares.

A distribuição dos momentos fletores, obtida em cada direção, segundo as faixas indicadas na Figura 1, deve ser feita da seguinte maneira:

- a) 45% dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- b) 27,5% dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- c) 25% dos momentos negativos para as duas faixas internas;
- d) 37,5% dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

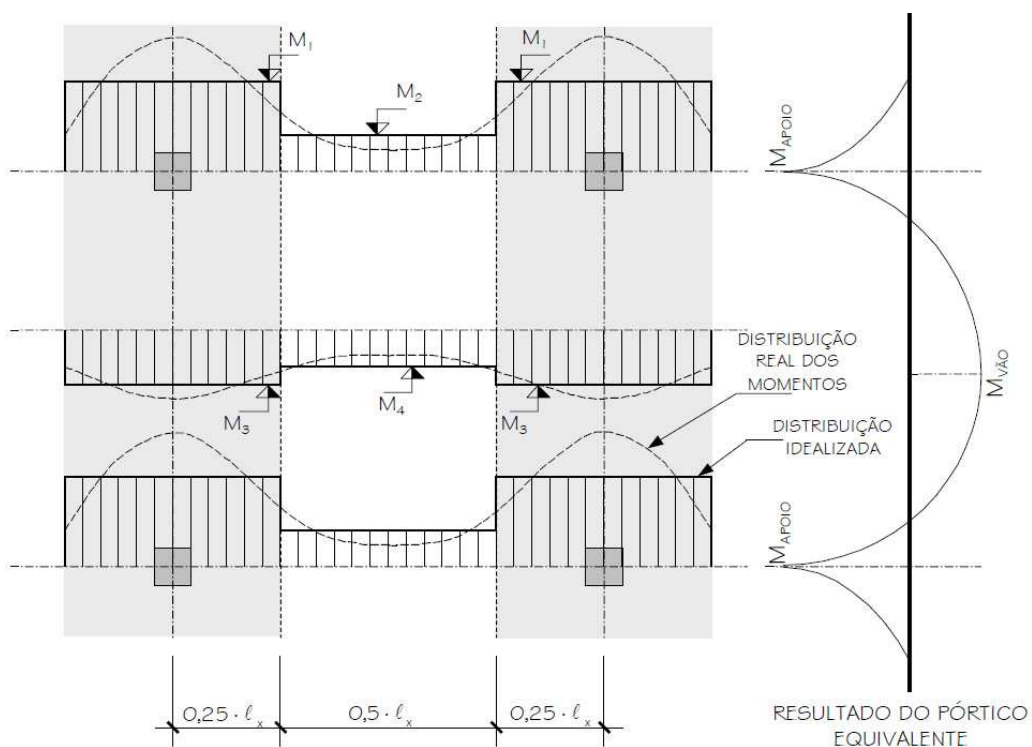
Figura 1 - Faixas de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos.



Fonte: Emerick (2005).

Na Figura 2 apresenta-se a distribuição dos momentos nas faixas de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

Figura 2 - Distribuição dos momentos nas faixas segundo a ABNT NBR 6118:2014.



MOMENTOS NAS FAIXAS:

$$M_1 = 0,375 \frac{M_{\text{APOIO}}}{0,25l_x} \quad M_3 = 0,275 \frac{M_{\text{VAÇO}}}{0,25l_x}$$

$$M_2 = 0,25 \frac{M_{\text{APOIO}}}{0,5l_x} \quad M_4 = 0,45 \frac{M_{\text{VAÇO}}}{0,5l_x}$$

Fonte: Emerick (2005).

Devem ser cuidadosamente estudadas as ligações das lajes com os pilares, com especial atenção aos casos em que não haja simetria de forma ou de carregamento da laje em relação ao apoio. Obrigatoriamente devem ser considerados os momentos de ligação entre laje e pilares extremos.

Araújo (2010) *apud* Carneiro (2015) esclarece que a flecha máxima no centro de cada painel da laje pode ser obtida, de maneira aproximada, do cálculo dos pórticos, segundo as duas direções. Para isso, procede-se do seguinte modo:

- do cálculo para a direção x , obtém-se a flecha máxima no vão correspondente ao painel em estudo;
- do cálculo para a direção y , obtém-se a flecha máxima no vão correspondente ao mesmo painel considerado;
- a flecha total no painel é dada pela soma das flechas nas duas direções, devendo-se levar em conta ainda os efeitos da fluência e da fissuração do concreto.

Vale salientar que de acordo com a antiga ABNT NBR 6118:2003, “*a análise estrutural de lajes lisas e cogumelo deve ser realizada mediante emprego de procedimento numérico adequado, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno. Nos casos em que os pilares estiverem dispostos em filas ortogonais, de maneira regular e com vãos pouco diferentes, o cálculo dos esforços pode ser realizado pelo processo elástico aproximado, com redistribuição, que consiste em adotar em cada direção pórticos múltiplos, para obtenção dos esforços solicitantes*”.

Já a atual ABNT NBR 6118:2014 prescreve que “*a análise estrutural de lajes lisas e cogumelo deve ser realizada mediante emprego de procedimento numérico adequado, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno. Nos casos das lajes em concreto armado, em que os pilares estiverem dispostos em filas ortogonais, de maneira regular e com vãos pouco diferentes, o cálculo dos esforços pode ser realizado pelo processo elástico aproximado, com redistribuição, que consiste em adotar, em cada direção, pórticos múltiplos, para obtenção dos esforços solicitantes*”.

Da forma como a ABNT NBR 6118:2014 apresenta o item 14.7.8, o Método dos Pórticos Múltiplos é recomendado somente para a análise estrutural de lajes de concreto armado e não para lajes de concreto protendido. De acordo com Küster (2014), o provável motivo desta recomendação reside no fato de que a determinação dos esforços através deste processo se baseia em estruturas submetidas a ações uniformemente distribuídas. Este não é o caso da protensão que, em geral, é considerada concentrada nas faixas dos pilares.

Araújo (2010) *apud* Carneiro (2015) esclarece que, em geral, o Método dos Pórticos Múltiplos não deve ser utilizado quando a diferença entre o maior e o menor de todos os vãos da laje ultrapassar 30%. O autor orienta também que este método só deve ser utilizado quando existirem no mínimo três painéis de laje na direção transversal à direção analisada.

Aalami (2001) comenta que o Método dos Pórticos Equivalentes é um refinamento do Método dos Pórticos Múltiplos, em que são feitas correções em relação às rigidezes dos pilares, de acordo com as prescrições do ACI 318-05, que levam em consideração o funcionamento da laje em duas direções.

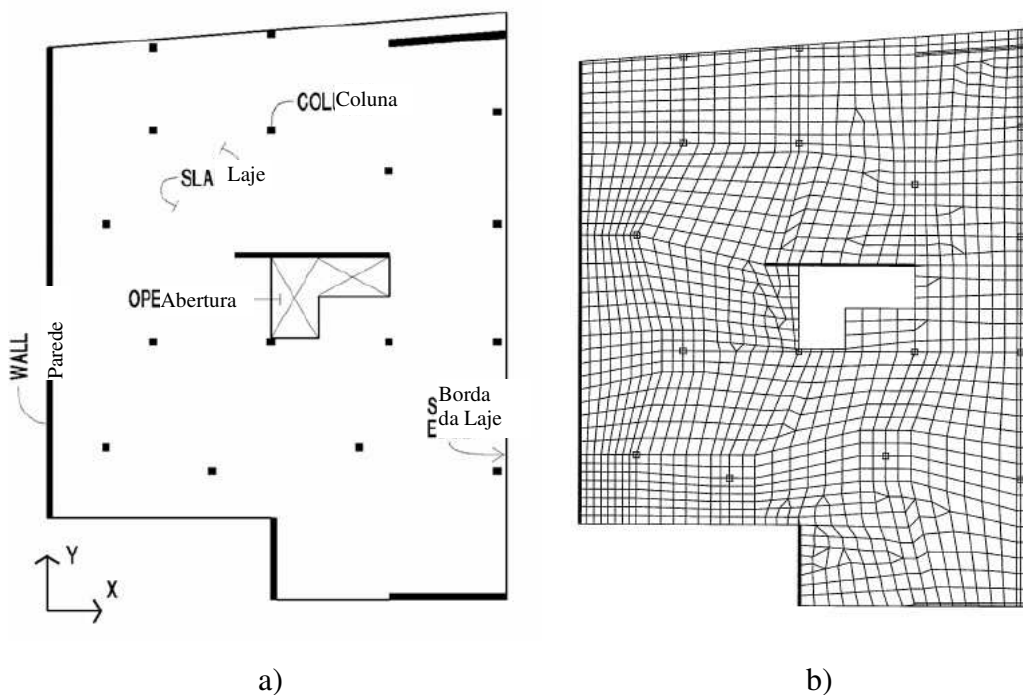
Emerick (2005) afirma que o cálculo de lajes lisas e cogumelo pelo Método dos Pórticos Equivalentes (MPE) tem sido largamente utilizado. O ACI 318-05 permite o cálculo como pórticos para estruturas com pilares que apresentem um desvio de no máximo 10% em relação ao alinhamento dos demais. Evidentemente para lajes muito irregulares, com pilares desalinhados e/ou presença de grandes aberturas, é recomendável o uso de um modelo estrutural completo da laje, que pode ser discretizada de acordo com o Método dos Elementos Finitos.

Com o avanço dos programas computacionais, atualmente é prática comum nos escritórios de engenharia realizar a análise estrutural discretizando as lajes protendidas em elementos finitos ou em grelha equivalente e modelar os elementos de apoio (pilares, pilares-parede e núcleos-rígido) como barras com extremidades engastadas.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que permite determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. Para a obtenção dos esforços solicitantes e deslocamentos em uma laje, o MEF inclui o uso de técnicas de geração de malha para dividir um problema complexo, por exemplo uma laje com geometria irregular, em elementos pequenos cujo comportamento é formulado de forma aproximada (ver Figura 3). O comportamento de cada elemento finito depende das suas propriedades constitutivas, da sua geometria e localização na estrutura, bem como das suas condições de contorno.

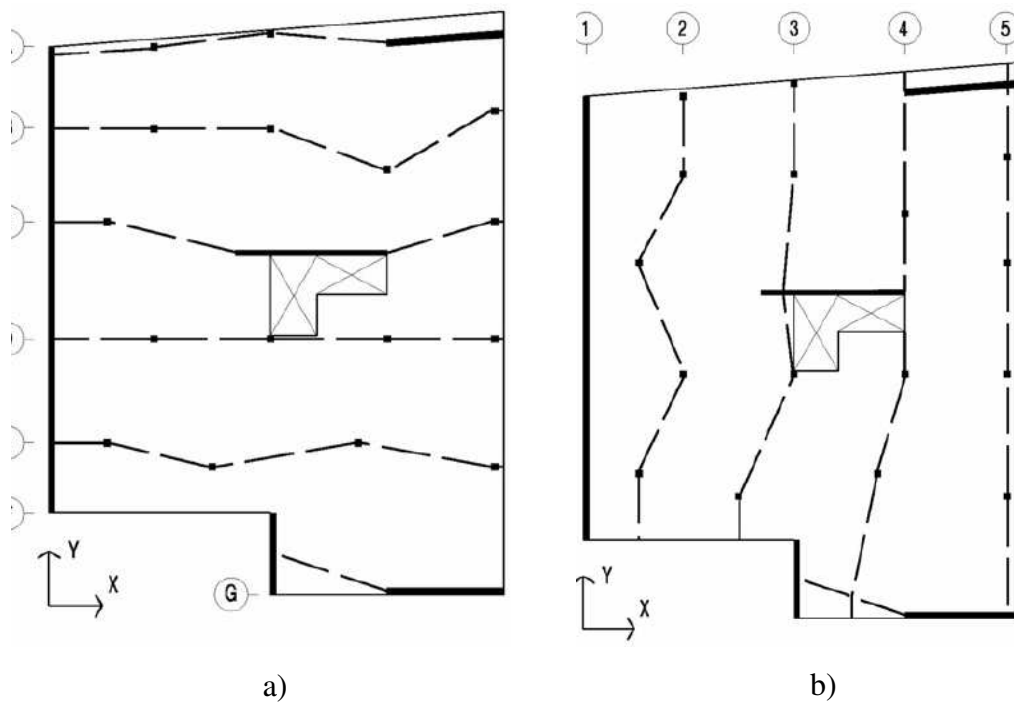
De acordo com Aalami (2001), durante a modelagem de uma estrutura em laje protendida, primeiramente define-se o caminho das cargas até os apoios (*load path*). Normalmente, escolhem-se as linhas que unem os apoios (*support lines*), nas direções longitudinal e transversal da laje, para indicar o caminho das cargas, como pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 3 – a) Fôrma da laje lisa protendida. b) Discretização da laje em elementos finitos.



Fonte: adaptado de Aalami (2001).

Figura 4 – a) Linhas de apoio na direção x. b) Linhas de apoio na direção y.

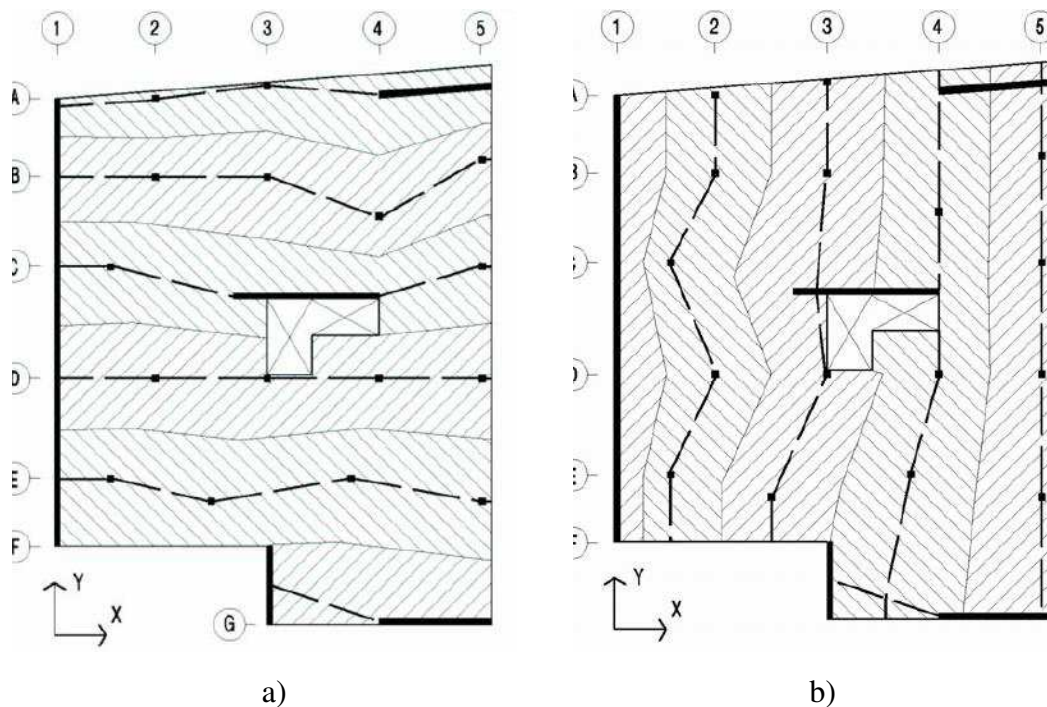


Fonte: Aalami (2001).

A cada linha de apoio (*support line*) é associada uma área tributária (*tributary area*), que normalmente é delimitada por meio de uma linha que liga os pontos médios equidistantes entre 2 linhas de apoio adjacentes. Os apoios e os trechos de lajes correspondentes à área tributária constituem o que se chama de faixa de projeto (*design*

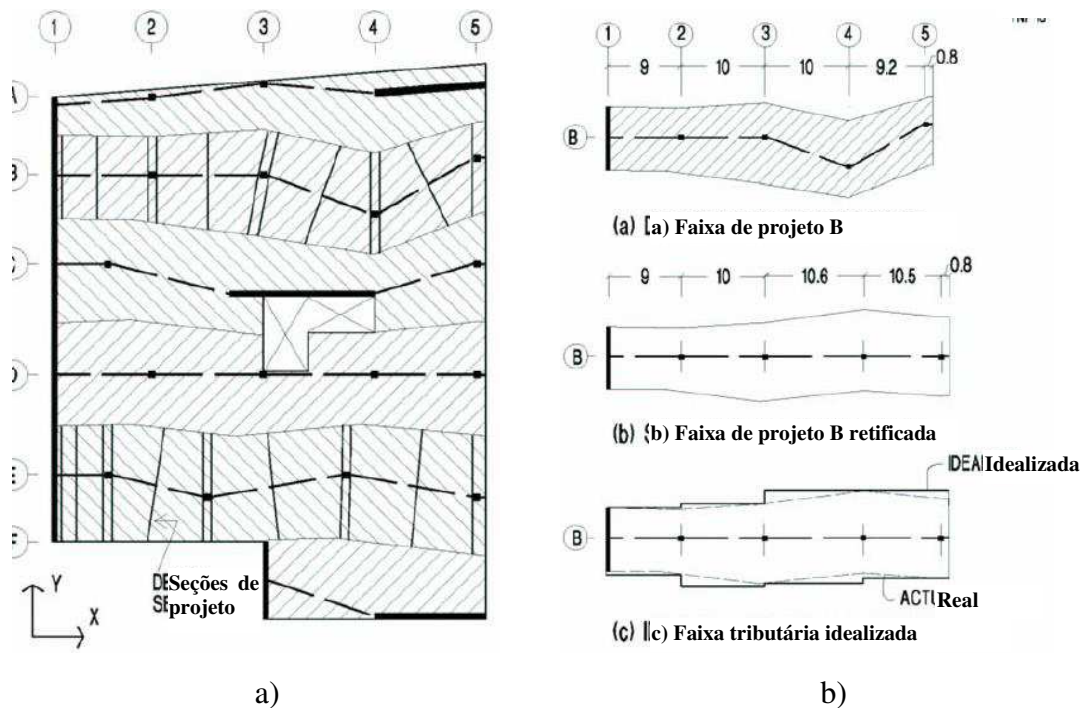
strip), conforme mostrado na Figura 5. Observa-se que se trata de um procedimento semelhante ao adotado no MPE ou no MPM.

Figura 5 – a) Faixas de projeto na direção x. b) Faixas de projeto na direção y.



Fonte: Aalami (2001).

Figura 6 – a) Seções de projeto (*design sections*) para faixas de projetos (*design strips*) B e E. b) Faixa de projeto B.



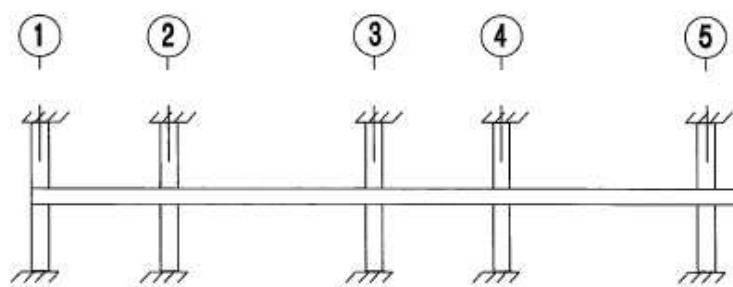
Fonte: adaptado de Aalami (2001).

As seções de projeto (*design sections*) são normalmente as seções transversais de cada faixa de projeto (*design strip*) onde os valores da integral resultante dos esforços solicitantes são máximos. Quanto maior o número de seções de projeto, mais otimizado é o dimensionamento das armaduras ativas e passivas (ver Figura 6). Observa-se que neste exemplo foram adotadas seções transversais de projeto onde ocorrem os momentos negativos máximos e momentos positivos máximos.

Conforme comentado por Aalami (2001), para a maioria das estruturas, a escolha do caminho das cargas até os apoios é independente do modelo estrutural a ser escolhido, seja ele um modelo simplificado de pórticos ou um modelo completo da estrutura. Portanto, segundo Loureiro (2006), pode-se, então, analisar a estrutura utilizando o modelo simplificado ou o modelo completo e usar as mesmas faixas de projeto para obter os esforços nas seções, verificar as tensões e efetuar o dimensionamento das armaduras. As seções transversais (*design sections*) são consideradas com a largura total das seções de projeto (*design strip*).

Quando se utiliza o MPM, ou o MPE, a geometria de cada faixa de projeto é extraída do modelo do pavimento e é construído um modelo de pórtico plano em que a viga tem a mesma seção transversal da faixa de projeto e os trechos de pilares acima e abaixo da laje analisada são modelados com as extremidades engastadas, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Modelo de Pórtico Plano para o Método dos Pórticos Equivalentes.



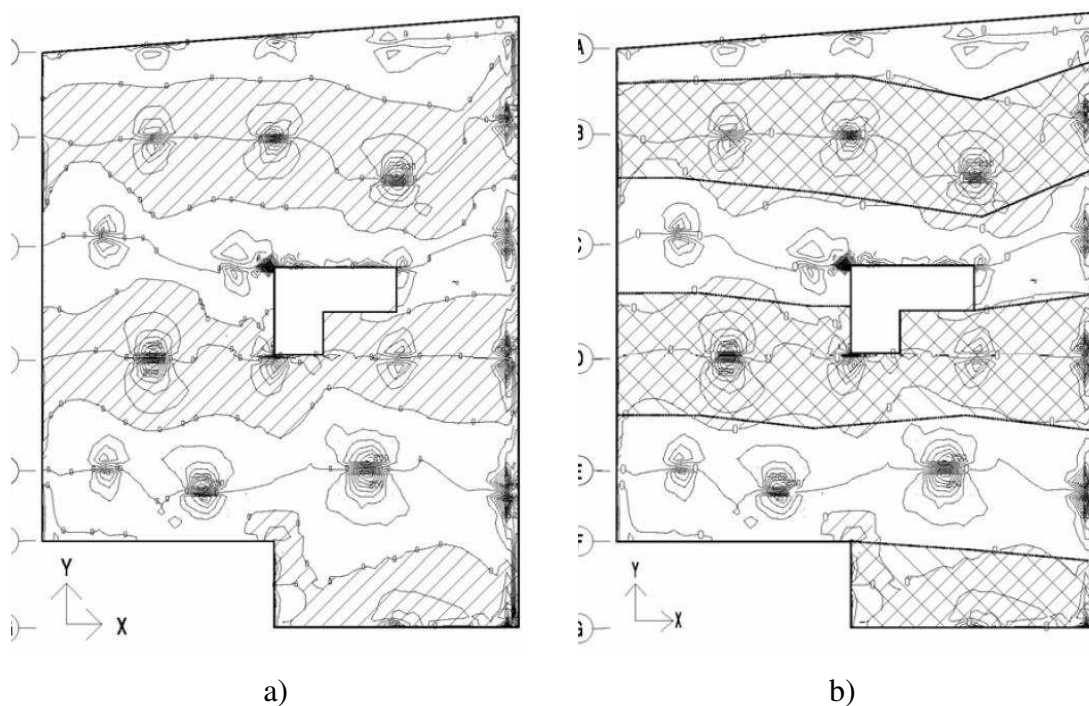
Fonte: Aalami (2001).

Quando se utiliza um modelo estrutural completo discretizado em elementos finitos, é possível analisar os resultados de esforços solicitantes e deslocamentos da laje como um todo de uma só vez e de uma forma mais realista.

Idealmente, considerando a análise estrutural pelo MEF, uma faixa de projeto deveria ser contornada por linhas de isovalores de esforço cortante nulo, de forma que cada faixa de projeto seria dimensionada para as ações atuantes que são localizadas sobre ela. Na Figura 8a, podem ser observadas as linhas de cortante nulo, que definem as faixas

tributárias reais para a laje em questão. Na Figura 8b, as faixas tributárias de projeto, definidas pelos pontos médios, são superpostas às faixas tributárias reais. Pode-se constatar que existe uma boa aproximação entre as duas faixas. Todas as verificações de tensões no concreto para os Estados-Limites de Serviço (ELS), bem como o dimensionamento de armaduras para os Estados-Limites Últimos (ELU) são realizadas considerando-se as ações atuantes nas faixas tributárias (*design strips*) e as inércias da seção bruta de concreto das suas seções transversais (*design sections*).

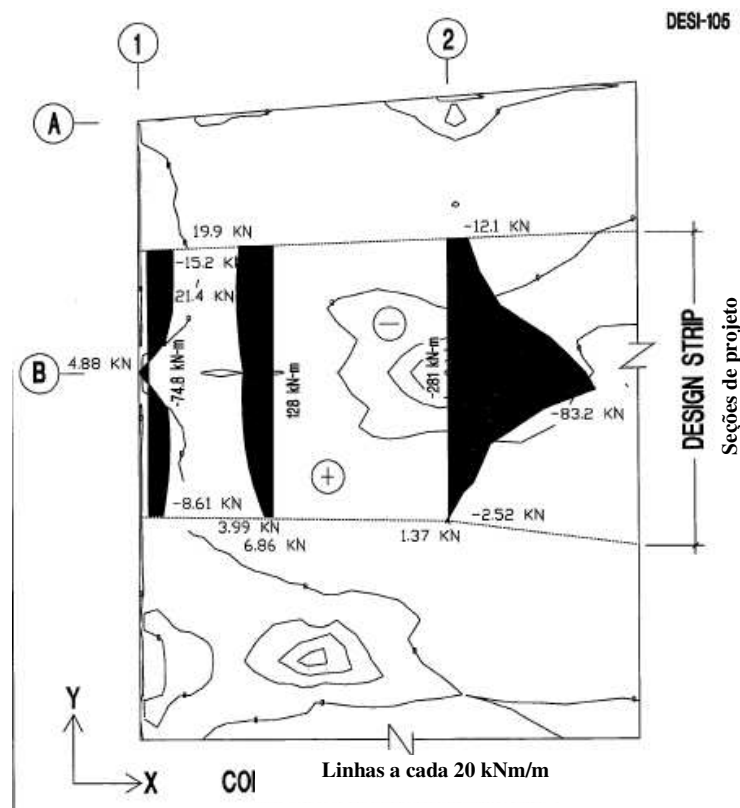
Figura 8 – a) Linhas de cortante nulo e faixas de projeto reais. b) Faixas de projeto.



Fonte: Aalami (2001).

Em outras palavras, conforme comentado por Loureiro (2006), ao verificar as tensões no concreto, não se leva em conta tensões pontuais. O que se calcula são tensões hipotéticas médias correspondentes ao momento total na seção transversal da faixa de projeto, que é obtido através da integral da curva de distribuição de momentos na seção considerada (Figura 9). Este procedimento também é adotado para a verificação das armaduras ativas e passivas.

Figura 9 – Integral da curva de momentos solicitantes em seções de projeto da faixa de projeto B.



Fonte: Aalami (2001).

Observa-se que esta metodologia de análise estrutural de lajes lisas protendidas permite uma grande homogeneização dos momentos fletores, eliminando-se os picos de momentos nas regiões próximas aos pilares. Apesar de ser um procedimento que não é aconselhável para lajes lisas de concreto armado, trata-se de um processo de cálculo largamente utilizado nos EUA em lajes protendidas com cordoalhas engraxadas.

De acordo com Aalami (2001), este procedimento pode ser adotado porque as lajes protendidas em duas direções estão submetidas a um estado biaxial de tensão que permite uma redistribuição de esforços maior do que uma laje em concreto armado. Aalami (2001) afirma também que o dimensionamento de estruturas de concreto não é sensível às tensões pontuais e que a distribuição de armaduras não é um ponto crítico, desde que a quantidade total de armaduras seja calculada para resistir ao momento fletor total numa seção transversal de projeto. Isto é baseado na premissa de que uma falha pontual em que a tensão resistente do concreto é superada por uma tensão solicitante promove o aparecimento de uma fissura contínua que irá mobilizar todas as armaduras que atravessam esta fissura.

Em outras palavras, o leiaute dos cabos de protensão e das armaduras passivas dentro de uma faixa de projeto é mais flexível para lajes protendidas do que para lajes de concreto armado sem protensão.

2.4 TIPOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

2.4.1 Análise estrutural clássica (AC)

Na análise estrutural clássica, ou análise estrutural tradicional, as estruturas de edifícios de múltiplos andares são normalmente analisadas em uma única etapa, considerando-se a estrutura completa, com todas as ações atuando no edifício ao mesmo tempo, como peso próprio, cargas permanentes de revestimentos e de alvenarias, sobrecargas de serviço e forças laterais de vento.

Dependendo do porte do edifício, as respostas da estrutura completa às várias ações aplicadas em uma única etapa podem diferir significativamente das que se obtém quando as ações são aplicadas em partes, considerando as etapas de construção e de carregamento. Esta última metodologia de análise é denominada análise estrutural evolutiva, ou, simplesmente, análise evolutiva.

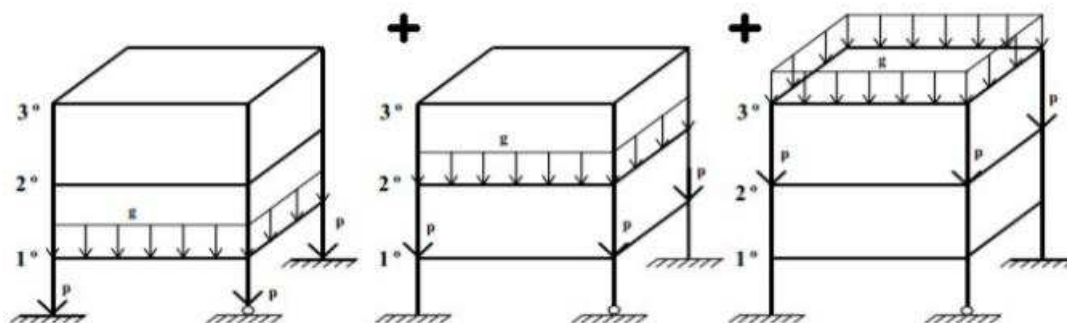
2.4.2 Análise estrutural evolutiva (AEE)

A análise estrutural evolutiva é uma análise estática não-linear, que leva em consideração o conceito de carregamento incremental, de tal forma que é possível simular o processo de construção da estrutura, analisando sua resposta em termos de esforços, deslocamentos e reações de apoio para todas as etapas da construção, considerando-se a concretagem de cada pavimento e a aplicação das ações correspondentes a cada etapa. Desta forma, é possível computar a redistribuição de esforços e os deslocamentos sofridos pela estrutura a cada etapa.

Este tipo de análise é particularmente interessante no caso de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, pois à medida que a protensão é aplicada, os elementos de concreto, tanto lajes como pilares, se deformam, ocorrendo redistribuição de esforços à medida que a construção evolui. As respostas da estrutura computadas por este método correspondem de forma mais realística ao que ocorre com a estrutura real, quando comparada à análise clássica.

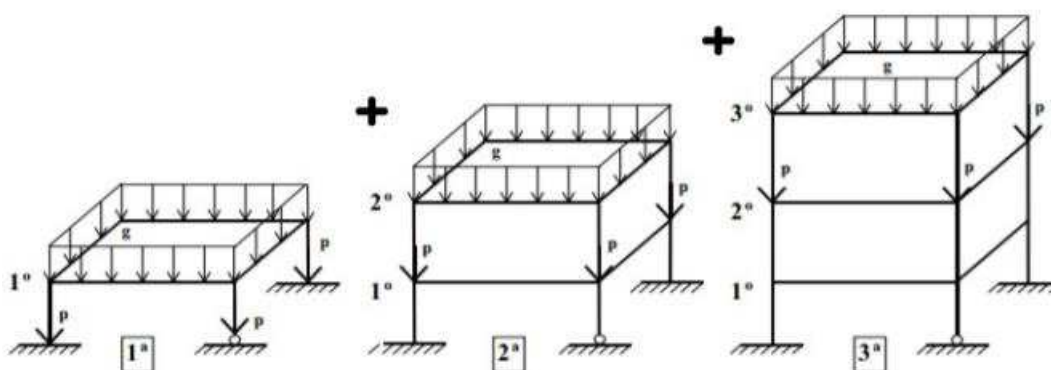
De acordo com o Manual da TQS, a grande diferença entre a AEE e a AC está na forma como os deslocamentos são tratados (ver Figura 10 e Figura 11), pois na análise evolutiva as cargas atuantes em um referido andar não geram tensões e deslocamentos em um andar superior, que ainda não foi construído. Desse modo, quando os deslocamentos do andar inferior já tiverem ocorrido devido ao seu carregamento, na análise da próxima etapa com o andar superior, devem-se considerar nulos todos os carregamentos do inferior e utilizar o princípio da superposição de efeitos.

Figura 10 – Edifício com três análises considerando a análise clássica.



Fonte: Manual da TQS <www.docs.tqs.com.br> (acesso em março de 2020).

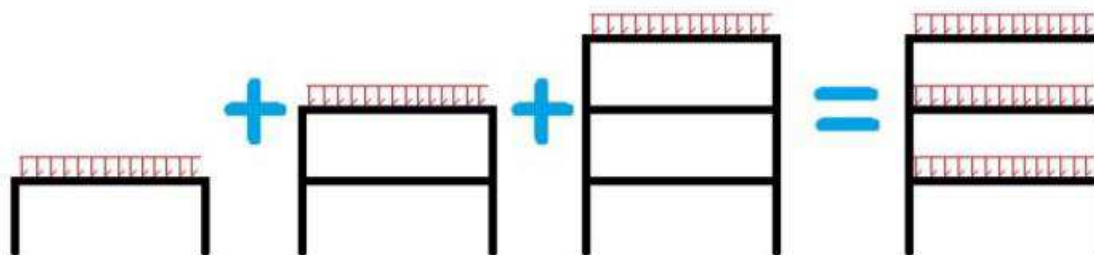
Figura 11 - Edifício com três análises considerando a análise estrutural evolutiva.



Fonte: Manual da TQS <www.docs.tqs.com.br> (acesso em março de 2020).

Um exemplo simples de como uma estrutura é analisada com efeito incremental é apresentado na Figura 12. Trata-se de um pórtico plano com três pavimentos. A única carga aplicada seria o peso próprio dos pavimentos.

Figura 12 – Análise estrutural evolutiva – pórtico de 3 pavimentos apenas com seu peso próprio.

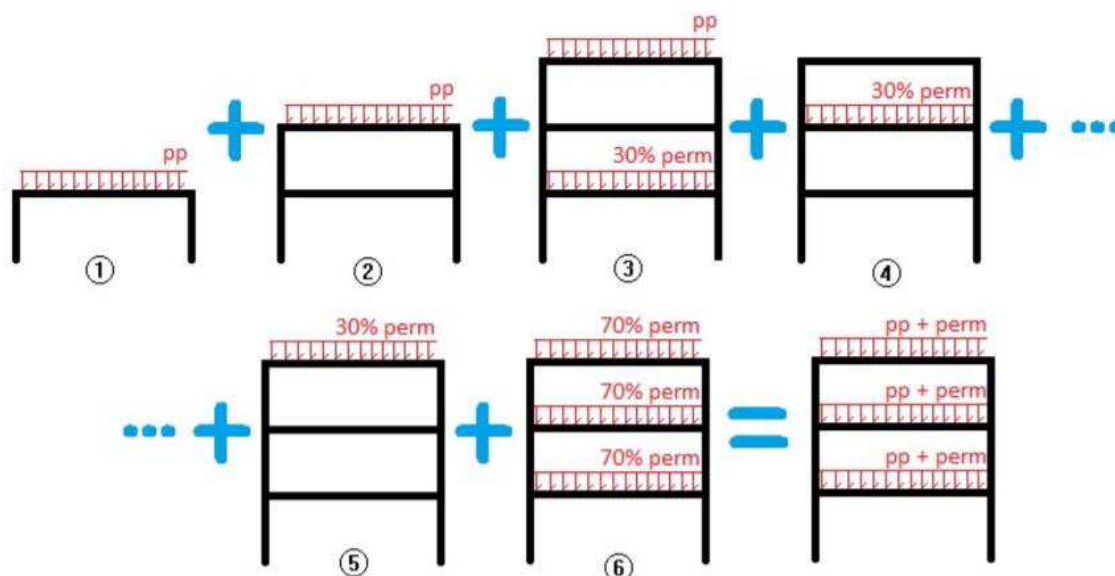


Fonte: Manual da TQS <www.docs.tqs.com.br> (acesso em março de 2020).

Observa-se que conforme os pavimentos são "montados", o carregamento de peso próprio é aplicado. É importante lembrar que o carregamento aplicado em um pavimento não gera esforços em pavimentos que ainda não foram "montados". Para cada uma destas três estruturas iniciais é realizado o processamento de esforços. Deste modo, através da superposição de esforços, obtém-se os resultados finais da estrutura.

Verifica-se que a AEE demanda um custo computacional muito maior do que a AC, pois à medida que se adicionam etapas de construção e carregamentos no modelo, aumenta-se o número de processamentos da estrutura que são realizados a cada etapa, cujos resultados deverão ser somados para se obter os valores finais de esforços e deslocamentos da estrutura. Para ilustrar essa particularidade, um exemplo um pouco mais complexo é apresentado na Figura 13. Neste exemplo tem-se a mesma estrutura da Figura 12, porém com dois carregamentos distintos: peso próprio e carga permanente. O peso próprio é aplicado, obviamente, no momento de montagem do pavimento. Já o carregamento permanente é aplicado em duas parcelas: 30% dele duas fases após a "montagem" do pavimento e o restante na fase final. Neste exemplo considera-se o ciclo de concretagem de cada pavimento a cada 7 dias.

Figura 13 - Análise estrutural evolutiva – pórtico de 3 pavimentos com peso próprio e carga permanente.



Fonte: Manual da TQS <www.docs.tqs.com.br> (acesso em março de 2020).

É possível observar que a aplicação de partes da carga permanente em etapas distintas fez com que fosse necessária a criação de mais dois modelos, além de um modelo específico para a fase final. A superposição de efeitos destes 6 modelos permite a obtenção dos esforços solicitantes da estrutura. Também é possível considerar a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo.

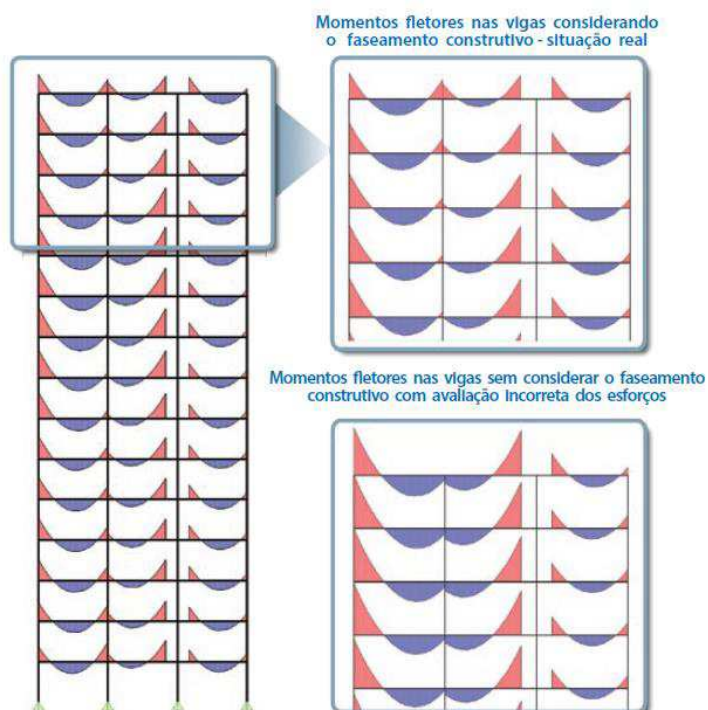
Ao se utilizar a análise evolutiva, é importante que o engenheiro estrutural conheça o cronograma de construção da obra, pois a análise estrutural depende diretamente de como cada fase da obra será construída. Com base neste cronograma, são definidas as etapas de construção e carregamento.

É recomendável utilizar a AEE em edifícios com lajes lisas protendidas, especialmente as de grande comprimento, devido aos diversos fenômenos envolvidos, variáveis com o tempo, que afetam a resposta da estrutura.

É importante utilizar AEE em edifícios com vigas de transição. Nestes casos, se as etapas da construção são ignoradas, as ações de projeto são introduzidas na estrutura completa, o que não ocorre na realidade, e os esforços que surgem na viga de transição são subestimados.

O efeito evolutivo também é importante na análise de edifícios altos, onde as tensões nos pilares devidas às ações verticais podem apresentar valores bem distintos, podendo gerar deformações axiais diferenciais entre os pilares. Essas tensões são maiores quando se utiliza a análise clássica, especialmente nos pavimentos superiores, quando comparadas às deformações obtidas por uma análise evolutiva. A não consideração do efeito incremental da construção certamente leva a valores incorretos de momentos fletores em vigas e lajes ligadas aos pilares. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Diferença no cômputo dos momentos fletores em edifícios altos com análise evolutiva.

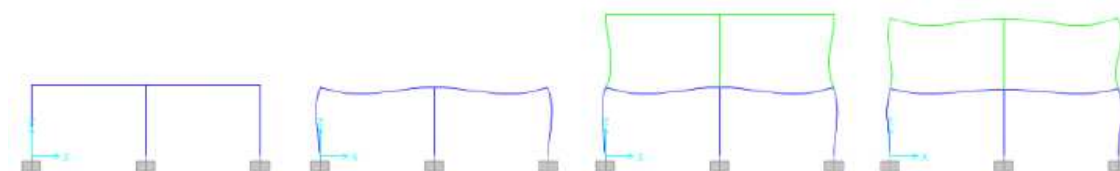


Fonte: Computers & Structures Inc – SAP2000.

Conforme explicado por Ferreira (2017), ao inserir novos elementos, os novos nós são alocados na posição da estrutura indeformada, ou seja, os novos nós são posicionados em suas coordenadas de projeto. Portanto, ao se adicionar os elementos na estrutura já deformada, os novos elementos possuirão comprimento diferente do que teriam na análise

com a estrutura pronta. Isto ocorre para compensar a deformação sofrida pela estrutura em cada etapa de construção, situação que visa simular o que ocorre durante a construção. Um exemplo disto ocorre quando existe deformação axial diferencial entre os pilares; ao se executar um novo pavimento, este estará nivelado, compensando eventuais recalques diferenciais ocorridos até então.

Figura 15 - Representação das etapas na análise incremental no SAP2000.



Fonte: Ferreira (2017).

2.5 COMPORTAMENTO DE LAJES PROTENDIDAS SOB EFEITO DA RESTRIÇÃO AO ENCURTAMENTO DEVIDO ÀS ESTRUTURAS DE APOIO

2.5.1 Generalidades

Lajes protendidas com pós-tração sofrem encurtamentos devido à compressão elástica do concreto no ato da protensão, devido à retração e à fluência do concreto e, eventualmente, devido à diminuição da temperatura ambiente. As estruturas de apoio, principalmente as de grande rigidez como pilares-parede, cortinas e núcleos rígidos, podem restringir esses encurtamentos da laje.

Quanto maior o comprimento da laje e maior a rigidez dos apoios, mais importantes são os problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje.

Aalami (2016a) sugere as seguintes diretrizes a serem seguidas nos projetos de lajes protendidas de grandes comprimentos:

- em lajes protendidas com comprimento inferior a 76 metros, deve-se dimensionar a estrutura considerando os efeitos de restrição ao encurtamento da laje;
- em lajes protendidas com comprimento entre 76 e 114 m, deve-se utilizar faixas de concretagem (*delay strip* ou *pour strip*);
- para lajes com comprimento superior a 115 m, deve-se proporcionar juntas de separação estrutural para reduzir os possíveis problemas relacionados com as fissuras de restrição ao encurtamento da laje.

A junta de construção pode ser uma junta em que há uma separação completa da laje durante toda a vida útil da mesma, ou pode ser uma faixa de concretagem posterior (*delay strip* ou *pour strip*), de forma que a laje fica dividida em duas partes que se

deformam independentemente durante um determinado período de tempo; posteriormente, esta faixa é concretada.

De acordo com Loureiro (2006), a largura da faixa de concretagem é normalmente de 1,0 m, de modo a permitir que se execute a protensão dos cabos que ali terminam, tanto de um lado como do outro da laje. As lajes devem permanecer escoradas e as faixas só devem ser concretadas de 30 a 60 dias após a protensão, para permitir que parte das deformações devidas à retração e à deformação lenta do concreto ocorram nesse período.

A restrição ao encurtamento exercida pelas estruturas de apoio origina esforços de tração na laje, que podem levar à formação de fissuras (denominadas fissuras de restrição). Como consequência natural desses efeitos, pelo princípio da ação e reação, a restrição ao encurtamento da laje introduz esforços adicionais de momento fletor e força cortante nas estruturas de apoio.

Tanto o leiaute como a rigidez das estruturas de apoio influenciam no comportamento de lajes protendidas, principalmente as de grandes dimensões, na medida em que esses elementos estruturais de apoio restringem as deformações da laje.

Em resumo, os problemas relacionados à restrição ao encurtamento de lajes protendidas podem provocar fissuras de restrição e uma descompressão no plano da laje, bem como esforços adicionais nos pilares, podendo comprometer o desempenho da estrutura, tanto em relação aos ELS, quanto em relação aos ELU.

2.5.2 Efeitos da restrição ao encurtamento de lajes protendidas relacionados ao ato da protensão

No momento da protensão, uma laje protendida sofre, de imediato, um encurtamento elástico. Pilares, paredes e cortinas, concretados monoliticamente com a laje, tendem a restringir essa deformação, podendo afetar a pré-compressão da laje. Parte da força horizontal de compressão introduzida no concreto pela protensão é absorvida por esses elementos. Dessa forma, a força de protensão que efetivamente atua na laje é igual à força aplicada aos cabos menos as forças horizontais absorvidas pelos elementos verticais, devido à rigidez à flexão desses elementos (LOUREIRO, 2006). Em outras palavras, a restrição ao encurtamento da laje no ato da protensão de um dado pavimento, provocada pelos pilares, gera uma descompressão na laje daquele pavimento, pois parte da força de pré-compressão aplicada nele é desviada para as lajes dos pavimentos previamente concretados. Esta retenção da força de pré-compressão da laje e o desvio de parte da força para outros pavimentos é causada pelos elementos verticais da estrutura que, por consequência, sofrem esforços adicionais de flexão e cisalhamento. Essa

redistribuição das forças horizontais de pré-compressão entre os pavimentos aplicadas no plano da laje somente pode ser observada por meio de uma análise estrutural que considere as etapas construtivas, como pode ser verificado nos trabalhos de Fintel e Ghosh (1978) e Guo, Joseph e Darwin (2013).

Outro fato que evidencia a importância da AEE é que durante a fase construtiva a estrutura é solicitada por ações de grande magnitude, como a protensão, o peso próprio da estrutura de concreto e das alvenarias, usualmente antes que o concreto tenha atingido a resistência e o módulo de elasticidade de projeto. Então, a análise considerando as etapas da construção e a introdução adequada das parcelas do carregamento, ao mesmo tempo em que se considera a evolução das propriedades do concreto, permite estimar a resposta da estrutura em bases mais realistas, determinante para a correta verificação dos ELU e ELS.

Os esforços adicionais provocados pela restrição ao encurtamento da laje no momento da protensão dos cabos fazem parte dos chamados esforços hiperestáticos de protensão. Conceitualmente, reações hiperestáticas de protensão são provocadas por causa de uma restrição à livre deformação da viga ou da laje no ato da protensão, devido às estruturas de apoio (pilares, pilares-paredes e núcleos rígidos), dando origem a momentos fletores e esforços cortantes adicionais. Esse fato é denominado efeito hiperestático de protensão, que foi explicado com mais detalhes em Aalami (1998)

De acordo com Guo, Joseph e Darwin (2013), pode-se separar os efeitos hiperestáticos em dois tipos: aqueles devidos às reações verticais hiperestáticas de protensão, induzidas pelas cargas balanceadas verticais provenientes do perfil vertical do cabo, e aqueles efeitos hiperestáticos provocados pelas reações horizontais hiperestáticas (no plano da laje/viga), induzidas pelas forças de pré-compressão da laje/viga decorrentes das reações horizontais nas ancoragens dos cabos. O primeiro tipo de efeito hiperestático pode ser calculado tanto pelo método direto quanto pelo método indireto (conforme demonstrado por Aalami, 1998) e normalmente esses efeitos já são implementados na maioria dos softwares de análise de estruturas protendidas com pós-tração. O segundo tipo de efeito hiperestático reflete a possibilidade de que uma parte da força de pré-compressão da laje/viga aplicada pelas ancoragens dos cabos pode ser redirecionada para os pisos de outros pavimentos por meio dos pilares, introduzindo momentos fletores e esforços cortantes nos elementos verticais. No entanto, até o presente momento este segundo tipo de efeito hiperestático normalmente é ignorado.

Além disso, sabe-se que, assim como a ABNT NBR 6118:2014, as normas internacionais determinam que os momentos hiperestáticos de protensão devem ser considerados em estruturas estaticamente indeterminadas para verificações de ELU. No entanto, de acordo com Guo, Joseph e Darwin (2013), as normas parecem focar apenas nos momentos hiperestáticos provocados pelas cargas verticais equivalentes de protensão e negligenciam os efeitos hiperestáticos de protensão provocados pelas forças horizontais nas ancoragens dos cabos. Ou seja, considera-se que os elementos verticais da estrutura têm um efeito desprezível na força de pré-compressão da laje.

Na prática, geralmente se assume que a tensão de pré-compressão da laje seja igual à força efetiva dos cabos dividida pela seção transversal da laje/viga. Ou seja, desconsidera-se a retenção das forças de pré-compressão da laje devido às estruturas de apoio.

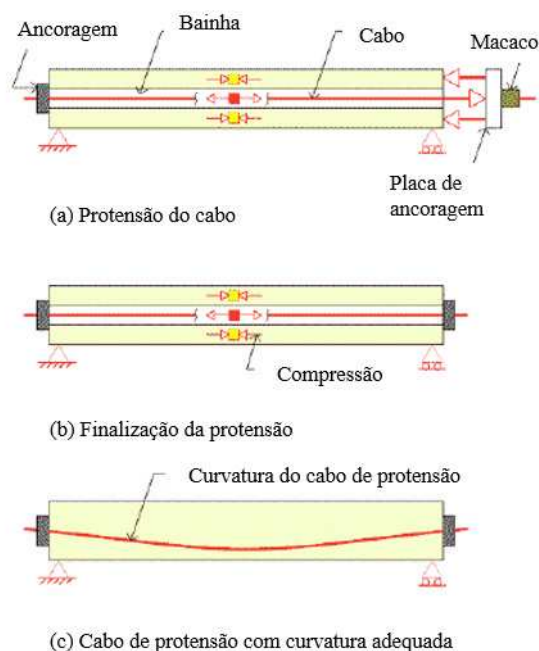
Guo, Joseph e Darwin (2013) afirmaram que não tinham conhecimento até o momento de um software comercial de análise de estruturas com lajes/vigas protendidas que levasse em consideração esse efeito da retenção da protensão devido aos pilares e redirecionavam essas forças retidas para os outros pavimentos. Em geral, os softwares de dimensionamento de estruturas protendidas analisam pórticos equivalentes de pavimentos isolados, ou uma laje como placa, com os pilares dos pavimentos inferior e superior com suas extremidades engastadas. Consequentemente, o redirecionamento das forças horizontais de protensão para outros pavimentos provocado pelos pilares não é considerado.

Além disso, os efeitos hiperestáticos nos pilares provocados por estas forças horizontais de protensão são calculados de forma simplificada, por não se levar em conta o modelo estrutural do edifício como um todo.

Vale enfatizar que, de acordo com Guo, Joseph e Darwin (2013), o procedimento de considerar a força de pré-compressão na laje igual à força efetiva de protensão nos cabos é razoável em vários casos, porém, desconsiderar os efeitos hiperestáticos devido às forças horizontais de protensão em alguns casos pode levar a resultados divergentes da realidade, tanto para verificações de serviço, quanto para verificações de ruptura. Em edifícios de múltiplos pavimentos, a quantidade de força horizontal de protensão que é redirecionada do piso de interesse para outros pavimentos por meio dos pilares pode ser considerável, dependendo de algumas condições de contorno, gerando esforços importantes de flexão nos pilares e uma descompressão significativa na laje/viga protendida.

Para compreender melhor o fenômeno da restrição ao encurtamento da laje/viga protendida, considere-se a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Nas estruturas protendidas com pós-tração, como é o caso de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas, as cordoalhas são protendidas e ancoradas na própria laje, após o concreto alcançar uma resistência adequada (**Erro! Fonte de referência não encontrada.a**). A força de tração aplicada nas cordoalhas é transferida para a laje de concreto como força de compressão, causando um encurtamento da laje (**Erro! Fonte de referência não encontrada.b**). Na maioria das aplicações, os cabos de protensão possuem uma curvatura adequada que gera um carregamento vertical equivalente (**Erro! Fonte de referência não encontrada.c**). Esse carregamento vertical resulta em esforços de flexão contrários aos provocados pelas ações de peso próprio e cargas permanentes, reduzindo, assim, os esforços de flexão da laje.

Figura 16 - Fundamentos das estruturas protendidas com pós-tração.

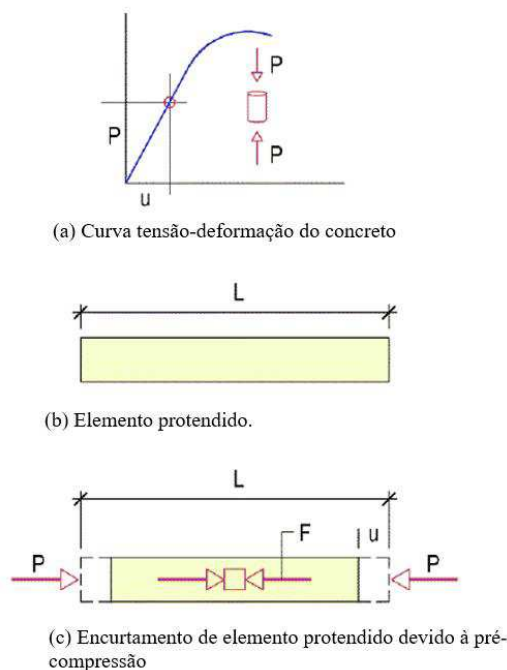


Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Como o concreto não é um material completamente rígido, a força de protensão P (ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) provocará um encurtamento do elemento estrutural devido à pré-compressão, caso a estrutura não tenha nenhuma restrição à deformação axial. A relação entre as tensões de compressão e as deformações é regida pelas propriedades do concreto, cuja curva tensão-deformação possui aspecto similar ao apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.a**. Em síntese, a força de

protensão P resultará numa tensão de compressão F que provocará um encurtamento u no elemento estrutural (**Erro! Fonte de referência não encontrada.c**).

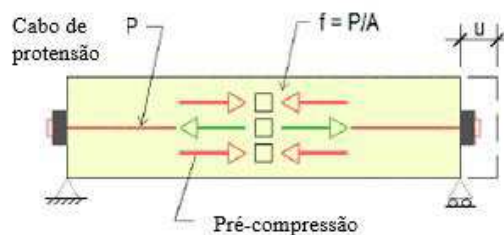
Figura 17 - Pré-compressão e encurtamento de elemento protendido.



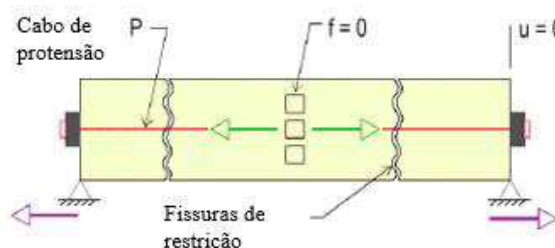
Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Nas construções em geral, os elementos protendidos com pós-tração, como lajes e vigas, são suportados por pilares, pilares-paredes, cortinas ou núcleos rígidos. Estes elementos verticais de apoio podem restringir o encurtamento livre dos elementos protendidos durante a protensão dos cabos. A menos que a laje ou a viga tenha total liberdade para encurtar em decorrência da força de protensão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.a**), o elemento estrutural não receberá a totalidade da força de pré-compressão.

Figura 18 - Elementos protendidos sem restrição ao encurtamento e com restrição ao encurtamento.



(a) Elemento protendido sem restrição ao encurtamento.



(b) Elemento protendido com restrição ao encurtamento.

Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Hipoteticamente, se os suportes impedissem qualquer encurtamento (**Erro! Fonte d e referência não encontrada.**b), toda a força de protensão seria desviada para as estruturas de apoio, deixando a laje ou a viga sem pré-compressão. O fato de não se levar em conta a restrição ao encurtamento de elementos protendidos com pós-tração, devido à rigidez dos elementos verticais de apoio, durante a fase de projeto, pode levar a problemas estruturais, tais como fissuração ou ruptura da estrutura.

De acordo com Aalami (2016a), além dos possíveis problemas estéticos, as fissuras de restrição podem causar infiltrações na laje e expor as armaduras passivas ao processo de corrosão, prejudicando o elemento estrutural frente aos ELS. Mais importante ainda, as fissuras de restrição podem reduzir a contribuição dos cabos de protensão na capacidade resistente da laje, prejudicando o seu comportamento frente aos ELU.

É importante entender que há uma diferença entre a força efetiva de pré-compressão da laje e a força efetiva de protensão nos cabos. Como pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, independente do grau de restrição ao encurtamento, a força efetiva no cabo de protensão se mantém igual a P , ou seja, a restrição ao encurtamento da laje não provoca perda de protensão no cabo. Consequentemente, quando o cabo possui um perfil parabólico, as cargas verticais equivalentes de protensão não são alteradas. Por outro lado, à medida que se aumenta o grau de restrição ao encurtamento da laje, a força efetiva de pré-compressão da laje é menor, pois parte dessa força é desviada para as estruturas de apoio.

Para as verificações de tensões em relação aos ELS, utilizam-se as equações da resistência dos materiais (Eq. 01). Como é possível observar, é comum adotar a aproximação de que a força de pré-compressão da laje seja igual à força de protensão nos cabos (P), de forma que a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sigma = -\frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e}{W} \pm \frac{M}{W} \quad (01)$$

No entanto, no primeiro termo a força P refere-se à força efetiva de pré-compressão da laje e no segundo termo a força P é a força efetiva de protensão no cabo. Esses valores são iguais somente quando não há restrição ao encurtamento da laje. Dependendo do grau de restrição ao encurtamento, esses valores podem ser diferentes e a equação deve ser escrita de forma a evidenciar essa diferença (Eq. 02).

$$\sigma = -\frac{P_{laje}}{A} \pm \frac{P_{cabo} \cdot e}{W} \pm \frac{M}{W} \quad (02)$$

Comprova-se, portanto, que a restrição ao encurtamento da laje interfere no comportamento em serviço da laje. Apesar desse efeito não interferir na carga vertical equivalente de protensão, uma descompressão da laje pode levar ao aparecimento de tensões de tração em sua seção transversal. Quando essas tensões de tração superam as tensões resistentes do concreto, surgem fissuras que prejudicam a sua durabilidade.

Além disso, toda a teoria adotada na análise estrutural e no dimensionamento de lajes lisas protendidas bidirecionais é baseada na hipótese de que a laje está submetida a um estado biaxial de tensões. Ou seja, caso haja uma descompressão significativa da laje, a metodologia descrita por Alaami (2001) para o cálculo dos esforços solicitantes e verificações de ELS e ELU não poderá ser utilizada.

Por isso as normas exigem uma tensão de pré-compressão mínima em lajes lisas protendidas, pois além de promover esse estado biaxial de tensões em lajes bidirecionais, a pré-compressão da laje limita ou até elimina as tensões de tração na seção transversal e, conseqüentemente, extinguem a possibilidade de aparecimento de fissuras relacionadas a retração do concreto e a variações de temperatura.

A ABNT NBR 6118:2014 exige uma tensão mínima de pré-compressão média na laje de 1,0 MPa, após considerar todas as perdas de protensão. De acordo com Guo, Joseph e Bieberly (2009), o ACI 318-08 exige uma pré-compressão efetiva mínima de 0,86 MPa para lajes protendidas em geral. Para edifícios garagem, no entanto, exige-se uma pré-compressão efetiva mínima de 1,03 MPa para zonas de baixa agressividade

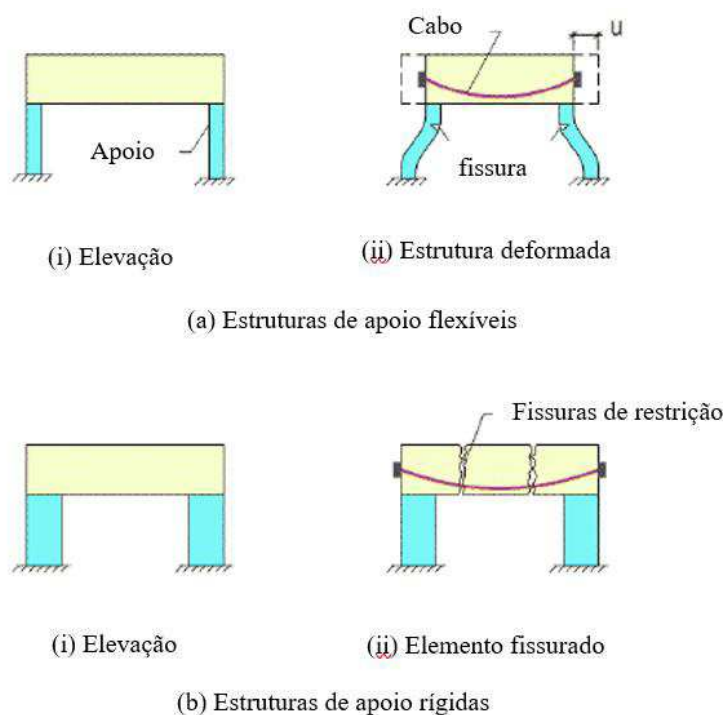
ambiental e 1,38 MPa para zonas com uma agressividade ambiental maior, com o intuito de controlar o aparecimento de fissuras e, conseqüentemente, melhorar a durabilidade.

De acordo com Aalami (2016a), os problemas relacionados à restrição ao encurtamento das lajes protendidas são geralmente mais pronunciados no primeiro pavimento de um edifício de múltiplos andares. No primeiro pavimento, as estruturas de apoio geralmente são mais robustas e estão engastadas na fundação e, portanto, restringem fortemente o deslocamento e a rotação da laje. Nos pavimentos superiores, os efeitos da restrição das estruturas de apoio são menores, podendo até ser desprezados dependendo da configuração da estrutura e do pavimento considerado.

A quantidade, a espessura e o comprimento de fissuras de restrição em uma estrutura protendida com pós-tração depende de uma série de fatores, dentre eles a rigidez das estruturas de apoio. A Figura 19 ilustra duas situações extremas.

Na Figura 19a, o elemento protendido com pós-tração é suportado por apoios muito flexíveis, de forma que, no ato da protensão, encurta sob a pré-compressão, forçando os apoios a se deformarem. Isso pode resultar em fissuras nos apoios. Por outro lado, um elemento protendido com apoios muito rígidos terá uma maior restrição ao seu encurtamento, o que pode gerar fissuras de restrição (Figura 19b).

Figura 19 - Fissuração em estruturas protendidas devido ao encurtamento da laje/viga protendida.



Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Fissuras em lajes protendidas acontecem quando as tensões solicitantes de tração excedem a resistência à tração do concreto. A propagação e o tipo de fissuras no concreto

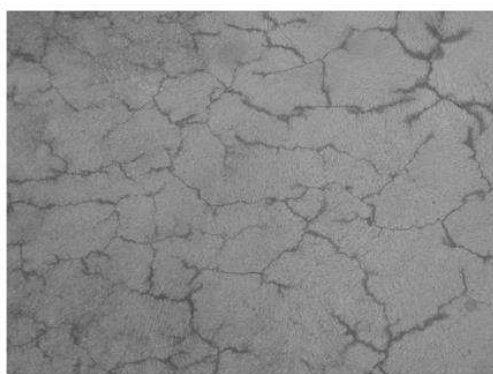
dependem do fator que desencadeou o processo e do detalhamento das armaduras passivas onde há fissuração.

De acordo com Aalami (2016a), para lajes protendidas com pós-tração, existem três tipos de fenômenos de fissuração que podem ser identificados, tais como:

- fissuras de retração – consistem em fissuras rasas, irregulares na superfície, causadas pela retração do concreto da laje em função de cura inadequada;
- fissuras de restrição – fissuras provocadas pela restrição ao encurtamento da laje devido às estruturas de apoio;
- fissuras de flexão – ocorrem quando o momento fletor solicitante excede o momento fletor de fissuração resistente da laje.

Normalmente, fissuras de restrição ocorrem em menor número do que os outros dois tipos, principalmente quando são utilizados cabos de protensão não aderentes. As fissuras de restrição são geralmente mais abertas, mais longas, mais espaçadas e mais profundas do que os outros dois tipos de fissuras. Em muitos casos, as fissuras de restrição atravessam toda a espessura da laje (AALAMI, 2016a).

Figura 20 - Fissuras de retração e fissuras de restrição em lajes protendidas.



(a) Fissuras de retração do concreto



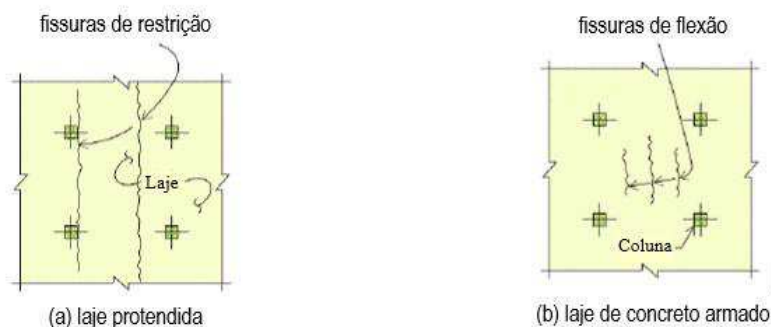
(b) Fissuras de restrição da laje

Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

De acordo com Aalami (2016a), em lajes de concreto armado, o espaçamento entre fissuras é da ordem de grandeza da espessura da laje, enquanto em lajes protendidas com pós-tração esse espaçamento geralmente é da ordem do vão da laje. Na maioria dos casos, existe apenas uma fissura por painel de laje. Além disso, as fissuras de restrição nas lajes pós-tensionadas geralmente não ocorrem nos locais de momentos fletores máximos, como no meio do vão, onde há o momento positivo máximo, ou na face das estruturas de apoio, onde ocorrem os momentos negativos máximos. Essas fissuras costumam ocorrer em locais axialmente fracos, como juntas de construção, faixas de

concretagem e onde há menos armaduras passivas, como no final das barras das armaduras negativas sobre os apoios, conforme ilustrado na Figura 21.

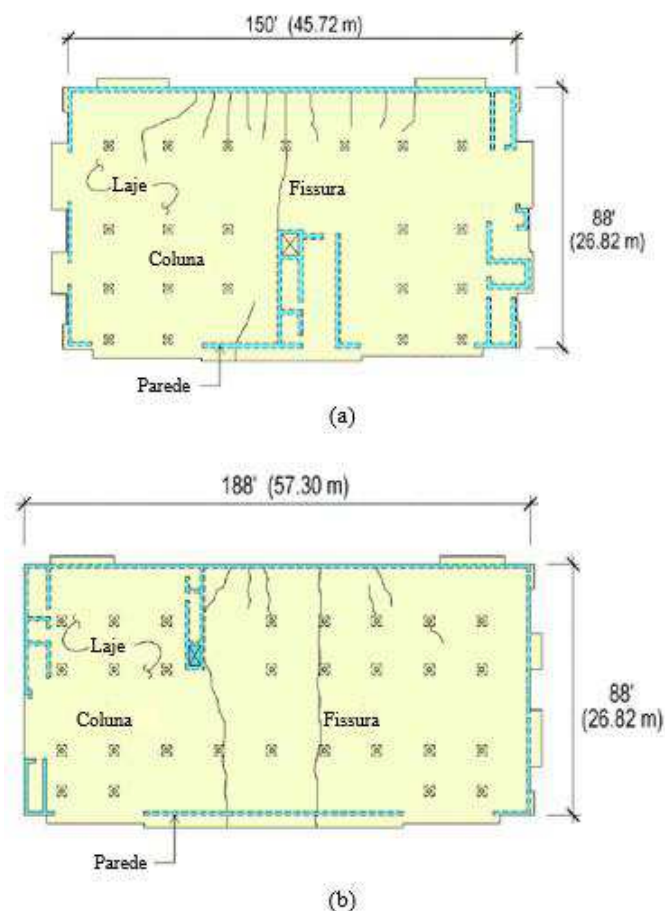
Figura 21 - Fissuras de restrição em lajes protendidas e fissuras de flexão em lajes de concreto armado.



Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Na Figura 22 são mostrados dois exemplos de pisos com fissuras de restrição típicas de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas. Nos dois exemplos, a laje apresentada é a primeira acima da fundação. As fissuras longas mostradas atravessaram toda a espessura da laje. Uma porção significativa da pré-compressão na direção mais longa foi desviada para as paredes de concreto laterais, levando a uma perda total de pré-compressão nessa direção entre as duas fissuras longas (Figura 22b).

Figura 22 - Fissuras de restrição em lajes protendidas em edifícios reais.



Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

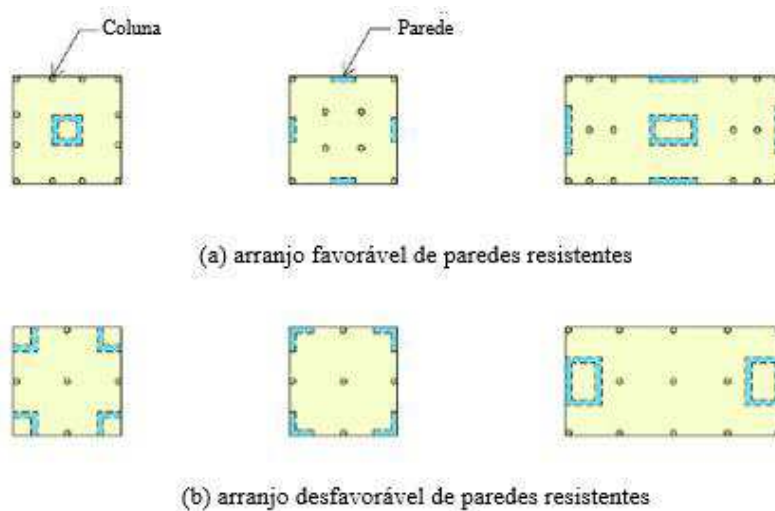
Para prevenir o surgimento de fissuras por restrições ao encurtamento da laje devido aos apoios e suas consequências, algumas medidas podem ser adotadas para permitir que a laje ou a viga protendida possa encurtar, minimizando os problemas de fissuras, tanto no elemento protendido, quanto nas estruturas de apoio.

Aalami (2016a) apresenta diversas técnicas construtivas para evitar manifestações patológicas relacionadas à restrição ao encurtamento de lajes protendidas, tais como juntas de separação; faixas de concretagem (*delay strips* ou *pour strips*); ligações laje/pilar flexíveis, temporárias ou permanentes, que permitam uma livre movimentação relativa no plano da laje; sugestões de arranjos de pilares mais adequados; e detalhamentos de armaduras passivas para controle das aberturas de fissuras.

O arranjo estrutural, notadamente o leiaute das estruturas de apoio, interfere diretamente na capacidade de deformação axial da laje e, caso os apoios sejam adequadamente posicionados, consegue-se amenizar os problemas gerados pela restrição ao encurtamento da laje.

Conforme ilustrado na Figura 23, em edifícios mais altos, em que há necessidade de se utilizar estruturas de contraventamento mais rígidas em relação às forças horizontais, o ideal é posicionar os pilares paredes e núcleos rígidos na região central do piso, de forma a evitar uma maior restrição ao encurtamento da laje. Caso sejam necessários pilares paredes nas extremidades do piso, o ideal é projetá-los de forma que a sua maior dimensão seja paralela à extremidade da laje.

Figura 23 — Exemplos de arranjos favoráveis e desfavoráveis de estruturas de contraventamento para mitigação de fissuras de restrição em pavimentos inferiores de edifícios de múltiplos andares.



Fonte: adaptado de Aalami (2016a).

Outro artifício interessante para amenizar os problemas relacionados ao encurtamento da laje é utilizar as faixas de concretagem (*delay strips* ou *pour strips*), principalmente em lajes protendidas de grandes dimensões. Essas faixas de concretagem são aberturas na laje, deixadas sem concretar por um determinado período, para se dividir um segmento longo de laje em dois de menor comprimento. A faixa de concretagem deve possuir largura de aproximadamente 1 metro, para proporcionar espaço suficiente para o posicionamento do macaco para a protensão dos cabos que chegam de cada lado da faixa. O objetivo da faixa de concretagem é permitir que os segmentos de laje adjacentes a ela sofram uma certa quantidade de encurtamento, antes do espaço ser concretado. Após a concretagem da faixa, promove-se a continuidade dos dois segmentos de laje por meio de armaduras passivas, conforme ilustrado em Aalami (2016a) e Coelho (2020).

2.5.3 Efeitos da restrição ao encurtamento de lajes protendidas relacionados aos fenômenos de variação de temperatura, retração e fluência do concreto

Os problemas gerados pela restrição ao encurtamento de lajes lisas protendidas estão relacionados aos efeitos de curto prazo (compressão elástica do concreto no ato da

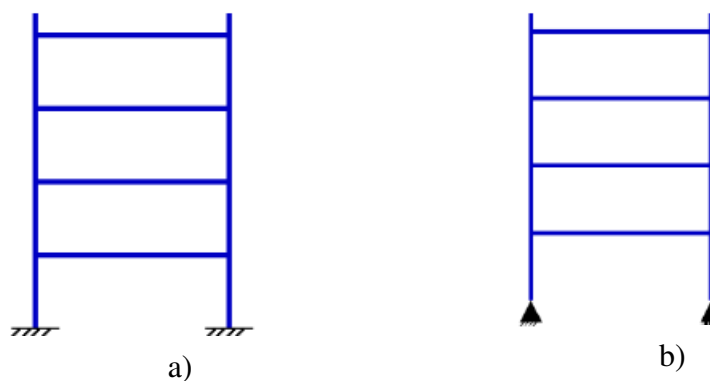
protensão) e também aos efeitos de longo prazo, como a variação da temperatura, a retração e a fluência do concreto.

As tensões e deformações provocadas pelas variações de temperatura, retração e fluência do concreto devem ser adicionadas aos efeitos das outras ações, como ações permanentes gravitacionais, sobrecargas de serviço e protensão. No entanto, esses efeitos de longo prazo somente provocam esforços internos se a estrutura for restringida contra a sua mudança volumétrica, o que geralmente ocorre em estruturas de edifícios de concreto moldado in loco com alto grau de hiperestaticidade.

De acordo com Aalami (2016b), em edifícios de múltiplos pavimentos, os pilares engastados na fundação provocam grandes restrições à livre deformação da laje e, à medida que se afasta da fundação, os esforços adicionais na estrutura provocados por essa restrição diminuem rapidamente.

Na Figura 24 é apresentado o esquema de um pórtico de um edifício de múltiplos andares. A ligação engastada entre o pilar e a fundação mostrada na Figura 24a gera esforços de restrição relacionados aos efeitos de longo prazo, enquanto a ligação ilustrada na Figura 24b não provoca restrição à livre deformação do pórtico como um todo, que é livre para girar e se mover lateralmente, não resultando em tais esforços adicionais.

Figura 24 - Elevação parcial de uma estrutura de concreto sujeita a uma variação uniforme de temperatura em todo o pórtico. a) Pilares engastados na fundação. b) Pilares com apoio do primeiro gênero na fundação.



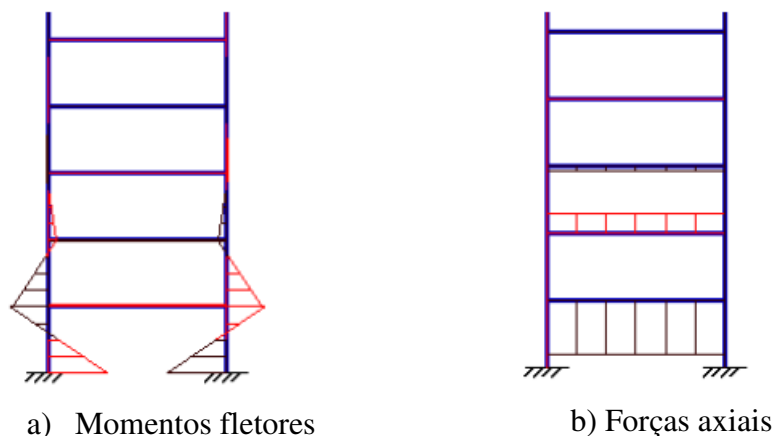
Fonte: adaptado de Aalami (2016b).

Na Figura 25 é ilustrado esse conceito para um pórtico de vários andares com os pilares engastados na fundação, sujeito a uma variação uniforme de temperatura. Observa-se que a partir da laje do segundo pavimento, os esforços provocados pela restrição ao encurtamento da laje devido aos pilares não serão mais significativos.

De acordo com Aalami (2016b), a distribuição mostrada na Figura 25 pressupõe que a estrutura responderá elasticamente e sem apresentar fissuração do concreto. Na prática, é provável que surjam pequenas fissuras nas ligações entre a laje e os pilares e ao

longo dos pilares. Essas fissuras aliviam os esforços adicionais gerados pela restrição ao encurtamento da laje devido à variação de temperatura, de forma que as estruturas de concreto raramente são submetidas ao nível de tensões internas que são calculadas a partir de uma análise elástica sem considerar a fissuração do concreto.

Figura 25 - Elevação parcial de uma estrutura de concreto com pilares engastados na fundação sujeita a uma variação uniforme de temperatura em todo o pórtico.



Fonte: adaptado de Aalami (2016b).

Vale frisar que esse comportamento da estrutura relacionado à variação de temperatura ao longo do tempo é semelhante ao comportamento da estrutura submetida aos fenômenos de retração e fluência do concreto.

2.6 ESTRATÉGIAS PARA A ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA DE MODELOS COM LAJES LISAS PROTENDIDAS

Atualmente existem alguns softwares de análise estrutural que permitem realizar análises estruturais evolutivas. Um deles é o SAP2000, que possui este tipo de análise implementada e designada como “*Non-Linear Staged Construction*”. Esta análise permite definir uma sequência de estágios em que se pode adicionar ou remover partes da estrutura, bem como aplicar determinadas ações a partes da estrutura. A sequência de etapas pode ser definida de acordo com o cronograma pré-estabelecido para a construção do edifício. A variação das propriedades constitutivas dos materiais ao longo do tempo também pode ser considerada, como, por exemplo, variação do módulo de elasticidade, da resistência, da fluência e da retração do concreto, como também a relaxação do aço de protensão.

A análise estrutural evolutiva é considerada um tipo de análise estática não-linear, porque a estrutura pode mudar durante o curso da análise. No entanto, a consideração da não-linearidade geométrica e de material é opcional.

Para se considerar a não-linearidade física dos materiais dentro do SAP2000, na aba “*Define Materials*”, deve-se ativar o item “*Show Advanced Properties*”. Ao se criar o material na janela “*Add Material Property*”, considerar a opção “*user*” para a região (*Region*) e a opção “*concrete*” para o “*Material Type*”. Na aba “*Material Property Options*”, deve-se clicar em “*Modify/Show Material Properties*”. Na aba que se abre, “*Material Property Data*”, conforme pode ser visto na Figura 26, são informadas as propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade inicial, a resistência característica aos 28 dias, o coeficiente de Poisson, o coeficiente de expansão térmica e a massa específica. Dentro desta aba, a opção “*Time Dependent Properties*” dá acesso à janela “*Time Dependent Properties for Concrete*” (Figura 27), eu permite escolher o modelo matemático a ser utilizado para computar a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo. Na versão 20 do SAP2000 estão disponíveis os modelos ACI 209R-92, AS 3600-2009, CEB-FIP (1990), FIB (2010), Eurocode 2-2004, GL2000, JTG D62-2004, NZS 3101-2006, ou pode-se configurar um modelo do usuário manualmente. Ativando as opções “*Modulus of Elasticity*”, “*Creep*” e “*Shrinkage*”, fica habilitada a consideração dos efeitos de variação do módulo de elasticidade, da fluência e da retração do concreto, respectivamente. Além disso, deve-se configurar a umidade relativa do ar, o tipo de cimento e a idade de início a considerar para o cálculo da retração do concreto.

Figura 26 – Janela de edição das propriedades do concreto no SAP2000 v20.

Material Property Data

Material Name: C30 - Laje

Material Type: Concrete

Symmetry Type: Isotropic

Modulus of Elasticity (E): 23760000

Weight and Mass: Weight per Unit Volume: 25, Mass per Unit Volume: 2.5

Units: KN, m, C

Poisson (U): 0.2

Coeff of Thermal Expansion (A): 9.900E-06

Shear Modulus (G): 9900000

Other Properties for Concrete Materials: Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 30000, Expected Concrete Compressive Strength: 30000

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor: []

Advanced Material Property Data: Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties..., Thermal Properties...

OK, Cancel

Fonte: (O autor, 2019).

Figura 27 – Janela de edição das propriedades dependentes do tempo do concreto no SAP2000 v20.

Time Dependent Properties for Concrete

Material Name: C30 - Laje

Material Type: Concrete

Symmetry Type: Isotropic

Time Dependent Type: CEB-FIP 2010

Units: KN, m, C

CEB-FIP 2010 Parameters: Relative Humidity, %: 75, Shrinkage Start Age, days: 5, Cement Type: 42.5N, Lightweight Concrete Grade: [], Lightweight Oven-dry Density, kg/m³: []

Time Dependence Considered For:

Item	Factor
<input checked="" type="checkbox"/> Compressive Strength and Stiffness (Modulus of Elasticity)	1
<input checked="" type="checkbox"/> Creep	1
<input checked="" type="checkbox"/> Shrinkage	1

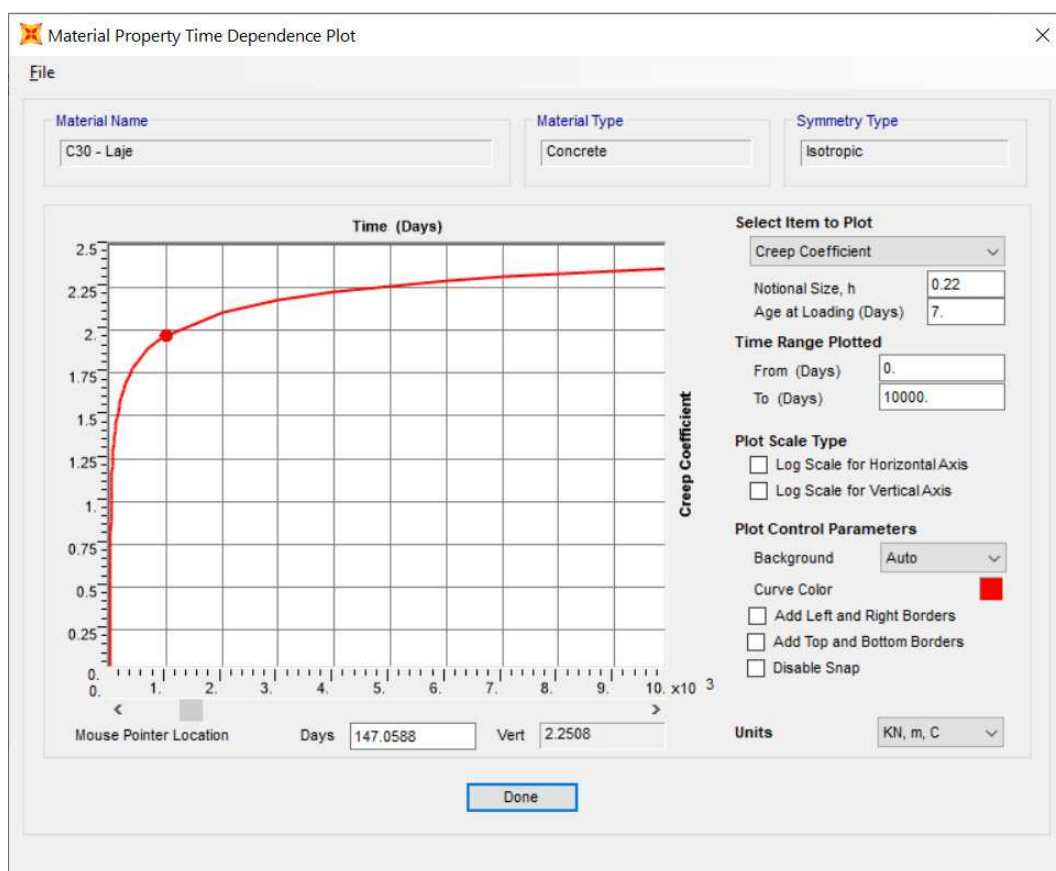
Creep Analysis Type: Full Integration, Dirichlet Series With [] Terms

Show Plot..., OK, Cancel

Fonte: (O autor, 2019).

Na janela “*Time Dependent Properties for Concrete*”, o botão “*Show Plot*” dá acesso à janela “*Material Property Time Dependence Plot*”, na qual é possível visualizar as curvas relativas aos parâmetros do concreto que variam ao longo do tempo (Figura 28). Nessa janela, deve-se informar a idade do concreto em dias na data de aplicação do carregamento (*Age at Loading*) e a espessura fictícia do elemento estrutural (*Notional Size*). Com isso, é possível obter diversos gráficos da variação das propriedades do concreto com o tempo, como resistência, módulo de elasticidade, coeficiente de retração e coeficiente de fluência.

Figura 28 – Janela para configuração das propriedades dependentes do tempo do concreto.



Fonte: (O autor, 2019).

Um procedimento semelhante à definição das propriedades do concreto deve ser adotado para a definição das propriedades do aço de protensão. Na janela “*Material Property Data*”, como pode ser visto na Figura 29, deve-se definir o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, o peso específico, a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento do aço de protensão. Acionando o botão “*Time Dependent Properties*” tem-se acesso à janela “*Time Dependent Properties for Tendon*”, na qual pode-se ativar a relaxação do aço (*Prestressing Steel Relaxation*). Ainda nessa janela, a opção 2 para a classe do aço (*CEB-FIP class*) representa as cordoalhas (ver Figura 30).

Para este parâmetro, o único modelo matemático disponível no SAP2000 v20 é o do CEB-FIP (1990).

Figura 29 – Janela de edição das propriedades do aço de protensão no SAP2000 v20.

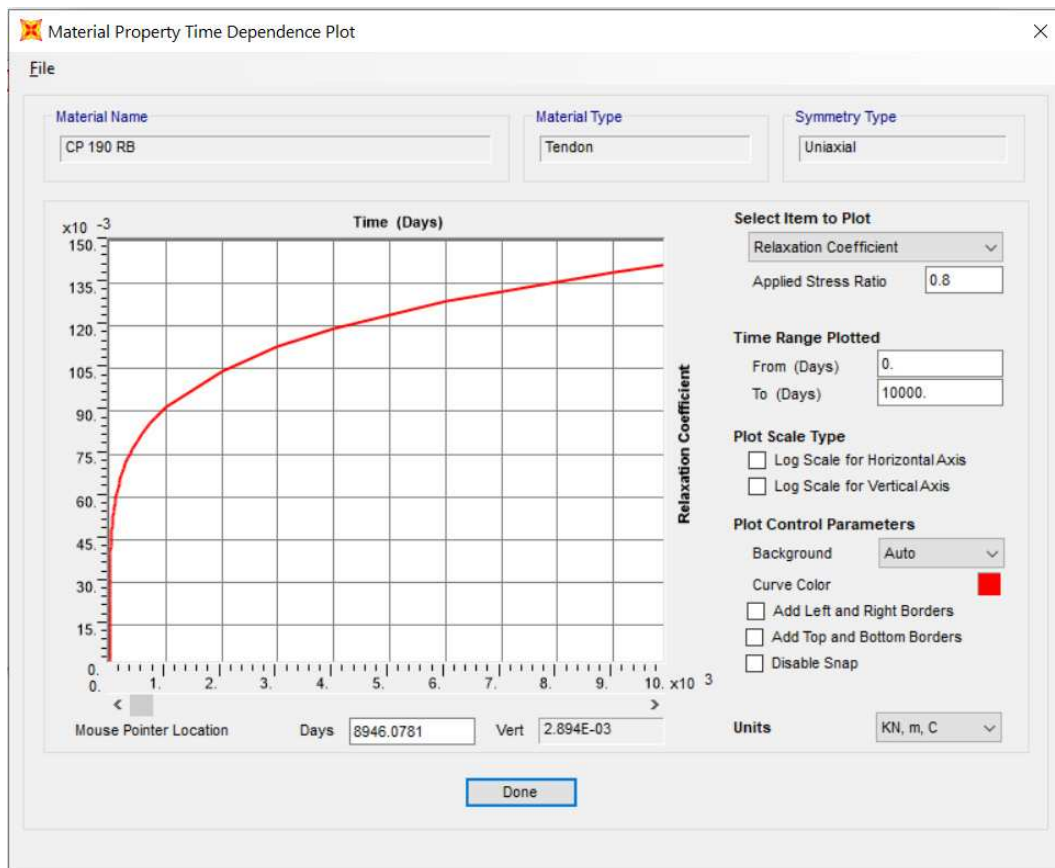
Fonte: (O autor, 2019).

Figura 30 - Janela de edição das propriedades dependentes do tempo do aço de protensão no SAP2000 v20.

Fonte: (O autor, 2019).

O botão “*Show Plot*” dá acesso à janela “*Material Property Time Dependence Plot*” referente ao aço de protensão, como ilustrado na Figura 31. Deve-se informar a razão entre a tensão inicial aplicada no cabo de protensão e a tensão de ruptura do cabo (*Applied Stress Ratio*) e o software, então, mostra o gráfico do coeficiente de relaxação do aço de protensão com o tempo.

Figura 31 - Janela para configuração das propriedades dependentes do tempo do aço de protensão.



Fonte: (O autor, 2019).

Após a definição dos materiais a serem utilizados no modelo, devem-se definir as seções transversais dos elementos estruturais. Em relação aos parâmetros de entrada das seções transversais das lajes e pilares, pode-se utilizar os mesmos parâmetros comumente utilizados em estruturas de lajes lisas de concreto armado modeladas no SAP2000 v20.

Para definir os parâmetros de entrada referentes aos cabos de protensão, devem-se seguir os comandos “*Define Seccion*” – “*Tendon Section*” – “*Add New Section*”. Abre-se a janela “*Tendon Section Data*”, conforme ilustrado na Figura 32. Deve-se nomear a seção e ativar a opção “*Model Tendon as Elements*”. Deve-se inserir o material do aço de protensão previamente definido e inserir o diâmetro ou a área do cabo de protensão.

Figura 32 – Janela de parâmetros de entrada das seções transversais dos cabos de protensão.

The image shows a software dialog box titled "Tendon Section Data". It is organized into several sections:

- Tendon Section Name:** A text field containing "2#12,7 mm". Below it is a "Section Notes" field and a "Modify/Show..." button.
- Tendon Modeling Options For Analysis Model:** Two radio buttons: "Model Tendon as Loads" (unselected) and "Model Tendon as Elements" (selected).
- Tendon Parameters:** A "Prestress Type" dropdown menu set to "Prestress" and a "Material Property" dropdown menu set to "CP 190 RB" with a "+" button to its left.
- Tendon Properties:** Four rows of input fields. The first row has a radio button for "Specify Tendon Diameter" (unselected) and a text field with "0.0159". The second row has a radio button for "Specify Tendon Area" (selected) and a text field with "1.974E-04". The third row has a text field for "Torsional Constant" with "6.202E-09". The fourth row has a text field for "Moment of Inertia" with "3.101E-09". The fifth row has a text field for "Shear Area" with "1.777E-04".
- Units:** A dropdown menu set to "KN, m, C".
- Display Color:** A cyan square.
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

Fonte: (O autor, 2019).

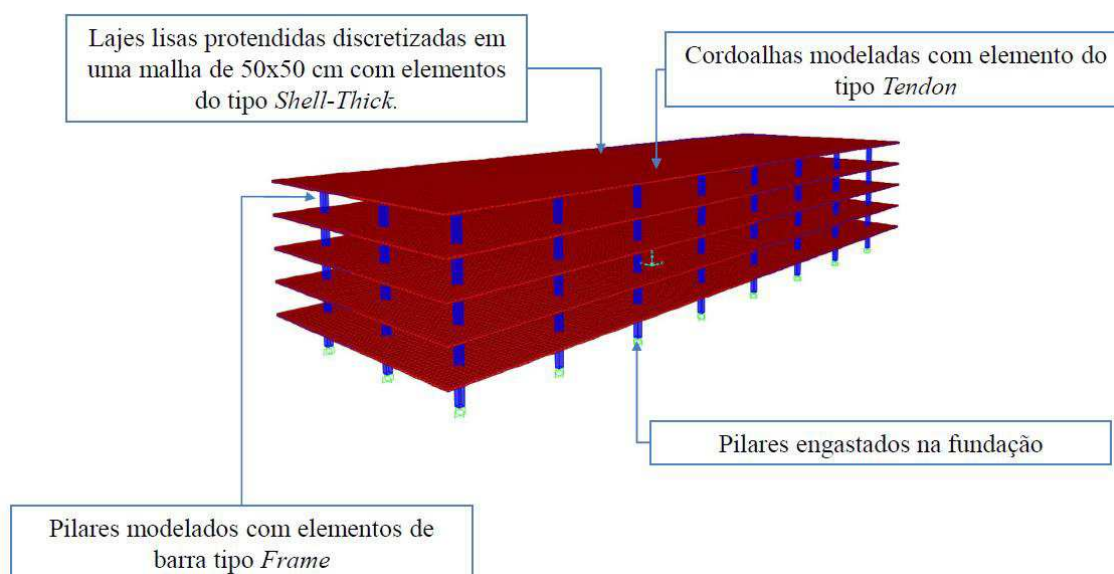
Os cabos de protensão no SAP2000 v20 podem ser definidos como elementos (*Model Tendon as Elements*) ou como carregamento equivalente de protensão (*Model Tendon as Loads*). Quando são definidos como elementos, o cabo é automaticamente discretizado em partes menores. Neste caso, deve-se fornecer a força ou tensão inicial do cabo no momento da protensão, os coeficientes de atrito entre o cabo e a bainha e o escorregamento do cabo nas ancoragens. Com isso, as perdas de protensão iniciais são automaticamente calculadas pelo software, que oferece de forma gráfica a variação da força de protensão ao longo do cabo. Além disso, quando se faz a AEE, as perdas de protensão progressivas também são calculadas, desde que se considere a não-linearidade física do concreto e se ative a relaxação do aço de protensão. Trata-se de um recurso avançado, em que é possível obter a força do cabo em qualquer coordenada do mesmo e em qualquer idade, levando-se em conta uma série de fenômenos dependentes do tempo,

como a retração e a fluência do concreto, a variação da temperatura e as etapas de construção e carregamento da estrutura.

Por outro lado, quando os cabos são definidos como carregamento equivalente, os efeitos dependentes do tempo não são considerados e as perdas de protensão progressivas devem ser fornecidas pelo usuário. Os efeitos da protensão, considerando os cabos como carregamento no SAP2000 v20, foram comparados com os resultados do método do balanceamento de cargas (Lin, 1963, *apud* Aalami, 1990) e os resultados obtidos foram idênticos.

Após a definição das seções transversais a serem utilizadas, são inseridos os elementos estruturais, montando a estrutura como um todo. As lajes são normalmente definidas com elementos do tipo *Shell-Thick*, em uma malha de 50x50 cm ou menor, e os pilares com elementos do tipo *Frame*, conforme ilustrado na Figura 33. Posteriormente modelam-se os cabos de protensão.

Figura 33 – Exemplo de modelo estrutural completo em elementos finitos de um edifício com lajes lisas protendidas no SAP2000 v20.

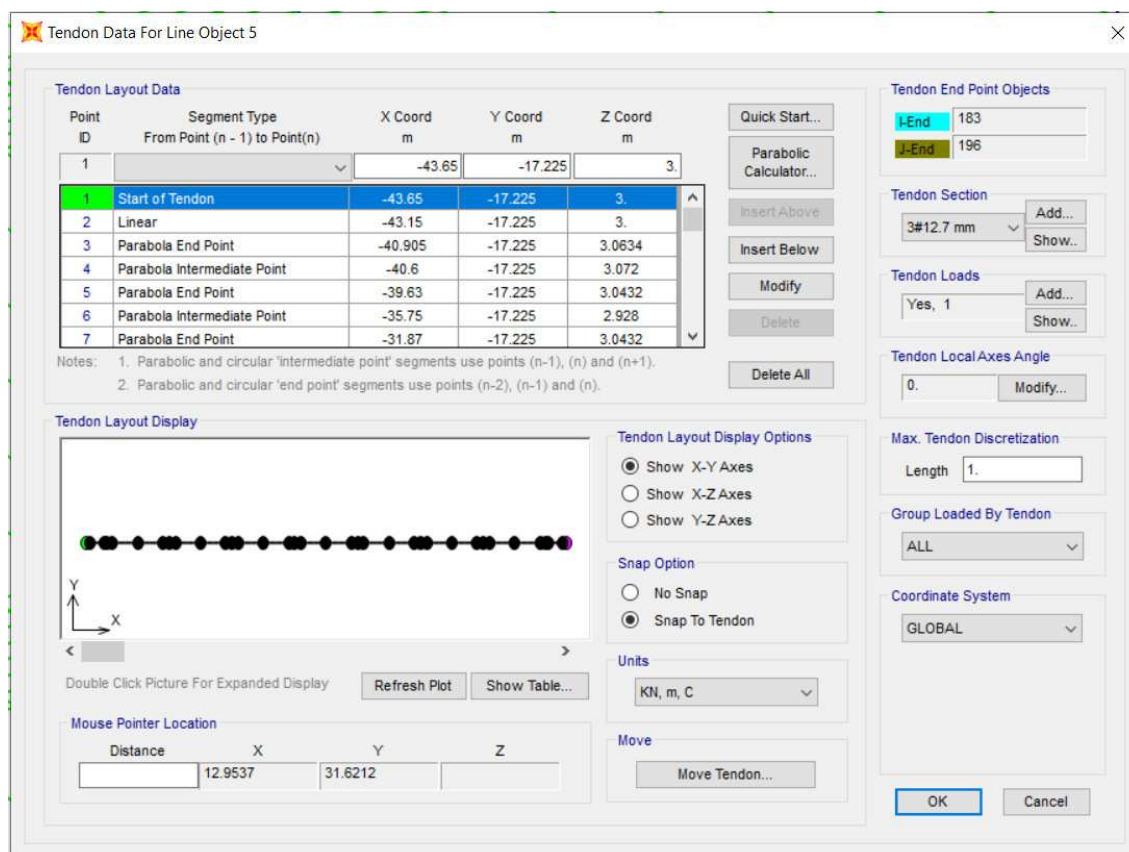


Fonte: (O autor, 2019).

No SAP2000 v20, os cabos de protensão são modelados como elementos do tipo *Tendon*. O traçado vertical dos cabos é definido fornecendo-se as coordenadas dos pontos inicial e final, além dos pontos de maiores excentricidades e de inflexão, ligando-os por retas ou parábolas. Para criar um cabo, usa-se o comando "*Draw Frame/Cable/Tendon*", selecionando a opção "*Tendon*" em "*Line Object Type*". Escolhe-se a seção transversal do cabo, previamente definida, e desenha-se uma reta no modelo fornecendo o ponto inicial e o ponto final do cabo. Uma vez criado o cabo, ao selecioná-lo com o *mouse* abre-

se uma janela para sua configuração (Figura 34). Nessa janela, na seção “*Tendon Layout Data*”, deve-se inserir as coordenadas dos pontos de maiores excentricidades e dos pontos de inflexão e ligá-los por retas ou parábolas. Deve-se adicionar os casos de carregamento a serem considerados clicando-se em “Add” em “*Tendon Loads*”.

Figura 34 – Janela de configuração do cabo de protensão no SAP2000 v20.



Fonte: (O autor, 2019).

Na janela “*Tendon Load*” (Figura 35), deve-se escolher o tipo de carregamento a ser utilizado, que é previamente definido na aba “*Load Patterns*”. Deve-se escolher se o cabo terá ancoragem ativa-ativa ou ativa-passiva na seção “*Jack From This Location*” e definir a força ou a tensão inicial de protensão no cabo. Na sequência, define-se o coeficiente de atrito dos cabos (*curvature coefficient*), o coeficiente de ondulação parasita do cabo (*wobble coefficient*) e o escorregamento na ancoragem (*anchorage set slip*). Dessa forma, o software calcula automaticamente as perdas de protensão imediatas. Na seção “*Other Loss Parameters*”, deve-se inserir zero em todos os itens, pois essas perdas de protensão progressivas são automaticamente computadas na análise estrutural, quando se utiliza uma análise estrutural evolutiva e se ativam os efeitos diferidos no tempo do concreto e do aço de protensão. Observa-se na Figura 36 um exemplo em 3D do traçado dos cabos em uma laje lisa protendida no SAP2000 v20.

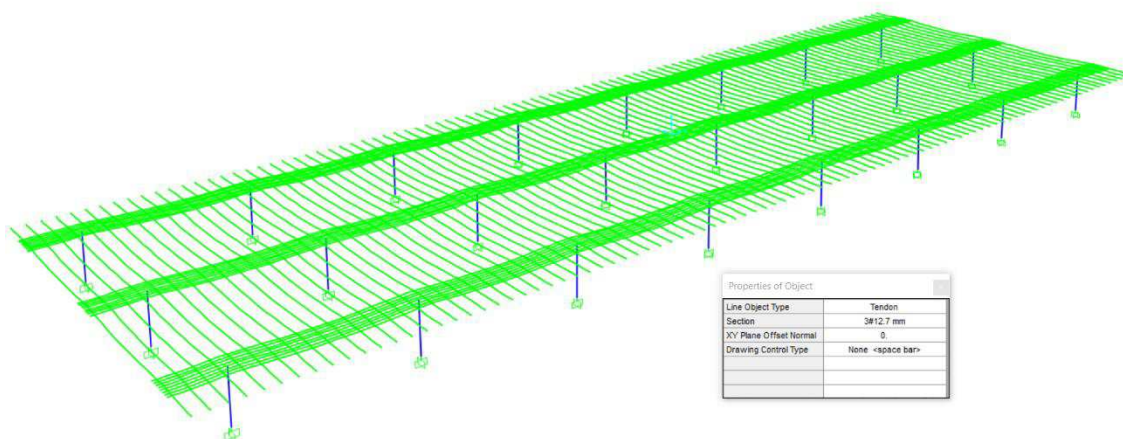
Figura 35 – Janela de configuração das cargas e perdas de protensão dos cabos no SAP2000 v20.

The 'Tendon Load' dialog box is configured as follows:

- Load Pattern Name:** PROT PAV1
- Units:** KN, m, C
- Jack From This Location:**
 - I-End (Start) of Tendon
 - J-End (End) of Tendon
 - Both Ends Simultaneously
- Load Type:**
 - Force
 - Stress
- Tendon Load:** Stress (KN/m2) = 1503000.
- Friction and Anchorage Losses:**
 - Curvature Coefficient (Unitless) = 0.05
 - Wobble Coefficient (1/m) = 0.0005
 - Anchorage Set Slip (m) = 6E-03
- Other Loss Parameters:**
 - Elastic Shortening Stress (KN/m2) = 0
 - Creep Stress (KN/m2) = 0
 - Shrinkage Stress (KN/m2) = 0
 - Steel Relaxation Stress (KN/m2) = 0
- Options:**
 - Replace Existing Loads
 - Delete Existing Loads
- Buttons:** Show Prestress Losses, OK, Cancel

Fonte: (O autor, 2019).

Figura 36 – Exemplo de traçado dos cabos de protensão em 3D no SAP2000 v20.



Fonte: (O autor, 2019).

Para realizar uma análise evolutiva no SAP2000 v20, é conveniente separar os diferentes elementos estruturais em grupos distintos, com o intuito de facilitar a entrada de dados para cada caso de carregamento. Por exemplo, os elementos finitos tipo *Shell*,

que representam as lajes de um determinado pavimento de um edifício, ou os diversos cabos de protensão de uma laje, ou os pilares de um determinado pavimento, podem ser adicionados em algum estágio como um grupo, e as ações a serem adicionadas nesse estágio podem ser aplicadas ao grupo deste pavimento, como pode ser visualizado na Figura 37.

Para realizar uma análise não-linear evolutiva no SAP2000 v20, deve-se criar um caso de carregamento (*Load Case*) e no menu tipo de análise (*Analysis Type*) selecionar “*Nonlinear Staged Construction*”. A partir disto, os recursos para a criação e edição de estágios (*Stage Definition*) ficam disponíveis (Figura 37).

Para cada caso de carregamento (*Load Case*) da análise estrutural evolutiva, é possível definir uma série de estágios, os quais são processados durante a análise estrutural na ordem em que são definidos. É possível definir quantos estágios se queira em um único caso de carregamento.

Para cada estágio, pode-se seguir os seguintes passos:

- definir um tempo de duração, em dias (adota-se um tempo de duração de cada estágio quando se ativa a variação das propriedades dos materiais com o tempo; caso não seja considerada a não-linearidade física dos materiais, pode-se considerar a duração igual a zero);
- adicionar qualquer número de elementos estruturais ao modelo (a idade dos objetos no momento em que são adicionados pode ser especificada, se os efeitos dependentes do tempo forem considerados);
- remover qualquer número de elementos estruturais do modelo;
- adicionar determinadas cargas na estrutura (*Load Patterns*) a qualquer elemento estrutural ou grupo de elementos estruturais;
- alterar as propriedades da seção (*Section Properties*) dos objetos para qualquer tipo de elemento (*Frame, Shell, Tendon e Link/Support*).

Figura 37 - Janela de configuração de um caso de carregamento do programa SAP2000 v20.

Load Case Name: INCREMENTAL PP+CP+SC+PROT

Load Case Type: Static

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Analysis Type: Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters: None

Stage No.	Duration (Days)	Provide Output	Output Label	User Comments
3	5.	Yes	Prot 1PAV	
1	3.	Yes	Pilares 1PAV	
2	6.	Yes	Laje 1PAV	
3	5.	Yes	Prot 1PAV	
4	3.	Yes	Pilares 2PAV	
5	6.	Yes	Laje 2PAV	
6	5.	Yes	Prot 2PAV	

Data for Stage 3 (5. days; Output: Prot 1PAV;):

Operation	Object Type	Object Name	Age At Add	Type	Name	Scale Factor
Add Structure	Group	CABOS PAV1	1.			
Add Structure	Group	CABOS PAV1	1.			
Load Objects if Added	Group	CABOS PAV1		Load Pattern	PROT PAV1	1.
Load Objects	Group	LAJE PAV1		Load Pattern	PP	1.

Other Parameters: Results Saved: End of Each Stage; Nonlinear Parameters: User Defined

Fonte: (O autor, 2019).

No exemplo ilustrado na Figura 37, pode-se verificar que no Estágio número 3 (*Stage* nº 3) na seção “*Stage Definition*”, adotou-se uma duração de 5 dias e o título desse estágio foi definido como “Prot 1PAV”, indicando que este estágio se refere à protensão da laje do primeiro pavimento. No quadro inferior, “*Data for Stage 3*”, criaram-se três operações (*Operation*) dentro do Estágio 3. Primeiro adicionou-se um elemento estrutural (*Add Structure*), definiu-se o tipo de elemento estrutural (*Object Type*), neste caso adicionou-se os cabos de protensão (*Tendon*), definiu-se o nome ou o número do objeto (*Object Name*), que eram formados apenas por um grupo de cabos denominado “CABOS PAV1”. A segunda operação (*Operation*) foi aplicar a força de protensão dos cabos (*Load Objects if Added*), definiu-se o tipo de objeto (*Tendon*), o nome ou número do objeto (*Object Name*), o tipo de carga (*Load Patterns*) e finalmente incluiu-se o nome da carga a ser adicionada, denominada “PROT T = 0 1PAV” (protensão no tempo $t = 0$ dos cabos do 1º pavimento), que foi previamente definida na aba *Load Patterns* do SAP2000 v20. Finalmente, a terceira operação do Estágio 3 foi considerar o peso próprio da laje. Definiu-se a operação (*Load Objects*), adicionou-se o tipo de objeto (*Object Type*) como grupo (*Group*) - neste caso agruparam-se previamente os elementos finitos tipo *Shell* da

laje em um único grupo denominado Lajes PAV1, definiu-se o nome do objeto (*Object name*) como LAJE PAV1, definiu-se o tipo (*Type*) como carga (*Load Patterns*), e incluiu-se o nome da carga a ser adicionada (PP), referenciando o peso próprio da estrutura, que foi previamente criada na janela *Load Patterns*.

Cada estágio da análise evolutiva é processado separadamente, na ordem em que as operações são definidas (ver Figura 37). O processamento de um estágio é dividido em duas fases: primeiramente, o modelo é analisado após as alterações na estrutura (adicionando, removendo ou alterando a seção transversal dos elementos estruturais) e aplicação das ações atuantes nesta primeira fase. Considera-se que esta fase ocorra instantaneamente e, portanto, não há variação da propriedade dos materiais ao longo do tempo; posteriormente, quando se considera a duração em dias de cada estágio, os efeitos da variação das propriedades dos materiais dependentes do tempo são então analisados. Durante esta segunda fase, mesmo que não haja mudança na estrutura e nem nas ações atuantes, devido aos efeitos da retração, fluência e variação do módulo de elasticidade do concreto, pode haver uma redistribuição de esforços entre os elementos estruturais.

Para se considerar os efeitos dependentes do tempo na análise estrutural evolutiva, deve-se acionar o botão *Modify/Show* da linha “*Non-Linear Parameters*” da Figura 37. Abre-se então uma aba denominada *Nonlinear Parameters* e deve-se ativar o item “*Time Dependent Material Properties*”.

2.7 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DEPENDENTES DO TEMPO

O cálculo do encurtamento das lajes lisas protendidas é fundamental para avaliar os esforços adicionais causados pela restrição à livre deformação da laje em decorrência das estruturas verticais de apoio. Dessa forma, a escolha dos modelos analíticos apropriados, que descrevam a variação das propriedades dos materiais com o tempo, interfere de forma significativa nos resultados de uma análise estrutural evolutiva, que considera a não-linearidade física dos materiais.

Guo e Joseph (2013a, 2013b) fizeram um estudo comparando 5 modelos matemáticos frequentemente utilizados para o cálculo do encurtamento de lajes protendidas, levando em conta os efeitos da fluência e da retração do concreto. Os 5 modelos comparados foram o B3 (proposto por Bažant, 1995), o GL2000 (proposto por Gardner, N. J. e Lockman, M. J., 2001), o CEB-FIP (1990), o ACI209.2R (2008) e o PCI (1999). De acordo com os autores, um modelo seria excelente se pudesse prever encurtamentos com erros da ordem de 15% dos resultados analíticos e adequado se o erro

fosse da ordem de 20%. No entanto, erros que variam entre 30 a 50% são considerados normais nesses casos.

Ainda de acordo com estes autores, a estimativa do encurtamento da laje protendida deve levar em conta vários fatores, incluindo as propriedades do concreto, relação volume/superfície da laje, umidade relativa do ar, pré-compressão média da laje no ato da protensão, método de cura utilizado e sua duração, idade do concreto quando se inicia a retração e a idade do concreto quando os cabos são protendidos. Uma vez calculado o encurtamento estimado da laje, os elementos estruturais podem ser projetados e detalhados para absorver os encurtamentos resultantes ou resistir aos esforços que resultam das restrições ao encurtamento.

Guo e Joseph (2013a, 2013b) concluem que o cálculo da retração e da fluência do concreto no tempo infinito variando-se a relação volume/área da laje utilizando os modelos B3, GL2000 e CEB-FIP (1990) resultam em valores próximos e mais adequados do que o cálculo pelos modelos do PCI e do ACI209.2R.

Em função do exposto, neste trabalho, para considerar o efeito da variação das propriedades dos materiais (aço e concreto) no comportamento estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas no SAP2000 v20, a relaxação do aço de protensão foi calculada conforme o CEB-FIP (1990), enquanto a fluência, a retração, a variação da resistência e da rigidez do concreto ao longo do tempo foram calculadas de acordo com as formulações da FIB (2010), os quais já estão implementados no software utilizado. É importante frisar que os modelos adotados na ABNT NBR 6118:2014 ainda não estão inseridos no SAP2000 v20.

ARTIGO 1

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA E ANÁLISE CLÁSSICA VIA MÉTODO DOS PÓRTICOS MÚLTIPLOS DE EDIFÍCIOS COM LAJES LISAS PROTENDIDAS

Lucas Ribeiro Oliveira^a, Gustavo de Souza Veríssimo^a, José Carlos Lopes Ribeiro^a, José Luiz Rangel Paes^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus da UFV, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil.

*Artigo preparado para submissão à revista na área de Engenharias I.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado uma análise comparativa entre resultados obtidos por análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e por análise clássica linear-elástica (AC) de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, por meio de estudos de caso, com o auxílio do software SAP2000 v20. Foram utilizados 18 modelos simplificados com base no Método dos Pórticos Múltiplos, variando-se o número de pavimentos, o comprimento total da laje e a rigidez dos pilares, com o intuito de representar diversos graus de restrição ao encurtamento da laje. Para a análise evolutiva, foram consideradas a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (módulo de elasticidade, retração e fluência do concreto), as perdas de protensão imediatas e progressivas, bem como a sequência de construção e de carregamento da estrutura. Por fim, os resultados dos esforços solicitantes dos modelos evolutivos são comparados com os dos modelos clássicos.

Palavras-chave: laje lisa protendida, análise estrutural evolutiva, análise incremental, análise não-linear, retração, fluência, restrição ao encurtamento da laje.

ABSTRACT

This paper depicts a comparative analysis of results obtained by nonlinear staged-construction analysis and by classic linear elastic analysis for building structures with prestressed flat slabs, through case studies, conducted with SAP2000 v20 software. Eighteen models of building structures were created according to the Simple Frame Method, varying the number of floors, the total length of the slab and column stiffness, with the purpose of representing various degrees of restraint to slab shortening. The

staged-construction analysis encompassed the concrete properties' evolution through time (elastic modulus, shrinkage and creep), immediate and progressive prestress losses, and the sequence of construction and loading. Finally, the results of the evolutionary models were compared with those of classic models.

Keywords: post-tensioned structures, staged-construction analysis, incremental analysis, nonlinear analysis, creep, shrinkage, restrain to shortening problems.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos anos recentes, com a difusão do uso das lajes protendidas com cordoalhas engraxadas e plastificadas, alguns projetistas vêm ousando projetar lajes com dimensões cada vez maiores e edifícios cada vez mais altos. Essa tendência tem levado à manifestação de alguns problemas relacionados aos esforços adicionais que são gerados pela restrição ao encurtamento da laje devido às estruturas de apoio (RTS – *restrain to shortening problems*). A tendência ao encurtamento da laje é um efeito decorrente da força de pré-compressão no ato da protensão, pela retração e fluência do concreto e pela variação da temperatura. As estruturas de apoio também provocam certa restrição a este encurtamento, quais sejam, pilares, pilares-parede e núcleos-rígidos, concretados monoliticamente à laje. Quanto maior o comprimento da laje e maior a rigidez dos apoios, mais importantes são os problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje.

A restrição ao encurtamento da laje no ato da protensão, provocada pelos pilares, gera uma descompressão na laje do pavimento, pois parte da força de pré-compressão aplicada na laje em análise é desviada para as lajes dos pavimentos previamente concretados. Esta retenção da força de pré-compressão da laje e desvio para os outros pavimentos é causada pelos elementos verticais da estrutura que, por consequência, sofrem esforços adicionais de momento fletor e força cortante. Essa redistribuição entre os pavimentos das forças horizontais de pré-compressão aplicadas no plano da laje somente pode ser observada por meio de uma análise estrutural que considera as etapas construtivas.

Os problemas relacionados à restrição ao encurtamento de lajes protendidas também estão relacionados aos efeitos de longo prazo, como variação de temperatura, retração e fluência do concreto, em que a laje tende a encurtar ao longo do tempo, mas possui a sua deformação restringida pelos pilares, gerando esforços de tração na laje e

esforços de flexão nos pilares. Por isso é importante considerar a não-linearidade física do concreto nas análises estruturais. Dependendo das condições de contorno, os esforços gerados nas lajes e pilares podem assumir valores consideráveis.

Para a avaliação dos esforços e deslocamentos da estrutura de um edifício como um todo, é possível utilizar uma análise estrutural clássica (AC) ou uma análise estrutural evolutiva (AEE). Na análise estrutural clássica, a estrutura de um edifício de múltiplos pavimentos é normalmente analisada em uma única etapa, considerando-se a estrutura completa, com todas as ações atuando ao mesmo tempo, como peso próprio, cargas permanentes de revestimento e alvenarias, sobrecargas de serviço e forças laterais de vento. Por outro lado, a análise estrutural evolutiva é uma análise estática não-linear, que leva em consideração as etapas de construção e o carregamento incremental da estrutura, podendo-se levar ou não em conta a variação das propriedades dos materiais com o tempo.

No caso de estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos com lajes lisas protendidas, uma série de fenômenos dependentes do tempo acontecem simultaneamente, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas por meio de uma AEE, que permite levar em conta as diversas etapas do processo construtivo e a introdução dos carregamentos em etapas. Esse tipo de análise permite computar os esforços e deformações em cada estágio da construção, para cada porção da estrutura que vai sendo montada, seguindo a sequência de construção. Dessa forma, efeitos de fenômenos como protensão, retração e fluência do concreto, relaxação do aço de protensão, restrição à deformação de elementos protendidos devido à rigidez à flexão das estruturas de apoio, variação de temperatura, etc., podem ser considerados em instantes específicos, reproduzindo de forma mais realista o que ocorre com a estrutura.

1.2 ANTECEDENTES

Fintel e Gosh (1978) realizaram um dos primeiros estudos sobre o efeito evolutivo das etapas de protensão nos esforços solicitantes de vigas e pilares de um edifício de 45 pavimentos. Posteriormente, Guo, Joseph e Bieberly (2009) fizeram um estudo sobre os efeitos da restrição ao encurtamento em lajes protendidas de garagens em subsolos em decorrência das cortinas de contenção que estão rigidamente ligadas à laje. Avaliou-se a descompressão da laje, por meio de uma análise linear-elástica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com auxílio do software ETABS, em que se considerou apenas o efeito das forças horizontais de pré-compressão no ato da protensão, variando-se o grau de interação entre a laje e a cortina. Guo, Joseph e Darwin (2013) fizeram um estudo da

redistribuição das forças horizontais de pré-compressão das lajes durante as etapas de protensão, por meio de uma análise estrutural evolutiva de pórticos de edifícios de múltiplos andares com laje lisa protendida, com auxílio do software SAP2000. Neste trabalho, foram aplicadas apenas as forças horizontais de protensão no modelo e não se levou em conta a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo. A perda de protensão no tempo infinito foi considerada de forma simplificada por meio de uma força de tração equivalente. Guo e Joseph (2013^a, 2013^b) fizeram um estudo comparando 5 modelos matemáticos frequentemente utilizados para o cálculo do encurtamento de lajes protendidas levando em conta os efeitos da fluência e da retração do concreto. Os 5 modelos comparados foram o B3 (proposto por Bažant, 1995), o GL2000 (proposto por Gardner e Lockman, 2001), o CEB-FIP (1990), o ACI209.2R (2008) e o PCI (1999). Concluíram que o cálculo da retração e da fluência do concreto no tempo infinito, variando-se a relação volume/área da laje, utilizando os modelos B3, GL2000 e CEB-FIP (1990) resultam em valores próximos e mais adequados do que o cálculo pelos modelos do PCI e do ACI209.2R.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Atualmente, tem-se observado no meio técnico brasileiro que não é usual considerar os efeitos da restrição ao encurtamento de lajes lisas protendidas de edifícios, devido às estruturas de apoio. Estes efeitos podem gerar descompressão e fissuras de restrição na laje, além de provocar esforços adicionais nos pilares e outras estruturas verticais que suportam a laje.

Recentemente, diversos casos de manifestações patológicas, e até falhas estruturais, tem sido observados em estruturas de edifícios com lajes protendidas de grandes comprimentos, projetadas sem uma análise mais rigorosa dos efeitos que interferem na evolução dos esforços e das deformações nessas estruturas, chamando a atenção dos profissionais da área e evidenciando a necessidade de novos estudos para avaliar o comportamento estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas.

Com a evolução dos softwares de análise estrutural, atualmente é possível realizar análises avançadas, levando-se em consideração o efeito incremental das etapas de construção e de carregamento na estrutura, além da variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo. Dessa forma, é possível avaliar o comportamento de estruturas com lajes protendidas de forma mais realista.

Apesar de existirem ferramentas de cálculo que permitem a introdução das etapas de construção e dos efeitos diferidos com o tempo na análise estrutural, o estudo da sua influência nos esforços solicitantes e deslocamentos em estruturas ainda não tem sido objeto de maior atenção, principalmente em edifícios com lajes lisas protendidas.

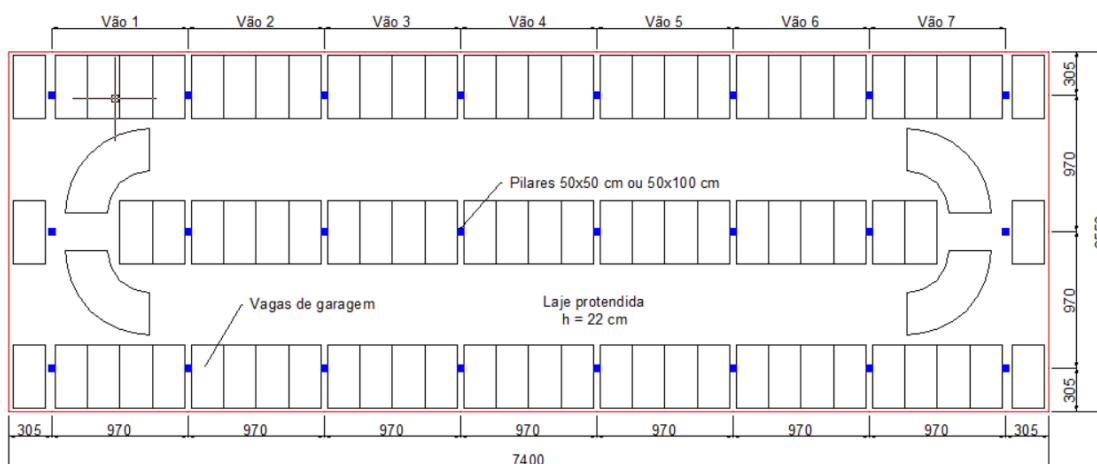
Neste trabalho, busca-se aprofundar o entendimento do comportamento de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas por meio de análise estrutural avançada. Apresenta-se uma análise comparativa entre resultados obtidos por meio da AEE e da AC, para estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, por meio de estudos de caso, utilizando-se o software SAP2000 v20. Foram utilizados modelos simplificados, com base no Método dos Pórticos Múltiplos, variando-se o número de pavimentos, o comprimento total da laje e a rigidez dos pilares, com o intuito de representar diversos graus de restrição ao encurtamento da laje. Para a AEE, foram consideradas a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (módulo de elasticidade, retração e fluência do concreto), as perdas de protensão imediatas e progressivas, bem como a sequência de construção e de carregamento da estrutura.

Com este trabalho, espera-se contribuir para um melhor entendimento do comportamento estrutural de lajes de concreto protendidas, considerando-se diversos fenômenos complexos que governam a evolução das tensões e deformações nos materiais, bem como da utilização da análise estrutural evolutiva, haja vista a escassez de estudos aprofundados sobre o tema no Brasil.

2 DESCRIÇÃO DOS PÓRTICOS ANALISADOS

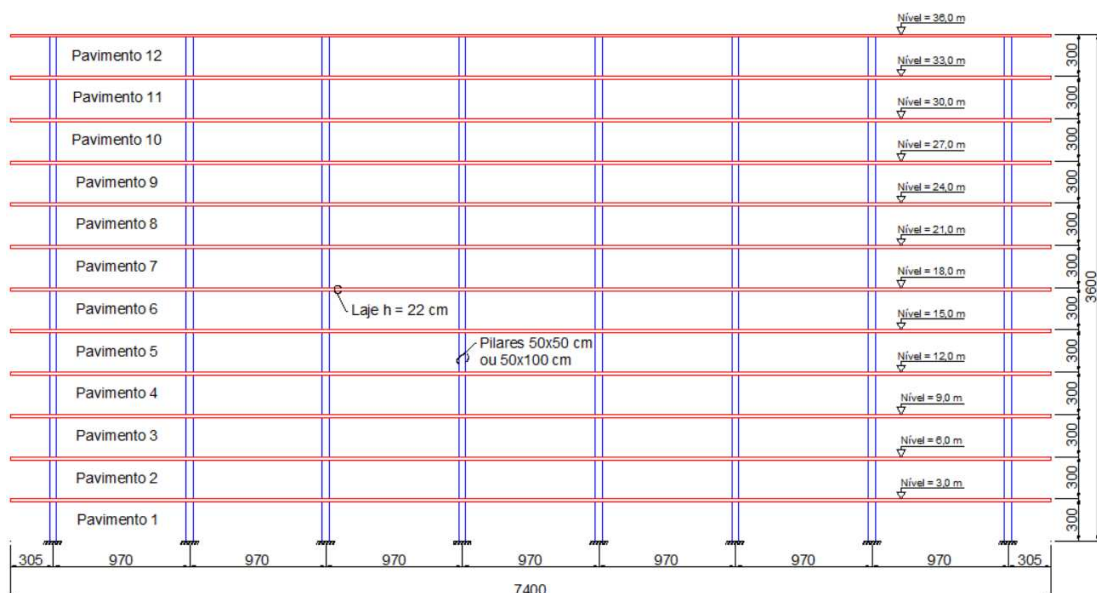
Na Figura 1, apresenta-se a planta baixa do edifício garagem considerado, com vãos entre pilares de 9,7 m, um balanço ao redor da laje de 3,05 m e pé-direito estrutural de 3 m, conforme ilustrado na Figura 2. A estratégia adotada foi modelar um pórtico equivalente a uma faixa do edifício contendo um segmento da laje apoiado sobre os pilares, seguindo a sistemática do Método dos Pórticos Múltiplos. A faixa analisada foi a dos pilares centrais, cuja largura de influência possui 9,7 m. Foram criados ao todo 18 modelos de pórticos, mantendo-se o tamanho dos vãos e o pé-direito constantes, mas variando-se o comprimento total da laje, a quantidade de pavimentos e as dimensões dos pilares, conforme apresentado na Tabela 1.

Figura 1 – Planta baixa do edifício garagem – dimensões em cm.



Fonte: O autor (2019).

Figura 2 – Corte esquemático do edifício garagem – dimensões em cm.



Fonte: O autor (2019).

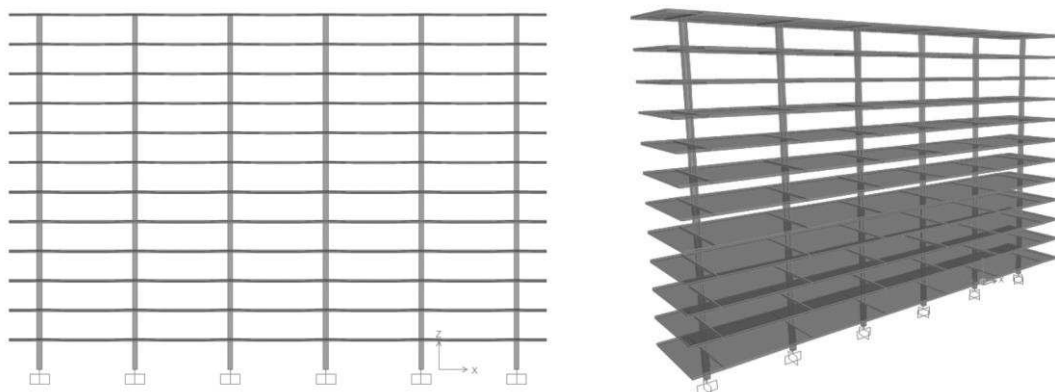
As lajes e os pilares foram modelados como elementos de barra tipo *Frame*, as lajes com altura de 22 cm e largura de 970 cm e os pilares com seção transversal de 50x50 cm, para os pórticos com até 5 pavimentos, e 50x100 cm, para os pórticos de 12 pavimentos. Na Figura 3 são mostradas duas vistas de um dos pórticos analisados por meio do software SAP2000 v20.

Tabela 1 – Definição dos pórticos a serem analisados.

Modelo	Nº de Vãos	Nº de Pavimentos	Tipo de análise	Dimensão dos Pilares	Comprimento total da laje
2V1P_AE	2	1	Análise evolutiva	50x50 cm	25,5 m
2V1P_AC	2	1	Análise clássica	50x50 cm	25,5 m
2V5P_AE	2	5	Análise evolutiva	50x50 cm	25,5 m
2V5P_AC	2	5	Análise clássica	50x50 cm	25,5 m
2V12P_AE	2	12	Análise evolutiva	50x100 cm	25,5 m
2V12P_AC	2	12	Análise clássica	50x100 cm	25,5 m
5V1P_AE	5	1	Análise evolutiva	50x50 cm	54,6 m
5V1P_AC	5	1	Análise clássica	50x50 cm	54,6 m
5V5P_AE	5	5	Análise evolutiva	50x50 cm	54,6 m
5V5P_AC	5	5	Análise clássica	50x50 cm	54,6 m
5V12P_AE	5	12	Análise evolutiva	50x100 cm	54,6 m
5V12P_AC	5	12	Análise clássica	50x100 cm	54,6 m
7V1P_AE	7	1	Análise evolutiva	50x50 cm	74,0 m
7V1P_AC	7	1	Análise clássica	50x50 cm	74,0 m
7V5P_AE	7	5	Análise evolutiva	50x50 cm	74,0 m
7V5P_AC	7	5	Análise clássica	50x50 cm	74,0 m
7V12P_AE	7	12	Análise evolutiva	50x100 cm	74,0 m
7V12P_AC	7	12	Análise clássica	50x100 cm	74,0 m

Fonte: O autor (2019).

Figura 3 – (a) elevação do pórtico com 5 vãos e 12 pavimentos no SAP2000 v20;
(b) visualização 3D do pórtico no SAP2000 v20.

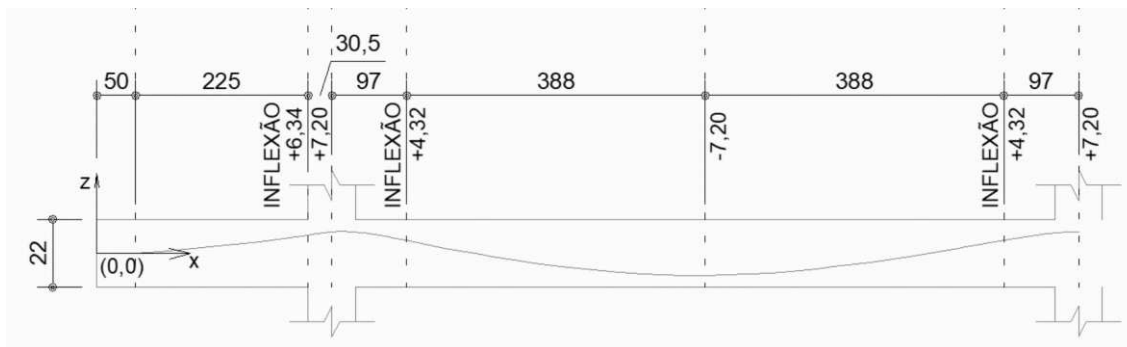


(b)

Fonte: O autor (2019).

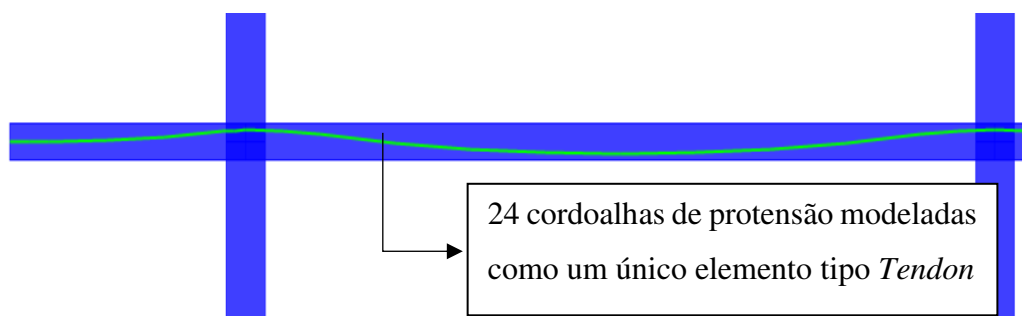
Os cabos de protensão foram modelados utilizando-se o elemento do tipo *Tendon* disponível no SAP2000 v20. O traçado vertical dos cabos foi definido fornecendo-se as coordenadas dos pontos inicial e final, além dos pontos de maiores excentricidades e de inflexão, ligando-os por retas ou parábolas. Na Figura 4 e na Figura 5 é apresentado o traçado vertical típico do cabo adotado neste trabalho, que segue as diretrizes apresentadas em Carneiro (2015), Emerick (2005), ABNT NBR 6118:2014 e Aalami (2000c).

Figura 4 – Traçado vertical típico dos cabos de protensão.



Fonte: O autor (2019)

Figura 5 – Detalhe do traçado vertical do cabo no SAP2000 v20.



Fonte: O autor (2019)

Os cabos de protensão no SAP2000 v20 podem ser definidos como elementos ou como carregamento equivalente de protensão. Quando definido como elemento, o cabo é automaticamente discretizado em partes menores, assim como a laje que o envolve. Neste caso, deve-se fornecer a força ou tensão inicial do cabo no momento da protensão, os coeficientes de atrito entre o cabo e a bainha e o escorregamento do cabo nas ancoragens. Com isso, as perdas de protensão iniciais são automaticamente calculadas pelo software, que oferece de forma gráfica a variação da força de protensão ao longo do cabo. Além disso, as perdas de protensão progressivas também são calculadas, por meio da AEE, considerando-se a não-linearidade física do concreto e a relaxação do aço de protensão. Trata-se de um recurso avançado, em que é possível obter a força do cabo em qualquer coordenada do mesmo e em qualquer idade, levando-se em conta uma série de fenômenos dependentes do tempo, como a retração e a fluência do concreto, a variação da temperatura e as etapas de construção e de carregamento da estrutura.

Por outro lado, quando os cabos são definidos como carregamento equivalente, os efeitos dependentes do tempo não são considerados e as perdas de protensão progressivas devem ser informadas pelo usuário. Os efeitos da protensão, considerando os cabos como carregamento no SAP2000 v20, foram comparados com os resultados do método do

balanceamento de cargas (Lin, 1963, *apud* Aalami, 1990), obtendo-se resultados idênticos.

Neste trabalho, adotou-se para a faixa de projeto um total de 24 cordoalhas de protensão de aço CP190 RB, com diâmetro de 12,7 mm e 98,7 mm² de seção transversal cada uma. As 24 cordoalhas foram modeladas como um único cabo de 2369 mm² de seção, cujos dados inseridos no SAP2000 são apresentados na Tabela 2. É prática comum nos projetos adotar uma força constante ao longo do cabo, de forma que, para os modelos que consideram AC, a alternativa adotada para avaliar os resultados da análise estrutural no tempo “infinito” foi aplicar uma força no cabo, considerando todas as perdas de protensão (estimadas em 20%), no valor de $24 \times 120 = 2880$ kN. Para a AEE, aplicou-se uma tensão de 1503 MPa no ato da protensão, que corresponde a $0,88f_{pyk}$, conforme limitado pela NBR6118 (ABNT, 2014). Com isso, no tempo infinito, a tensão média de pré-compressão estimada na laje foi de 1,35 MPa, o que atende ao limite mínimo de 1,0 MPa definido pela ABNT NBR 6118:2014, desde que não haja retenção da pré-compressão pelas estruturas verticais de apoio.

Tabela 2 – Parâmetros inseridos no SAP2000 v20 para modelagem dos cabos de protensão.

Tipo de Análise Estrutural	AEE	AC
Máxima discretização do cabo (m)	1,0	-
Opção de modelagem dos cabos	Cabos como elementos	Cabos como carregamento
Área do cabo (mm ²)	2369	2369
Tensão inicial aplicada nos cabos (MPa)	1503	-
Força aplicada nos cabos (kN)	-	2880
Coefficiente de curvatura dos cabos	0,05	0
Coefficiente de curvatura parasita (1/m)	0,0005	0
Escorregamento na ancoragem (mm)	6,0	0
Perda de protensão por encurtamento elástico (MPa)	0*	0
Perda de protensão por fluência (MPa)	0*	0
Perda de protensão por retração (MPa)	0*	0
Perda de protensão por relaxação do aço (MPa)	0*	0

*As perdas de protensão progressivas são calculadas automaticamente pelo SAP2000 v20.

Fonte: O autor (2019).

3 ETAPAS DE CONSTRUÇÃO E CARREGAMENTO

A construção considerada era um edifício garagem cujas ações verticais atuantes consideradas em cada pórtico foram:

- peso próprio: $PP = 5,5 \text{ kN/m}^2 \times 9,7 \text{ m} = 53,4 \text{ kN/m}$;
- revestimento: $CP1 = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 9,7 \text{ m} = 19,4 \text{ kN/m}$;
- acidental: $SC = 3,0 \text{ kN/m}^2 \times 9,7 \text{ m} = 29,1 \text{ kN/m}$;
- alvenaria no contorno da laje: $CP2 = 2,7 \text{ kN/m} \times 9,7 \text{ m} = 26,2 \text{ kN}$.

Para os modelos avaliados com a análise clássica, todas as ações foram aplicadas de forma simultânea. Por outro lado, para a AEE, as ações foram aplicadas em etapas, de acordo com a Tabela 3. Considerou-se um ciclo de concretagem da laje a cada 14 dias e que as ações de revestimentos, paredes e sobrecargas de utilização somente entrariam em serviço após 28 dias da conclusão de toda a estrutura.

A combinação de ações adotada para comparar os resultados entre os modelos foi a combinação rara de serviço, com os coeficientes de majoração de todas as ações com o valor unitário.

Tabela 3 – Etapas de construção e carregamento adotadas na AEE.

Fase	Estágio	Idade (dias)	Observação	Elementos estruturais adicionados	Ações aplicadas
1º Pavimento	1	3	Concretagem dos Pilares - 1º Pavimento	Pilares 1º Pavimento	Peso próprio: Pilares 1º Pavimento
	2	9	Concretagem das Lajes - 1º Pavimento	Lajes 1º Pavimento	-
	3	14	Protensão das Lajes - 1º Pavimento	Cabos 1º Pavimento	Protensão: Cabos 1º Pavimento Peso próprio: Lajes 1º Pavimento
2º Pavimento	4	17	Concretagem dos Pilares - 2º Pavimento	Pilares 2º Pavimento	Peso próprio: Pilares 2º Pavimento
	5	23	Concretagem das Lajes - 2º Pavimento	Lajes 2º Pavimento	-
	6	28	Protensão das Lajes - 2º Pavimento	Cabos 2º Pavimento	Protensão: Cabos 2º Pavimento Peso próprio: Lajes 2º Pavimento
*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*
12º Pavimento	34	157	Concretagem dos Pilares - 12º Pavimento	Pilares 12º Pavimento	Peso próprio: Pilares 12º Pavimento
	35	163	Concretagem das Lajes - 12º Pavimento	Lajes 12º Pavimento	-
	36	168	Protensão das Lajes - 12º Pavimento	Cabos 12º Pavimento	Protensão: Cabos 12º Pavimento Peso próprio: Lajes 12º Pavimento
SC + CP	37	196	Aplicação das cargas permanentes e acidentais	-	Cargas permanentes de revestimento e alvenaria + sobrecarga de serviço
Final	38	10000	Duração total da análise igual a 10000 dias	-	-

Fonte: O autor (2019).

4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DEPENDENTES DO TEMPO

Como já comentado, o cálculo do encurtamento das lajes lisas protendidas é fundamental para avaliar os esforços adicionais causados pela restrição à livre deformação da laje em decorrência das estruturas verticais de apoio. Dessa forma, a escolha de modelos analíticos apropriados, que descrevam a variação das propriedades dos materiais com o tempo, interfere de forma considerável nos resultados de uma análise estrutural evolutiva, que considera a não-linearidade física dos materiais. Uma vez calculado o encurtamento estimado da laje, os elementos estruturais podem ser projetados

e detalhados para absorver os encurtamentos resultantes ou resistir aos esforços que resultam das restrições ao encurtamento. Os modelos CEB-FIP (1990), FIB (2010) e GL2000 estão implementados no SAP2000 v20. Dessa forma, neste trabalho, para considerar o efeito da variação das propriedades dos materiais, a relaxação do aço de protensão foi calculada conforme o CEB-FIP (1990) e a fluência, a retração e a variação da resistência e da rigidez do concreto ao longo do tempo foram calculadas de acordo com as formulações da FIB (2010). Com o intuito de considerar de forma simplificada a fissuração do concreto, o módulo de elasticidade do concreto dos pilares foi multiplicado por um fator igual a 0,8, ao passo que, para as lajes protendidas, adotou-se o módulo de elasticidade integral. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros inseridos no SAP2000.

Tabela 4 – Seleção dos parâmetros de análise para considerar a variação das propriedades dependentes do tempo dos materiais no SAP2000 v20.

Parâmetros	Elemento Estrutural		
	Laje	Pilar	Cabos
Tipo de material	Concreto (<i>concrete</i>)	Concreto (<i>concrete</i>)	Cordoalha (<i>tendon</i>)
Tipo de histerese	Isotrópico (<i>isotropic</i>)	Isotrópico (<i>isotropic</i>)	<i>Uni-axial</i>
Diagrama tensão-deformação	<i>Kinematic</i>	<i>Kinematic</i>	<i>Kinematic</i>
Modelo de variação das propriedades dos materiais com o tempo	Definido pelo usuário	Definido pelo usuário	Definido pelo usuário
	FIB (2010)	FIB (2010)	CEB-FIP (1990)
Resistência f_{ck} do concreto	30 MPa	30 MPa	-
Resistência ao escoamento do aço f_y	-	-	1710 MPa
Resistência à ruptura do aço f_u	-	-	1900 MPa
Módulo de elasticidade aos 28 dias	29700 MPa	23760 MPa	200.000 MPa
Peso próprio	25 kN/m ³	25 kN/m ³	78,5 kN/m ³
Variação do módulo de elasticidade	✓	✓	-
Fluência	✓	✓	-
Retração	✓	✓	-
Tipo de análise de fluência	Integração completa	Integração completa	-
Tipo de cimento	42,5N	42,5N	-
Umidade relativa	70%	70%	-
Idade de início da retração (dias)	5	5	-
Espessura fictícia h (cm)	22	16,7* 25**	-
Idade de início do carregamento (dias)	5	5	-
Relaxação do aço de protensão	-	-	Integração completa
Classe CEB-FIP do aço protendido	-	-	2
Tensão aplicada / tensão resistente do aço			0.80

* Pilar de 50x100 cm

** Pilar de 50x50 cm

Fonte: O autor (2019).

Nas Figuras 6 a 15 são apresentados os gráficos das propriedades do concreto e das cordoalhas de protensão ao longo do tempo.

Figura 6 – Diagrama tensão-deformação do concreto das lajes e dos pilares.

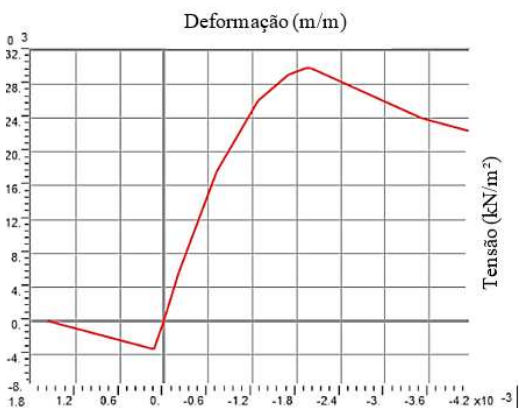


Figura 7 – Resistência média do concreto das lajes e dos pilares ao longo do tempo.

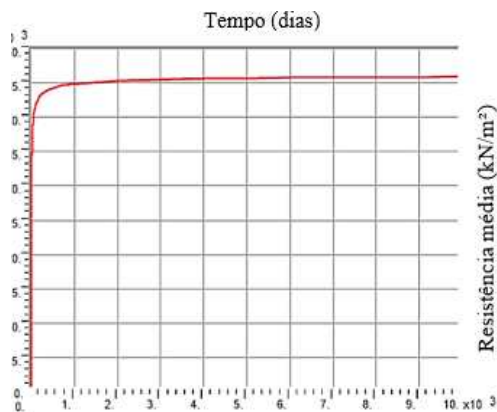


Figura 8 – Coeficiente de fluência do concreto dos pilares ao longo do tempo.

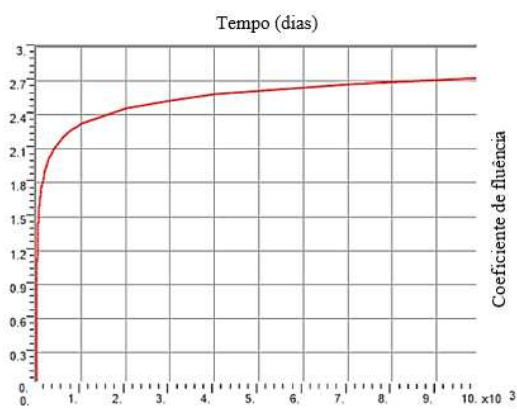


Figura 9 – Retração do concreto dos pilares ao longo do tempo.

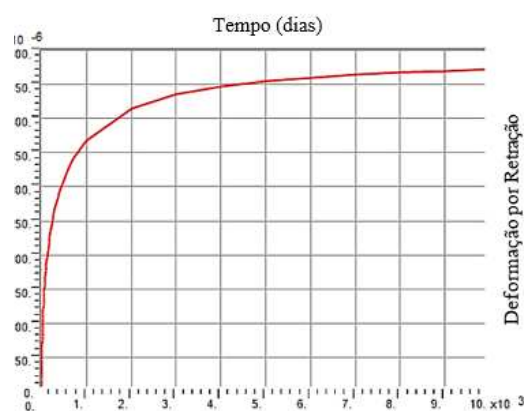


Figura 10 – Módulo de elasticidade do concreto dos pilares ao longo do tempo.

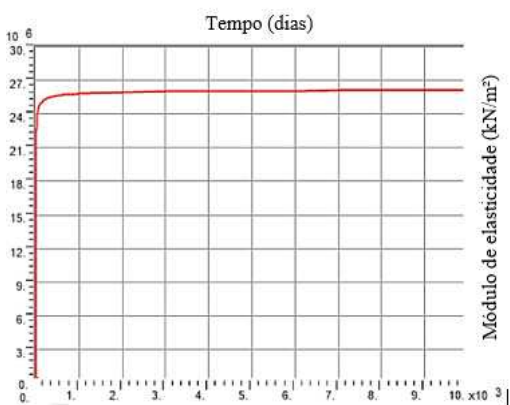


Figura 11 – Coeficiente de fluência do concreto das lajes ao longo do tempo.

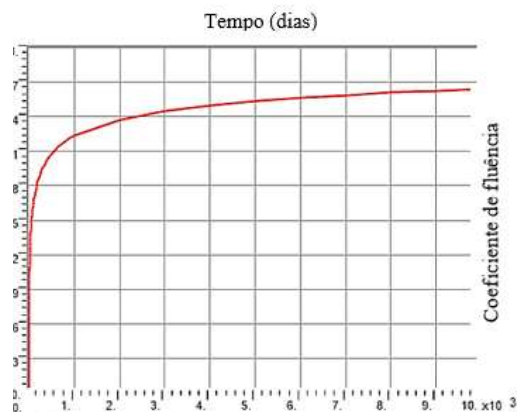


Figura 12 – Retração do concreto das lajes ao longo do tempo.

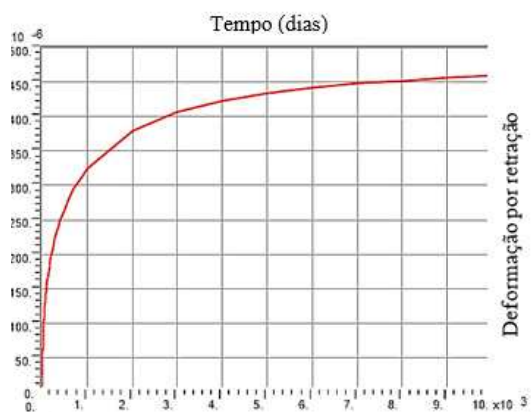


Figura 13 – Módulo de elasticidade do concreto das lajes ao longo do tempo.

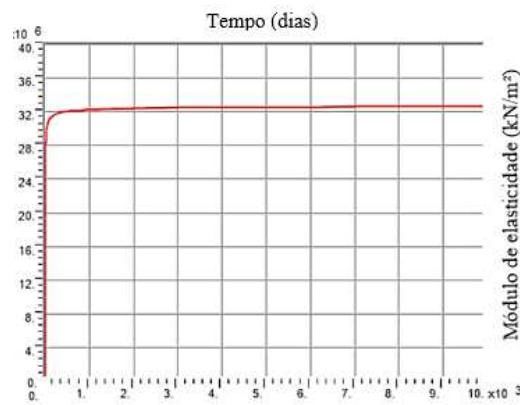


Figura 14 – Diagrama tensão-deformação do aço de protensão.

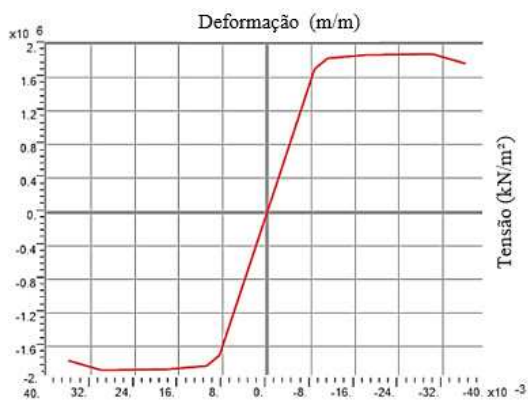
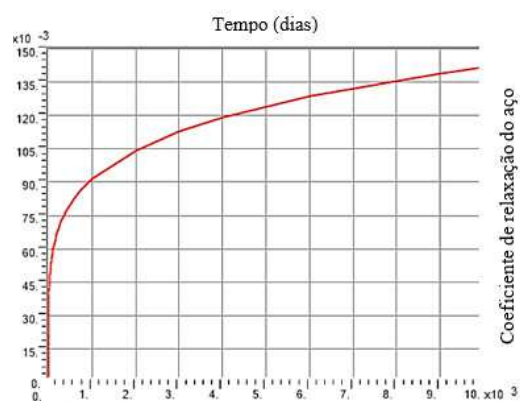


Figura 15 – Coeficiente de relaxação do aço de protensão ao longo do tempo.

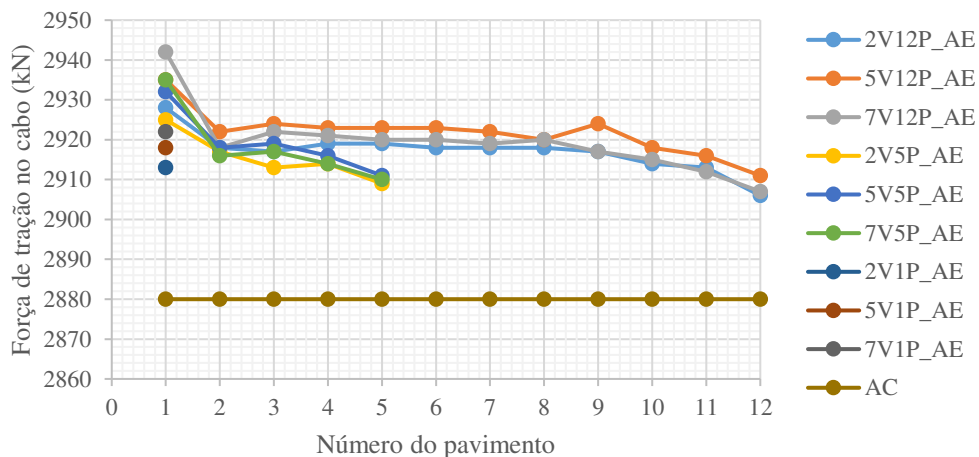


5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 16 são apresentados os esforços de tração nos cabos de protensão no centro do Vão 1 (ver Fig.1) ao longo dos pavimentos dos pórticos analisados, em que é possível comparar os resultados da AEE com idade de 10000 dias com a AC. Observa-se que as forças de tração obtidas da AEE, que variam entre 2905 kN e 2942 kN, são muito próximas da adotada para a AC (2880 kN), o que indica que a consideração da perda de protensão igual a 20% é adequada.

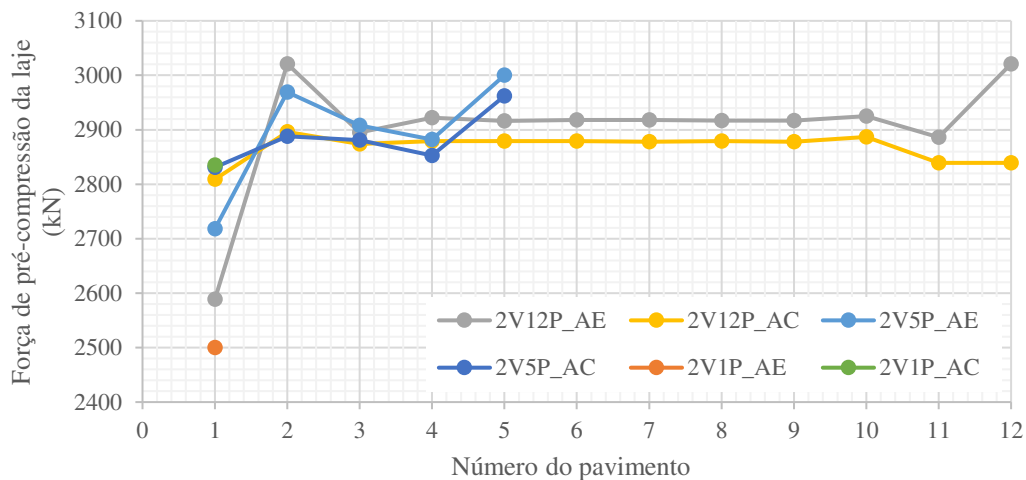
Na Figura. 17 e na Figura. 19 são mostradas as forças de pré-compressão da laje no centro do Vão 1 dos pórticos analisados. Observa-se que nos pórticos analisados por meio da AEE a força de pré-compressão da laje do 1º pavimento é muito menor do que nos pórticos analisados com AC. Além disso, quanto maior a altura e maior o comprimento do pórtico, menor é a força de pré-compressão da laje do 1º pavimento. A partir do 2º pavimento, os valores entre a AEE e a AC são semelhantes, com a pré-compressão obtida com a AEE ligeiramente maior do que a AC.

Figura 16 – Força de tração no cabo do Vão 1 dos pórticos analisados.



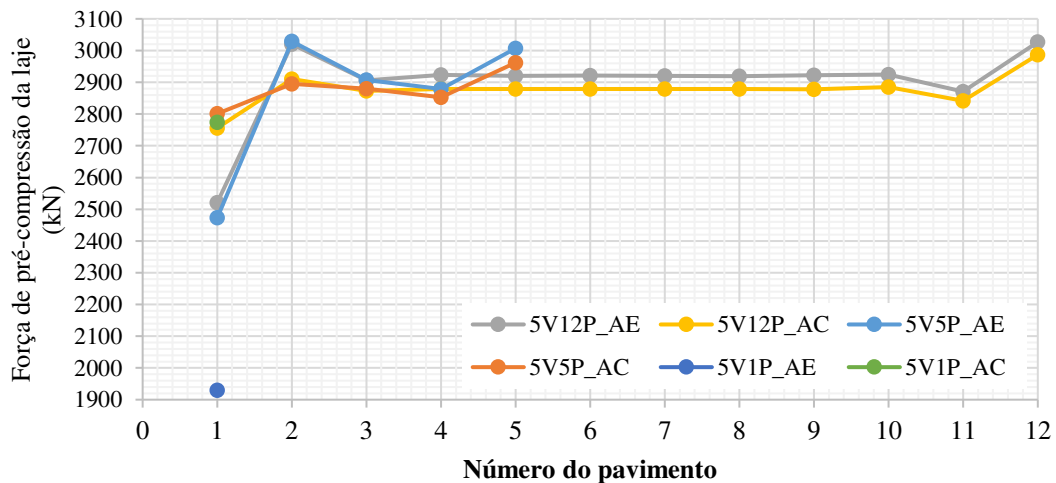
Fonte: O autor (2019).

Figura 17 – Força de pré-compressão da laje do Vão 1 ao longo dos pavimentos – pórticos com 2 vãos.



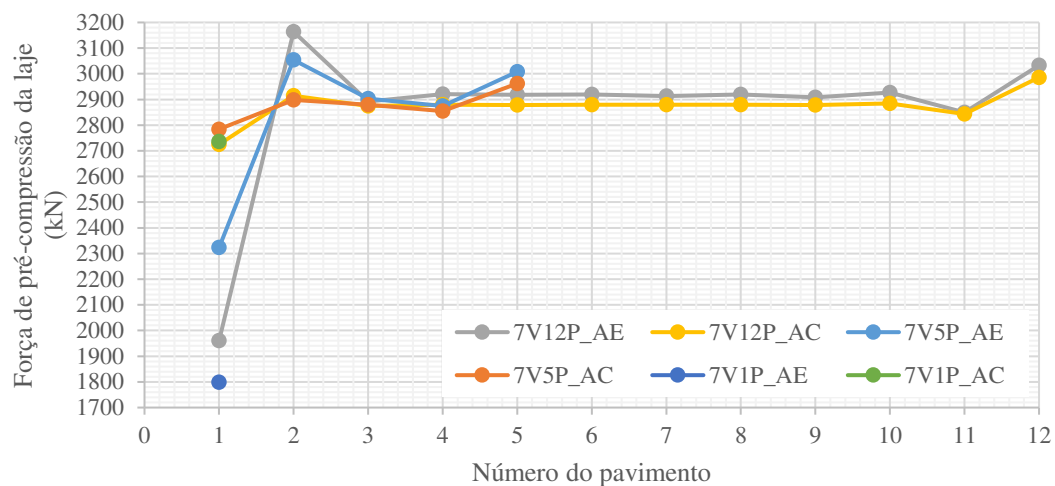
Fonte: O autor (2019).

Figura 18 – Força de pré-compressão da laje do Vão 1 ao longo dos pavimentos – pórticos com 5 vãos.



Fonte: O autor (2019).

Figura. 19 – Força de pré-compressão da laje do Vão 1 ao longo dos pavimentos – pórticos com 7 vãos.

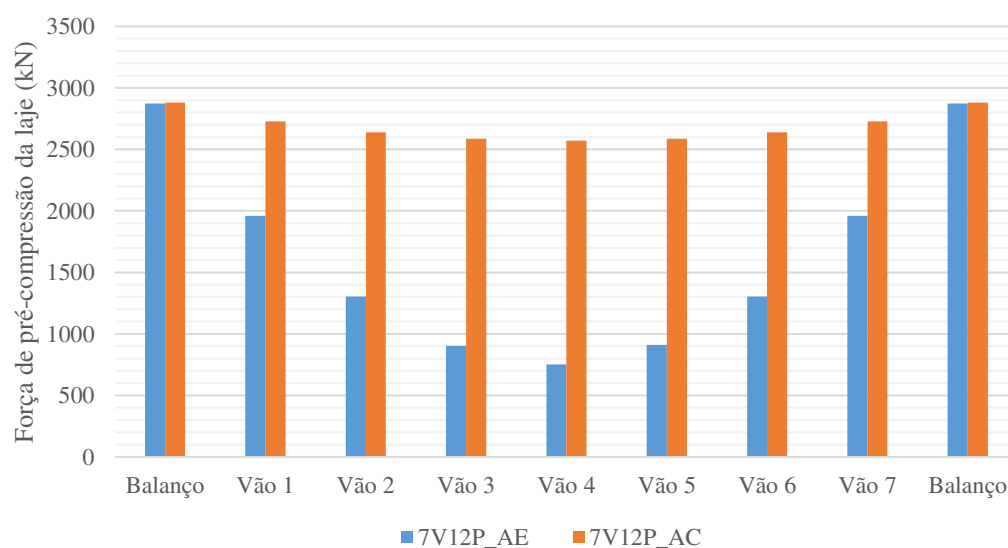


Fonte: O autor (2019).

Na Figura. 17 e na Figura. 19, observa-se também que, quando se analisa o pórtico como um pavimento isolado, há uma superestimativa da perda de pré-compressão da laje, já que tanto os pilares superiores quanto os inferiores ao piso analisado são considerados engastados nas suas extremidades, o que representa um grau de restrição muito maior do que o observado na realidade.

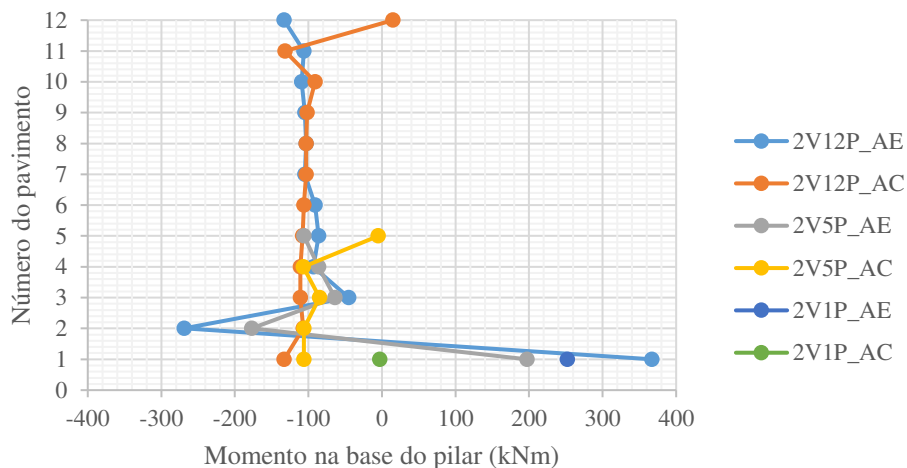
Na Figura 20 são apresentadas as forças de pré-compressão da laje do 1º pavimento dos modelos com 7 vãos e 12 pavimentos. Constata-se que à medida que se aproxima do centro da laje, menor é a força de pré-compressão obtida, especialmente quando se utiliza a AEE.

Figura 20 – Força de pré-compressão da laje do 1º pavimento ao longo dos vãos do pórtico com 7 vãos e 12 pavimentos.



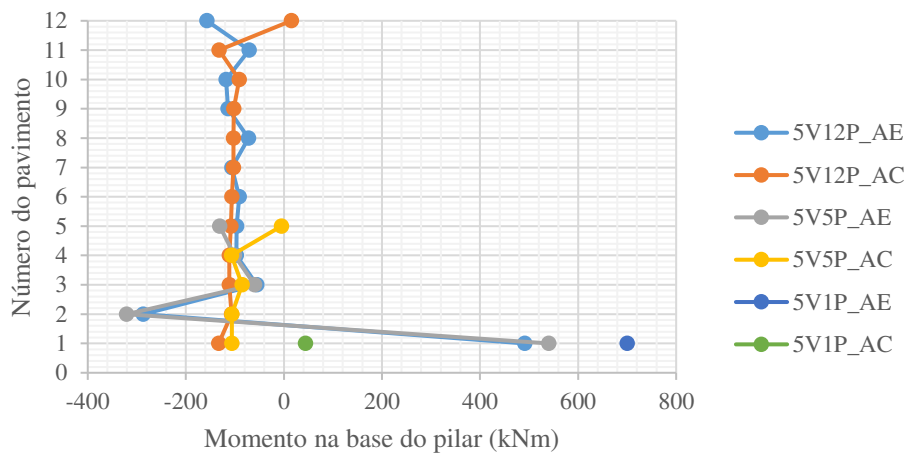
Fonte: O autor (2019).

Figura 21 – Momento fletor na base dos pilares extremos ao longo dos pavimentos – pórticos com 2 vãos.



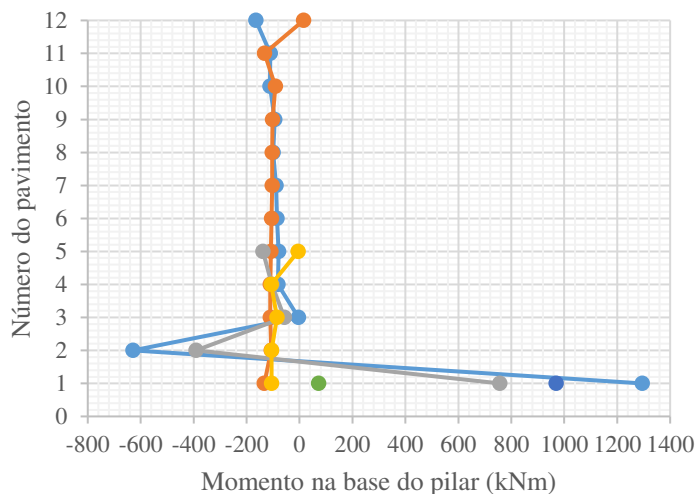
Fonte: O autor (2019).

Figura 22 – Momento fletor na base dos pilares extremos ao longo dos pavimentos – pórticos com 5 vãos.



Fonte: O autor (2019).

Figura 23 – Momento fletor na base dos pilares extremos ao longo dos pavimentos – pórticos com 7 vãos.



Fonte: O autor (2019).

Nas Figuras 21 a 23 são exibidos os momentos fletores na base dos pilares de extremidade ao longo dos pavimentos. Consta-se que os momentos fletores obtidos no 1º e no 2º pavimento para os pórticos processados com AEE são muito superiores quando comparados aos obtidos com a AC e que, a partir do 3º pavimento, os momentos fletores resultam em valores semelhantes entre os dois tipos de análise. Além disso, para os modelos com AEE, à medida que se aumenta o comprimento da laje e a altura do edifício, maiores são os esforços adicionais de flexão nos pilares engastados na fundação, principalmente os pilares de extremidade.

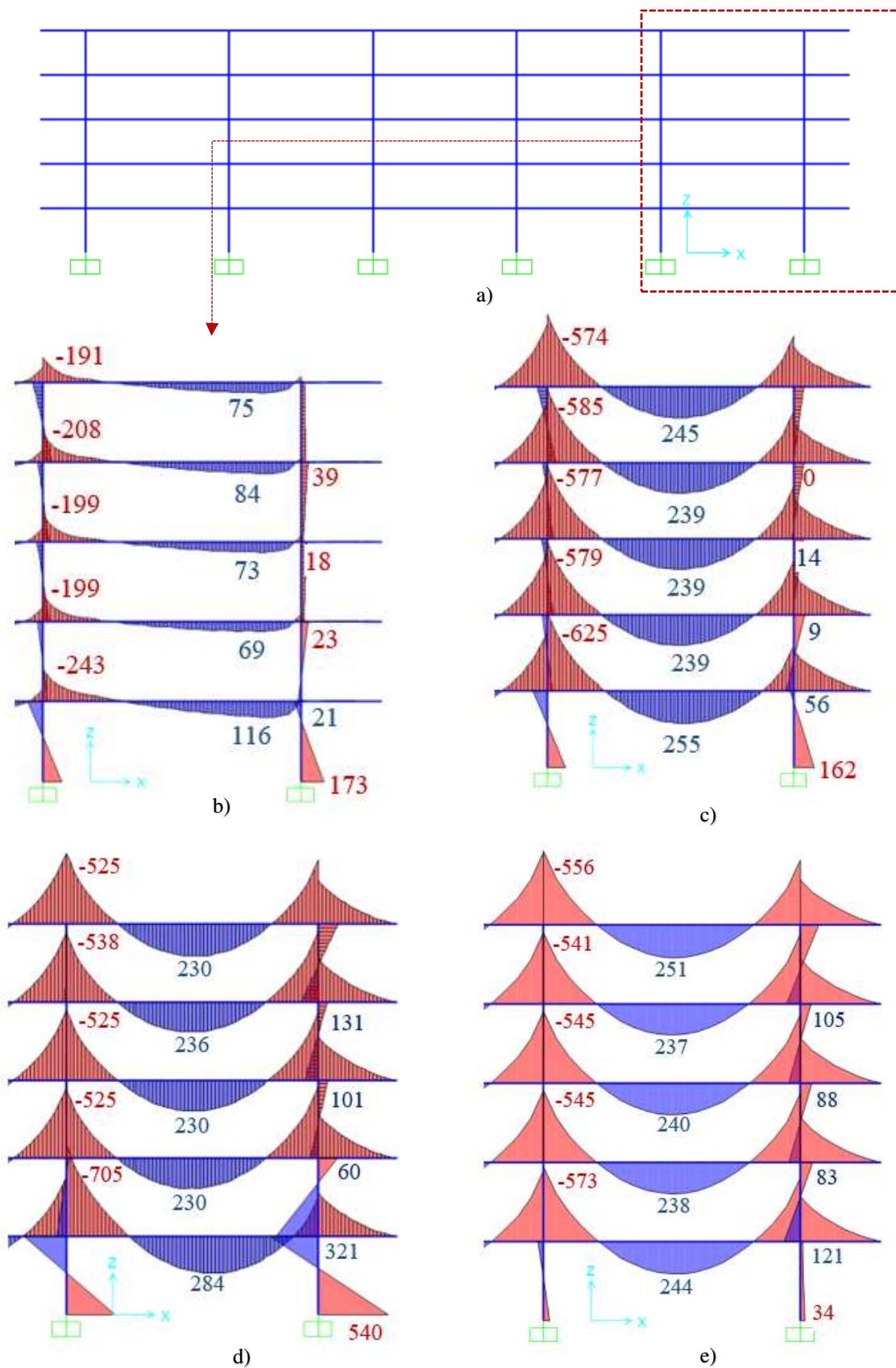
Para exemplificar os efeitos dos fenômenos dependentes do tempo nos esforços de flexão nos pórticos, na Figura 24 são apresentados os diagramas de momentos fletores do modelo 5V5P_AE em 3 estágios distintos da AEE e também o resultado do mesmo pórtico considerando análise clássica, ou seja, modelo 5V5P_AC.

Na Figura 24b, que representa o estágio da estrutura recém-concluída do vão de extremidade do modelo 5V5P_AE, quando se protendeu o último pavimento, observa-se que os momentos positivos da laje são reduzidos em decorrência do efeito da protensão, há uma maior quantidade de momento negativo na laje sobre os pilares e que os pilares extremos sofrem flexão em decorrência da restrição ao encurtamento da laje no ato da protensão. Na Figura 24c são aplicadas as cargas permanentes e sobrecargas de serviço e na Figura 24d a estrutura completa os 10000 dias de idade. Na Figura 24e tem-se os resultados do modelo 5V5P_AC.

Ao se comparar a Figura 24c com a Figura 24d, é possível observar que, para o modelo que considera AEE, mesmo após a aplicação de todas as ações atuantes, os momentos fletores dos pilares extremos continuam aumentando, devido à restrição ao encurtamento da laje relacionado aos efeitos de longo prazo. Consta-se que, ao se comparar a Figura 24d com a Figura 24e, como na AC os efeitos diferidos no tempo não são considerados, os momentos fletores na base dos pilares extremos dos pórticos obtidos com AC resultam em valores muito menores que os obtidos com AEE.

Além disso, para lajes com comprimentos maiores, esses esforços de flexão nos pilares são consideráveis ainda na fase construtiva, como fica evidente na Figura 24b, pois os efeitos de retração do concreto atuam assim que a cura do concreto de cada elemento estrutural é finalizada e os efeitos de fluência ocorrem assim que as lajes são protendidas, de forma que uma parte do encurtamento da laje ocorre durante a construção. Como os pilares restringem parte desse encurtamento, eles sofrem esforços de flexão ainda na fase de construção.

Figura 24 – Comparação dos esforços de momento fletor (kNm): a) elevação do pórtico analisado; b) modelo 5V5P_AE – estágio 16 – 70 dias – protensão PAV5; c) modelo 5V5P_AE – estágio 17 – 98 dias – CP + SC; d) modelo 5V5P_AE – estágio 18 – 10000 dias; e) modelo 5V5P_AC.



Fonte: O autor (2019).

6 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um estudo comparativo entre a análise estrutural evolutiva não-linear e a análise clássica linear-elástica de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas, por meio de estudos de caso, via método dos pórticos múltiplos, utilizando-se o software SAP2000.

Foi possível concluir que a escolha adequada do modelo analítico que representa a variação das propriedades do concreto ao longo tempo é fundamental, já que ela interfere diretamente no cálculo do encurtamento da laje e, conseqüentemente, na redistribuição de esforços no pórtico ao longo do tempo. Neste trabalho, foi adotado o modelo analítico proposto no código modelo FIB (2010), que estava implementado no software de análise estrutural utilizado, e por ser um modelo largamente empregado em pesquisas.

Constatou-se também a importância de considerar a fissuração do concreto dos pilares ao longo do tempo, pois eles sofrem esforços de flexão consideráveis que podem gerar fissuras à medida que a laje encurta e, conseqüentemente, diminuindo sua rigidez, gerando uma nova redistribuição de esforços entre a laje e os pilares. Trata-se, portanto, de um comportamento interativo, que depende de uma série de fenômenos dependentes do tempo que acontecem simultaneamente, como retração, fluência e fissuração do concreto, bem como perdas de protensão nos cabos, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas por meio de uma AEE não-linear, que consiste em uma abordagem mais realista do que a AC linear-elástica. Neste trabalho, como os pilares foram discretizados com elementos de barra, não foi possível avaliar sua fissuração no modelo. Para simular a fissuração do concreto dos pilares de forma simplificada, multiplicou-se o módulo de elasticidade por um fator igual a 0,8.

Os resultados obtidos da AEE, que computou os efeitos diferidos com o tempo, e os obtidos da AC com uma perda de protensão estimada de 20% (já que na AC não é possível computar as perdas no tempo), demonstraram que os valores finais das forças de tração nos cabos foram muito próximos, o que indica que a consideração de uma perda de protensão de 20% foi adequada para os casos estudados.

Conclui-se também que quanto maior o comprimento da laje e maior a rigidez dos pilares, menor é a pré-compressão da 1ª laje e maiores são os esforços de flexão nos elementos estruturais do 1º pavimento. Esses esforços adicionais nos primeiros lances dos pilares extremos, se ignorados, podem vir a comprometer o seu desempenho e até mesmo provocar uma falha estrutural. Seria importante prever alguma medida construtiva que

mitigasse os efeitos da restrição ao encurtamento da laje do 1º pavimento, especialmente para as lajes com comprimentos superiores a 50 m. A previsão de uma faixa de concretagem posterior (*delay strip* ou *pour strip*) na 1ª laje ou ligações flexíveis entre a 1ª laje e os pilares seria uma alternativa interessante, pois diminuiria a restrição à livre deformação da laje, diminuindo, conseqüentemente, os esforços adicionais nos pilares. A partir do 2º pavimento, a restrição ao encurtamento da laje pode ser considerada desprezável para os modelos estudados, de forma que os resultados de esforços solicitantes entre os modelos evolutivos e clássicos foram semelhantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio para a realização e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AALAMI, B. O.; BARTH, F. G. Restraint cracks and their mitigation in unbonded post-tensioned building structures, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, 49 pp; 1988.
2. AALAMI, B. O. Load balancing: a comprehensive solution to post-tensioning. ACI Structural Journal, p. 662-670; 1990.
3. AALAMI, B. O. One-way and two-way post-tensioned floor systems. Post-Tensioning Institute: Technical Notes, Issue 3, Phoenix, 1993.
4. AALAMI, B. O. Hyperstatic (Secondary) Actions in Prestressing and Their Computation. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Phoenix, 1998a.
5. AALAMI, B. O. Prestressing losses and elongation calculations, ADAPT Technical Note, Issue T9-04, 16 pp; 1998b.
6. AALAMI, B. O. Layout of post-tensioning and passive reinforcement in floor slabs. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 8, Phoenix, 2000c.
7. AALAMI, B. O.; KELLEY, G. S. Design of concrete floors with particular reference to post-tensioning. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 11, Phoenix, 2001.
8. AALAMI, B. O. Crack mitigation and evaluation: shortening of post-tensioned members and restraint of supports. ADAPT, Technical Notes 451, Redwood City, 2016a.
9. AALAMI, B. O. Temperature design of post-tensioned floors. ADAPT, Technical Notes 463, Redwood City, 2016b.
10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building code requirements for structural concrete and commentary – ACI 318, Farmington Hills, 2011.

11. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Recommendations for concrete members prestressed with unbonded tendons – ACI 423.3R, Farmington Hills, 2005.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
13. CARNEIRO, A. L. Análise e dimensionamento de lajes lisas protendidas sem aderência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
14. COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DO BETÃO (CEB) – FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DA PROTENSÃO (FIP). Model Code 1990: final draft. Lausanne, Switzerland, 1991.
15. EMERICK, A. A. Projeto e Execução de Lajes Protendidas. Editora Interciência Brasília, 2005. 192 p.
16. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). Model Code 2010: final draft. Lausanne, Switzerland, 2011.
17. FINTEL, M. GHOSH, S. K. Case study of effects of post-tensioning the beams in a 45-story building. ACI Journal, V. 75, No. 5, pp. 184-191, 1978.
18. GUO, G.; JOSEPH, L. M. e BIEBERLY, G. E. Restrain Design of Cast-in-place post-tensioned underground parking structures. Post-Tensioning Institute, Technical Paper, V. 7, nº. 1; 2009.
19. GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part I: model selection. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013a.
20. GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part II: calculations. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013b.
21. GUO, G.; JOSEPH, L. M.; DARWIN, D. Effects of story-by-story post-tensioning on multi-story buildings. ACI Structural Journal, V. 110, No. 4, 2013.

ARTIGO 2

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ANÁLISE ESTRUTURAL EVOLUTIVA E A ANÁLISE CLÁSSICA DE UM EDIFÍCIO COM LAJES LISAS PROTENDIDAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Lucas Ribeiro Oliveira^a, Gustavo de Souza Veríssimo^a, José Carlos Lopes Ribeiro^a, José Luiz Rangel Paes^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus da UFV, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil.

*Artigo preparado para submissão a revista na área de Engenharias I.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre os resultados de uma análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e a análise clássica linear-elástica (AC) de um edifício com lajes lisas protendidas, com base em um modelo completo da estrutura, discretizado de acordo com o Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o software SAP2000. Para a análise evolutiva, foram consideradas a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (módulo de elasticidade, retração e fluência do concreto), as perdas de protensão imediatas e progressivas, bem como a sequência de construção e de carregamento da estrutura. Por fim, os resultados das tensões de pré-compressão, momentos fletores e deslocamentos das lajes e dos pilares dos modelos evolutivos são comparados com os dos modelos clássicos.

Palavras-chave: lajes lisas protendidas, análise estrutural evolutiva, análise incremental, análise não-linear, retração, fluência, restrição ao encurtamento da laje.

ABSTRACT

This paper depicts a study comparing results of a nonlinear staged-construction analysis with classic linear elastic analysis of building structures with prestressed flat slabs modeled according to the Finite Elements Method, through a case study using SAP2000 software. The staged-construction analysis encompassed the concrete properties' evolution through time (elastic modulus, shrinkage, and creep). The prestressing losses, the sequence of construction and loading for the structure were also considered. Finally,

the numerical results of the nonlinear staged-construction analysis model were compared with the results of the classical model.

Keywords: post-tensioned structures, staged-construction analysis, incremental analysis, nonlinear analysis, creep, shrinkage, restrain to shortening problems.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos anos recentes, com a difusão do uso das lajes protendidas com cordoalhas engraxadas e plastificadas, alguns projetistas vêm ousando projetar lajes com dimensões cada vez maiores e edifícios cada vez mais altos, e isto tem levado à manifestação de alguns problemas relacionados aos esforços adicionais que são gerados pela restrição ao encurtamento da laje devido às estruturas de apoio (RTS – *restrain to shortening problems*). A tendência ao encurtamento da laje é um efeito provocado pela força de pré-compressão no ato da protensão, por retração e fluência do concreto e pela variação da temperatura. As estruturas de apoio também provocam certa restrição a este encurtamento, quais sejam, pilares, pilares-parede e núcleos-rígidos, concretados monoliticamente à laje. Quanto maior o comprimento da laje e maior a rigidez dos apoios, mais importantes são os problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje.

A restrição ao encurtamento da laje no ato da protensão, provocada pelos pilares, gera uma descompressão na laje do pavimento, pois parte da força de pré-compressão aplicada na laje em análise é desviada para as lajes dos pavimentos previamente concretados. Esta retenção da força de pré-compressão da laje e desvio para os outros pavimentos é causada pelos elementos verticais da estrutura que, por consequência, sofrem esforços adicionais de momento fletor e força cortante. Essa redistribuição entre os pavimentos das forças horizontais de pré-compressão aplicadas no plano da laje somente pode ser observada por meio de uma análise estrutural que considera as etapas construtivas.

Os problemas relacionados à restrição ao encurtamento de lajes protendidas também estão relacionados aos efeitos de longo prazo, como variação de temperatura, retração e fluência do concreto, que fazem com que a laje tenda a encurtar ao longo do tempo. Entretanto, sua deformação é restringida pelos pilares, de tal maneira que surgem esforços de tração na laje e esforços de flexão nos pilares. Daí a importância de se considerar a não-linearidade física do concreto nas análises estruturais. Dependendo das condições de contorno, esses esforços podem ser de magnitude considerável.

Para a avaliação dos esforços e deslocamentos da estrutura de um edifício como um todo, é possível utilizar uma análise estrutural clássica (AC) ou uma análise estrutural evolutiva (AEE). Na análise estrutural clássica, as estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos são normalmente analisadas em uma única etapa, considerando-se a estrutura completa, com todas as ações atuando no edifício ao mesmo tempo, como peso próprio, cargas permanentes de revestimento e alvenarias, sobrecargas de serviço e forças laterais de vento. Por outro lado, a análise estrutural evolutiva é uma análise estática não-linear, que leva em consideração o conceito de carregamento incremental, ou seja, considera-se as etapas de construção e carregamento da estrutura, podendo ou não levar em conta a variação das propriedades dos materiais com o tempo.

No caso de estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos com lajes lisas protendidas, uma série de fenômenos dependentes do tempo acontecem simultaneamente, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas por meio de uma AEE, que permite levar em conta as diversas etapas do processo construtivo e a introdução dos carregamentos em etapas. Esse tipo de análise permite computar os esforços e deformações em cada estágio da construção, para cada porção da estrutura que vai sendo montada, seguindo a sequência de construção. Dessa forma, efeitos de fenômenos como protensão, retração e fluência do concreto, relaxação do aço de protensão, restrição à deformação de elementos protendidos devido à rigidez à flexão das estruturas de apoio, variação de temperatura, etc., podem ser considerados em instantes específicos, reproduzindo o que ocorre com a estrutura de forma mais realista do que o que se consegue com a AC.

1.2 ANTECEDENTES

Um dos primeiros trabalhos de investigação sobre o efeito evolutivo das etapas de protensão nos esforços solicitantes de vigas e pilares de um edifício foi apresentado por Fintel e Gosh (1978). Posteriormente, Guo, Joseph e Bieberly (2009) realizaram uma análise dos efeitos da restrição ao encurtamento em lajes protendidas de garagens em subsolos em decorrência das cortinas de contenção rigidamente ligadas à laje. Os autores avaliaram a descompressão da laje, por meio de uma análise linear-elástica com um modelo de elementos finitos, com auxílio do software ETABS. Nesse trabalho foi considerado apenas o efeito das forças horizontais de pré-compressão no ato da protensão, variando-se o grau de interação entre a laje e a cortina. Guo, Joseph e Darwin (2013) fizeram um estudo da redistribuição das forças horizontais de pré-compressão das lajes

durante as etapas de protensão, por meio de uma análise estrutural evolutiva de pórticos de edifícios de múltiplos pavimentos com laje lisa protendida, com auxílio do software SAP2000. Nesse trabalho, foram aplicadas apenas as forças horizontais de protensão no modelo e não se levou em conta a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo. A perda de protensão no tempo infinito foi considerada de forma simplificada por meio de uma força de tração equivalente. Guo e Joseph (2013a, 2013b) fizeram um estudo comparando 5 modelos matemáticos frequentemente utilizados para o cálculo do encurtamento de lajes protendidas levando em conta os efeitos da fluência e da retração do concreto. Os 5 modelos comparados foram o B3 (proposto por Bažant, 1995), o GL2000 (proposto por Gardner e Lockman, 2001), o do CEB-FIP (1990), o do ACI209.2R (2008) e o do PCI (1999). Concluíram que o cálculo da retração e da fluência do concreto no tempo infinito, variando-se a relação volume/área da laje, utilizando os modelos B3, GL2000 e o do CEB-FIP (1990), resulta em valores próximos e mais adequados do que o cálculo pelos modelos do PCI e do ACI209.2R.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Atualmente, tem-se observado no meio técnico brasileiro que não é usual considerar os efeitos da restrição ao encurtamento de lajes lisas protendidas de edifícios, devido às estruturas de apoio. Estes efeitos podem gerar descompressão e fissuras de restrição na laje, além de provocar esforços adicionais nos pilares e outras estruturas verticais que suportam a laje.

Recentemente, diversos casos de manifestações patológicas, e até falhas estruturais, em estruturas de edifícios com lajes protendidas de grandes comprimentos tem sido reportados. Algumas estruturas tem sido projetadas sem uma análise mais rigorosa dos efeitos que interferem na evolução dos esforços e das deformações, chamando a atenção dos profissionais da área e evidenciando a necessidade de novos estudos sobre a forma de avaliar o comportamento estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas.

Com a evolução dos softwares de análise estrutural, atualmente é possível realizar análises avançadas, levando-se em consideração o efeito incremental das etapas de construção e de carregamento na estrutura, além da variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo. Dessa forma, é possível avaliar o comportamento de estruturas com lajes protendidas de forma mais realista do que se consegue com a AC.

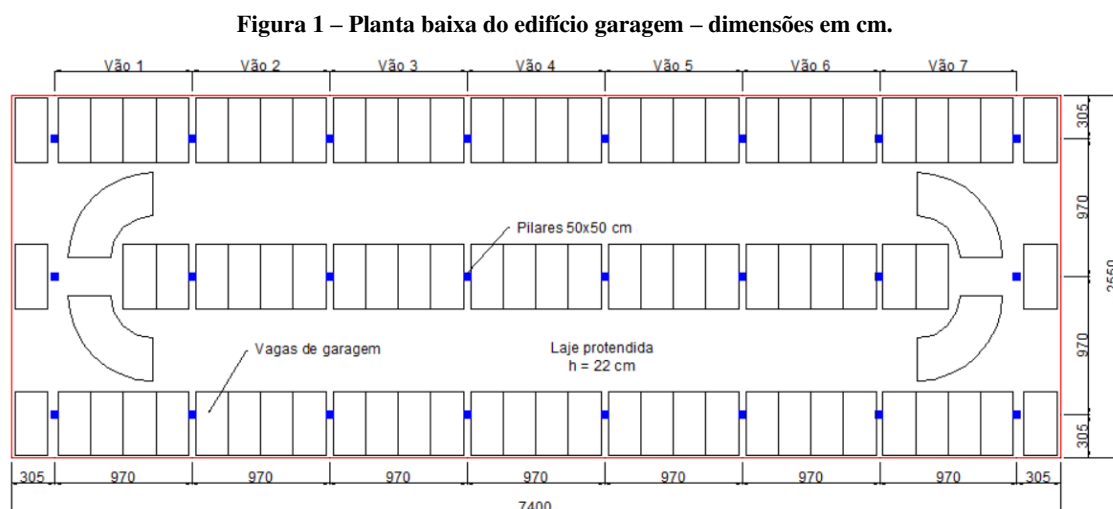
Apesar de existirem ferramentas de cálculo que permitem a introdução das etapas de construção e dos efeitos diferidos com o tempo na análise estrutural, o estudo da sua influência nos esforços solicitantes e deslocamentos em estruturas ainda não tem sido objeto de maior atenção, principalmente em edifícios com lajes lisas protendidas.

Neste trabalho, busca-se aprofundar o entendimento do comportamento de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas por meio de análise estrutural avançada. Apresenta-se uma análise comparativa entre resultados obtidos de uma AEE e de uma AC de um edifício com lajes lisas protendidas, por meio de um estudo de caso, com base em um modelo completo da estrutura discretizado em elementos finitos, utilizando-se o software SAP2000 v20. Para a AEE, foram consideradas a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo (módulo de elasticidade, retração e fluência do concreto), as perdas de protensão imediatas e progressivas, bem como a sequência de construção e de carregamento da estrutura.

O objetivo deste trabalho é contribuir para um melhor entendimento do comportamento estrutural de lajes de concreto protendidas, considerando-se diversos fenômenos complexos que governam a evolução das tensões e deformações nos materiais, bem como da utilização da análise estrutural evolutiva, haja vista a escassez de estudos aprofundados sobre o tema no Brasil.

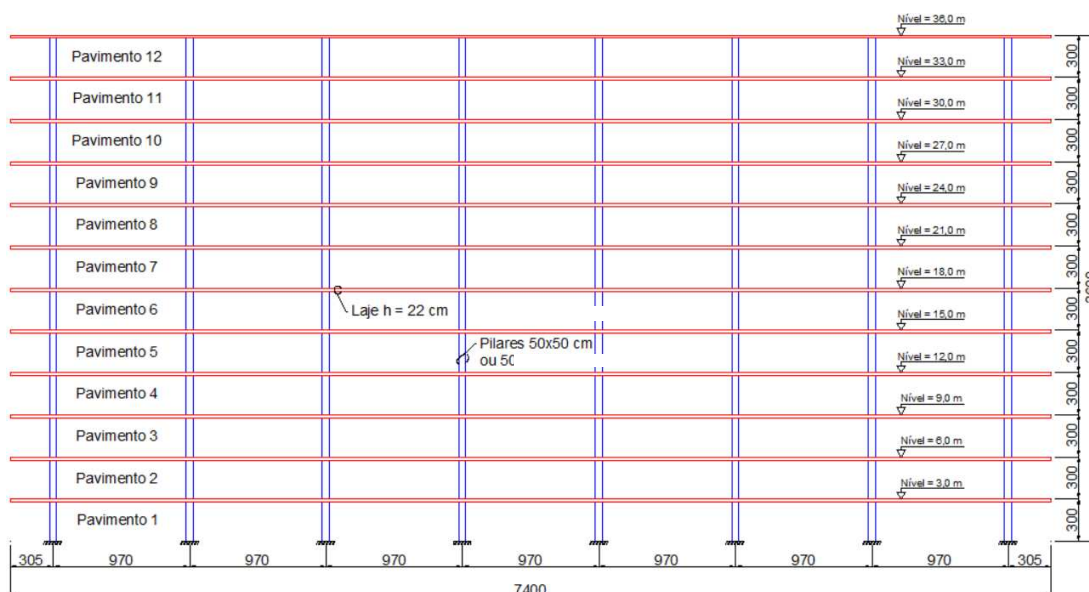
2 DESCRIÇÃO DO MODELO

Na Figura 1, apresenta-se a planta baixa do edifício garagem considerado, com vãos entre pilares de 9,7 m, com um balanço ao redor da laje de 3,05 m e pé-direito estrutural de 3 m, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: O autor (2019).

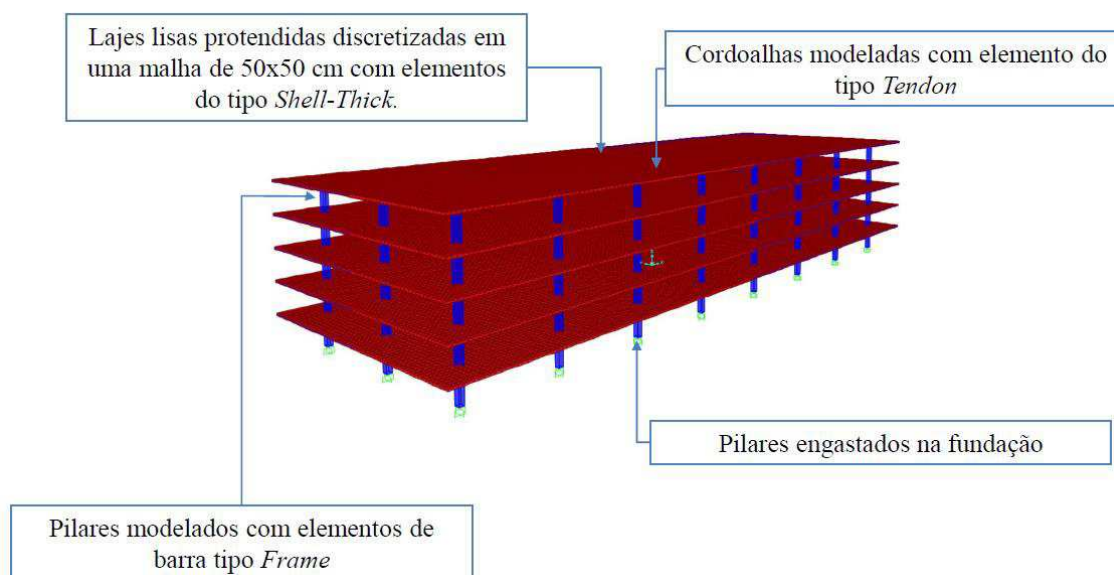
Figura 2 – Corte esquemático do edifício garagem – dimensões em cm.



Fonte: O autor (2019).

Para modelagem da estrutura no SAP2000 v20, as lajes lisas protendidas foram discretizadas com elementos do tipo *Shell-Thick* e os pilares com elementos de barra tipo *Frame*. As lajes possuem espessura de 22 cm e os pilares têm seção transversal de 50x50 cm. Uma imagem do modelo 3D da estrutura pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Aspecto do modelo 3D da estrutura do edifício garagem no SAP2000 v20.

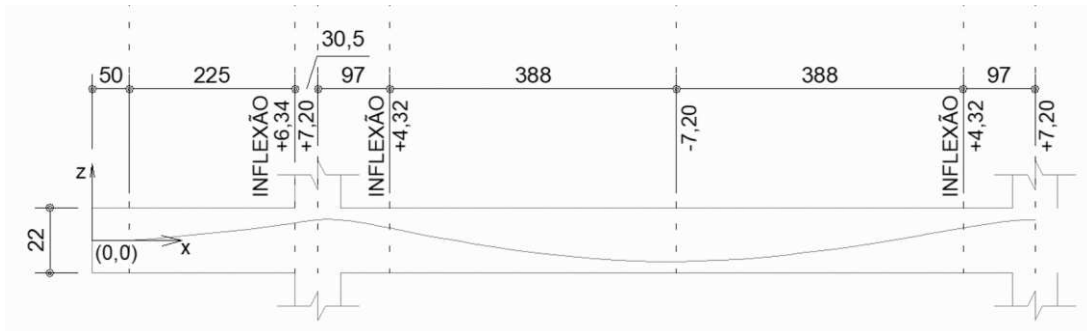


Fonte: O autor (2019).

No SAP2000 v20, os cabos de protensão são modelados como elementos do tipo *Tendon*. O traçado vertical dos cabos foi definido fornecendo-se as coordenadas dos pontos inicial e final, além dos pontos de maiores excentricidades e de inflexão, ligando-os por retas ou parábolas. O traçado vertical típico do cabo adotado neste trabalho está

ilustrado na Figura 4, seguindo as sugestões apresentadas em Carneiro (2015), Emerick (2005), NBR 6118 (ABNT, 2014) e Aalami (2000c).

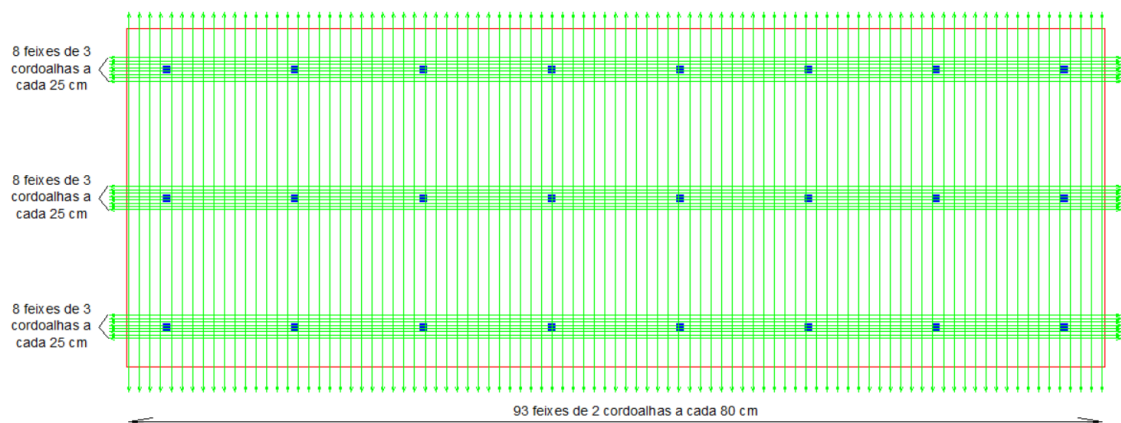
Figura 4 – Traçado vertical típico dos cabos de protensão.



Fonte: O autor (2019)

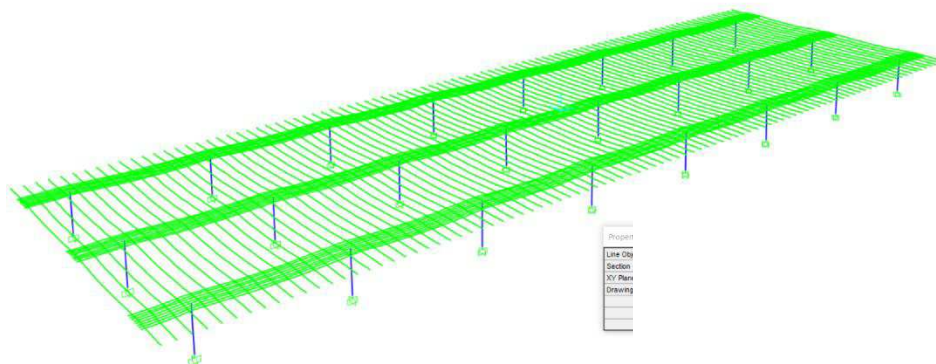
A distribuição em planta das cordoalhas é apresentada na Figura 5 e na Figura 6, em que os cabos foram concentrados sobre os pilares na direção de maior comprimento da laje e distribuídos na outra direção.

Figura 5 – Distribuição em planta das cordoalhas de protensão.



Fonte: O autor (2019).

Figura 6 – Perspectiva 3D dos cabos de protensão no SAP2000 v20.



Fonte: (O autor, 2019).

Os cabos de protensão no SAP2000 v20 podem ser definidos como elementos ou como carregamento equivalente de protensão. Quando definido como um elemento, o cabo é automaticamente discretizado em partes menores. Neste caso, deve-se fornecer a força ou tensão inicial do cabo no momento da protensão, os coeficientes de atrito entre o cabo e a bainha e o escorregamento do cabo nas ancoragens. Com isso, as perdas de protensão iniciais são automaticamente calculadas pelo software, que oferece de forma gráfica a variação da força de protensão ao longo do cabo. Além disso, as perdas de protensão progressivas também são calculadas, adotando-se AEE, considerando-se a não-linearidade física do concreto e ativando o cálculo da relaxação do aço de protensão. Este recurso avançado, possibilita obter a força do cabo em qualquer coordenada do mesmo e em qualquer idade, levando-se em conta uma série de fenômenos dependentes do tempo, como a retração e a fluência do concreto, a variação da temperatura e as etapas de construção e carregamento da estrutura.

Por outro lado, quando os cabos são definidos como carregamento equivalente, os efeitos dependentes do tempo não são considerados e as perdas de protensão progressivas devem ser fornecidas pelo usuário. Os efeitos da protensão, considerando os cabos como carregamento no SAP2000 v20, foram comparados com os resultados do método do balanceamento de cargas (Lin, 1963, *apud* Aalami, 1990), cujos resultados obtidos foram idênticos.

Para os cabos de protensão foram adotadas cordoalhas de aço CP190 RB, com diâmetro de 12,7 mm e 98,7 mm² de seção transversal cada uma. Conforme ilustrado na Figura 5 e na Figura 6, os cabos concentrados foram divididos em 8 feixes de 3 cordoalhas espaçados a cada 25 cm e os cabos distribuídos em 93 feixes de 2 cordoalhas espaçados a cada 80 cm. Cada feixe de cordoalha foi modelado como um único cabo. Na Tabela 1, são apresentados os dados do cabo informados no SAP2000. É prática comum nos projetos adotar uma força constante ao longo do cabo, de forma que, para o modelo que considera AC, a alternativa adotada para avaliar os resultados da análise estrutural no tempo “infinito” foi aplicar uma força no cabo, considerando todas as perdas de protensão (estimadas em 20%), no valor de 120 kN por cordoalha. Para a AEE, aplicou-se uma tensão de 1503 MPa no ato da protensão, que corresponde a $0,88f_{pyk}$, conforme limitado pela ABNT NBR 6118:2014. Com isso, no tempo infinito, a tensão média de pré-compressão estimada na laje foi de 1,54 MPa na direção de maior comprimento e de 1,37 MPa na direção transversal, o que atende ao limite mínimo de 1,0 MPa definido pela

ABNT NBR 6118:2014, desde que não haja retenção da pré-compressão pelas estruturas verticais de apoio.

Tabela 1 – Parâmetros inseridos no SAP2000 v20 para modelagem dos cabos de protensão.

Tipo de Análise Estrutural	AEE		AC	
	Feixe com 2 cordoalhas	Feixe com 3 cordoalhas	Feixe com 2 cordoalhas	Feixe com 3 cordoalhas
Número de cordoalhas por feixe				
Máxima discretização do cabo (m)	1,0	1,0	-	-
Opção de modelagem dos cabos	Cabos como elementos	Cabos como elementos	Cabos como carregamento	Cabos como carregamento
Área do cabo (mm ²)	197,4	296,1	197,4	296,1
Tensão inicial aplicada nos cabos (MPa)	1503	1503	-	-
Força aplicada nos cabos (kN)	-	-	240	360
Coefficiente de curvatura dos cabos	0,05	0,05	0	0
Coefficiente de curvatura parasita (1/m)	0,0005	0,0005	0	0
Escorregamento na ancoragem (mm)	6,0	6,0	0	0
Perda de protensão por encurtamento elástico (MPa)	0*	0*	0	0
Perda de protensão por fluência (MPa)	0*	0*	0	0
Perda de protensão por retração (MPa)	0*	0*	0	0
Perda de protensão por relaxação do aço (MPa)	0*	0*	0	0

*As perdas de protensão progressivas são calculadas automaticamente pelo SAP2000 v20.

Fonte: O autor (2019).

3 ETAPAS DE CONSTRUÇÃO E CARREGAMENTO

As ações verticais consideradas no modelo foram:

- peso próprio: $PP = 5,5 \text{ kN/m}^2$
- revestimento: $CP1 = 2,0 \text{ kN/m}^2$;
- sobrecarga de uso: $SC = 3,0 \text{ kN/m}^2$;
- alvenaria no contorno da laje: $CP2 = 2,7 \text{ kN/m}$.

Para o modelo avaliado com a AC, todas as ações foram aplicadas de forma simultânea. Por outro lado, para a AEE as ações foram aplicadas em etapas, conforme a Tabela 2. Considerou-se um ciclo de concretagem de laje a cada 14 dias e que as ações de revestimentos, paredes e sobrecargas de utilização entrariam em serviço somente após 28 dias da conclusão de toda a estrutura.

A combinação de ações adotada para comparar os resultados entre os modelos foi a combinação rara de serviço, com os coeficientes de majoração de todas as ações com o valor unitário.

Tabela 2 – Etapas de construção e carregamento adotadas na AEE.

Fase	Estágio	Idade (dias)	Observação	Elementos estruturais adicionados	Ações aplicadas
1º Pavimento	1	3	Concretagem dos Pilares - 1º Pavimento	Pilares 1º Pavimento	Peso próprio: Pilares 1º Pavimento
	2	9	Concretagem das Lajes - 1º Pavimento	Lajes 1º Pavimento	-
	3	14	Protensão das Lajes - 1º Pavimento	Cabos 1º Pavimento	Protensão: Cabos 1º Pavimento Peso próprio: Lajes 1º Pavimento
2º Pavimento	4	17	Concretagem dos Pilares - 2º Pavimento	Pilares 2º Pavimento	Peso próprio: Pilares 2º Pavimento
	5	23	Concretagem das Lajes - 2º Pavimento	Lajes 2º Pavimento	-
	6	28	Protensão das Lajes - 2º Pavimento	Cabos 2º Pavimento	Protensão: Cabos 2º Pavimento Peso próprio: Lajes 2º Pavimento
*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*
5º Pavimento	13	157	Concretagem dos Pilares 5º Pavimento	Pilares 5º Pavimento	Peso próprio: Pilares 5º Pavimento
	14	163	Concretagem das Lajes 5º Pavimento	Lajes 5º Pavimento	-
	15	70	Protensão das Lajes 5º Pavimento	Cabos 5º Pavimento	Protensão: Cabos 5º Pavimento Peso próprio: Lajes 5º Pavimento
SC + CP	16	98	Aplicação das cargas permanentes e acidentais	-	Cargas permanentes de revestimento e alvenaria + sobrecarga de serviço
1000 dias	17	10000	Duração total da análise igual a 10000 dias	-	-

Fonte: O autor (2019).

4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DEPENDENTES DO TEMPO

Como já comentado, o cálculo do encurtamento das lajes lisas protendidas é fundamental para avaliar os esforços adicionais causados pela restrição à livre deformação da laje em decorrência das estruturas verticais de apoio. Dessa forma, a escolha dos modelos analíticos apropriados, que descrevam a variação das propriedades dos materiais com o tempo, interfere de forma significativa nos resultados de uma análise estrutural evolutiva, que considera a não-linearidade física dos materiais. Uma vez calculado o encurtamento estimado da laje, os elementos estruturais podem ser projetados e detalhados para absorver os encurtamentos resultantes ou resistir aos esforços que resultam das restrições ao encurtamento. Os modelos do CEB-FIP (1990), da FIB (2010) e o GL2000 encontram-se implementados no SAP2000 v20. Dessa forma, neste trabalho, para considerar o efeito da variação das propriedades dos materiais, a relaxação do aço de protensão foi calculada conforme o CEB-FIP (1990) e a fluência, a retração e a variação da resistência e rigidez do concreto ao longo do tempo foram calculadas de acordo com as formulações da FIB (2010). Com o intuito de considerar de forma simplificada a fissuração do concreto, o módulo de elasticidade do concreto dos pilares foi multiplicado por um fator igual a 0,8, ao passo que, para as lajes protendidas, adotou-se o módulo de elasticidade integral. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros

inseridos no SAP2000 v20. Nas figuras 7 a 16 são apresentados os gráficos das propriedades do concreto e das cordoalhas de protensão ao longo do tempo.

Tabela 3 – Seleção dos parâmetros de análise para considerar a variação das propriedades dependentes do tempo dos materiais no SAP2000 v20.

Parâmetros	Elemento Estrutural		
	Laje	Pilar	Cabos
Tipo de material	Concreto (<i>concrete</i>)	Concreto (<i>concrete</i>)	Cordoalha (<i>tendon</i>)
Tipo de histerese	Isotrópico (<i>isotropic</i>) <i>Kinematic</i>	Isotrópico (<i>isotropic</i>) <i>Kinematic</i>	<i>Uni-axial</i> <i>Kinematic</i>
Diagrama tensão-deformação	Definido pelo usuário	Definido pelo usuário	Definido pelo usuário
Modelo de variação das propriedades dos materiais com o tempo	FIB (2010)	FIB (2010)	CEB-FIP (1990)
Resistência f_{ck} do concreto	30 MPa	30 MPa	-
Resistência ao escoamento do aço f_y	-	-	1710 MPa
Resistência à ruptura do aço f_u	-	-	1900 MPa
Módulo de elasticidade aos 28 dias	29700 MPa	23760 MPa	200.000 MPa
Peso próprio	25 kN/m ³	25 kN/m ³	78,5 kN/m ³
Variação do módulo de elasticidade	✓	✓	-
Fluência	✓	✓	-
Retração	✓	✓	-
Tipo de análise de fluência	Integração completa	Integração completa	-
Tipo de cimento	42,5N	42,5N	-
Umidade relativa	70%	70%	-
Idade de início da retração (dias)	5	5	-
Espessura fictícia h (cm)	22	16,7* 25**	-
Idade de início do carregamento (dias)	5	5	-
Relaxação do aço de protensão	-	-	Integração completa
Classe CEB-FIP do aço protendido	-	-	2
Tensão aplicada / tensão resistente do aço	-	-	0.80

Fonte: O autor (2019).

Figura 7 – Diagrama tensão-deformação do concreto das lajes e dos pilares.

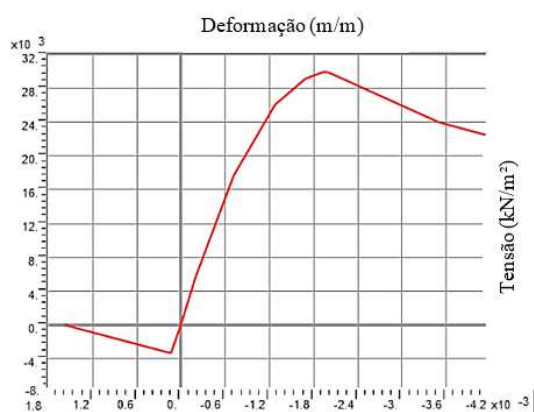


Figura 8 – Resistência média do concreto das lajes e dos pilares ao longo do tempo.

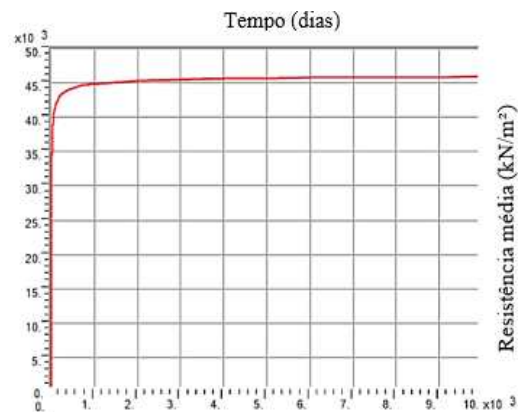


Figura 9 – Coeficiente de fluência do concreto dos pilares ao longo do tempo.

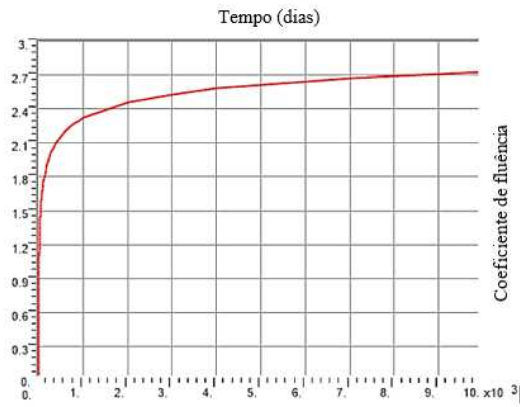


Figura 10 – Retração do concreto dos pilares ao longo do tempo.

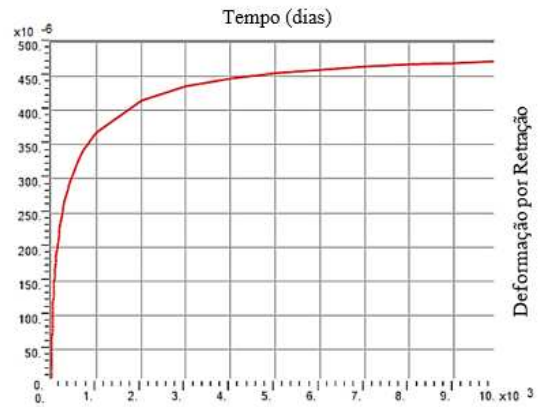


Figura 11 – Módulo de elasticidade do concreto dos pilares ao longo do tempo.

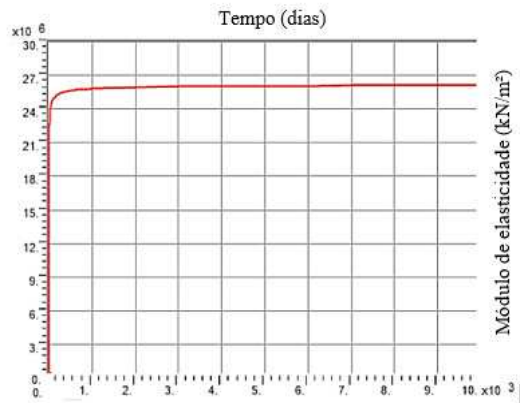


Figura 12 – Coeficiente de fluência do concreto das lajes ao longo do tempo.

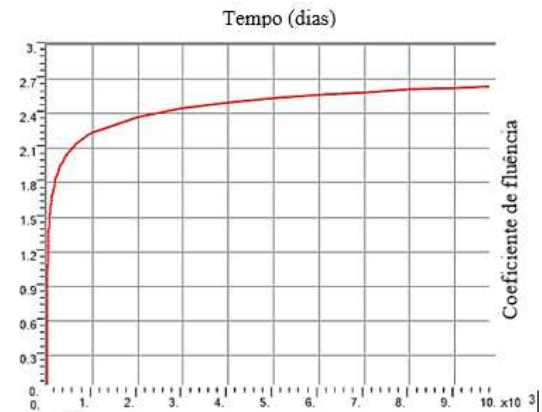


Figura 13 – Retração do concreto das lajes ao longo do tempo.

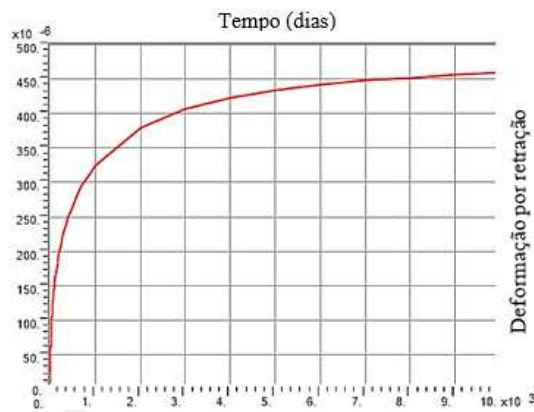


Figura 14 – Módulo de elasticidade do concreto das lajes ao longo do tempo.

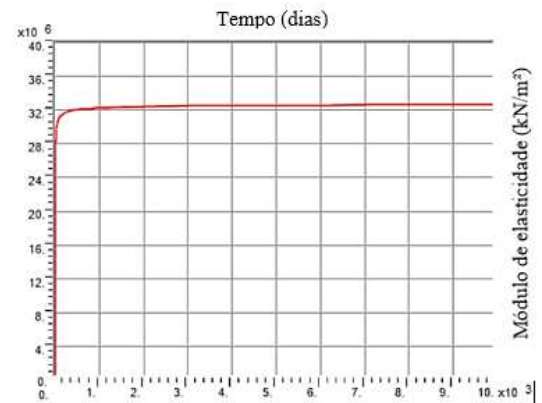


Figura 15 – Diagrama tensão-deformação do aço de protensão.

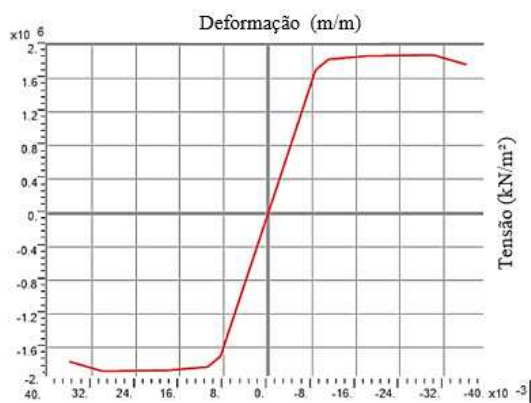
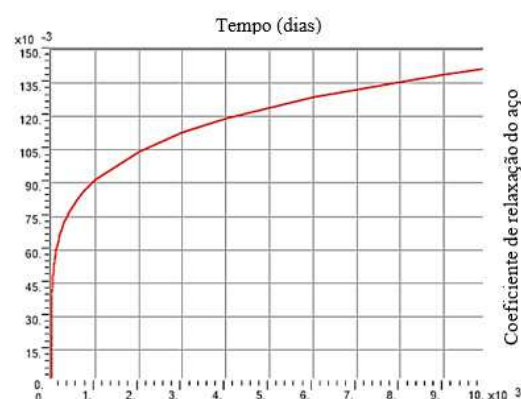


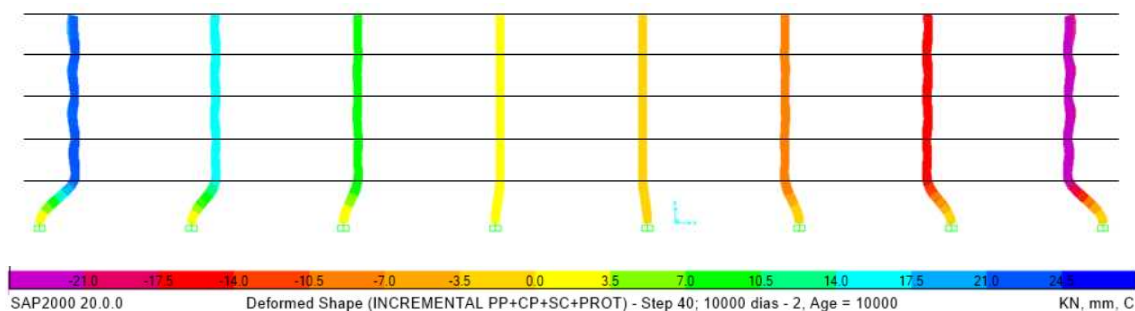
Figura 16 – Coeficiente de relaxação do aço de protensão ao longo do tempo.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

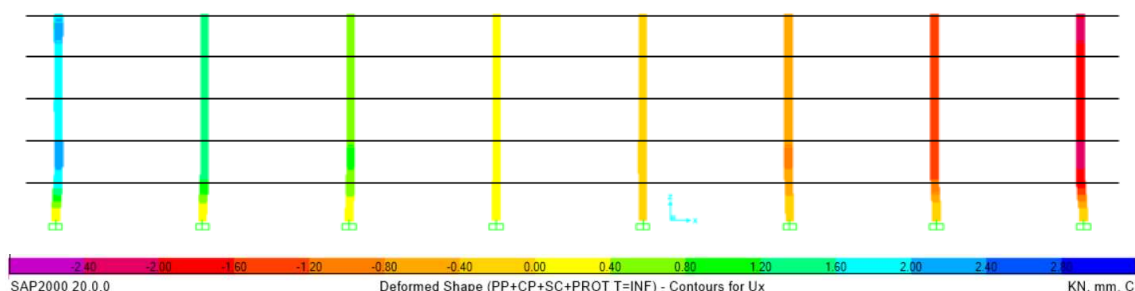
Na Figura 17 e na Figura 18 são apresentados os deslocamentos horizontais da estrutura do modelo evolutivo e do modelo clássico, respectivamente, os quais tem relação com o encurtamento da laje em cada pavimento.

Figura 17 – Deslocamento na direção x (cm) da estrutura na idade de 10000 dias no modelo com AEE.



Fonte: O autor (2019).

Figura 18 - Deslocamento na direção x (cm) da estrutura no modelo com AC.



Fonte: O autor (2019).

Observa-se que no modelo evolutivo, a 1ª laje sofre uma restrição ao encurtamento maior que as demais. Além disso, a partir da 2ª laje, os pavimentos sofrem encurtamentos semelhantes, ou seja, o deslocamento horizontal diferencial entre os pavimentos a partir da segunda laje é quase nulo e, portanto, a restrição ao encurtamento das lajes superiores

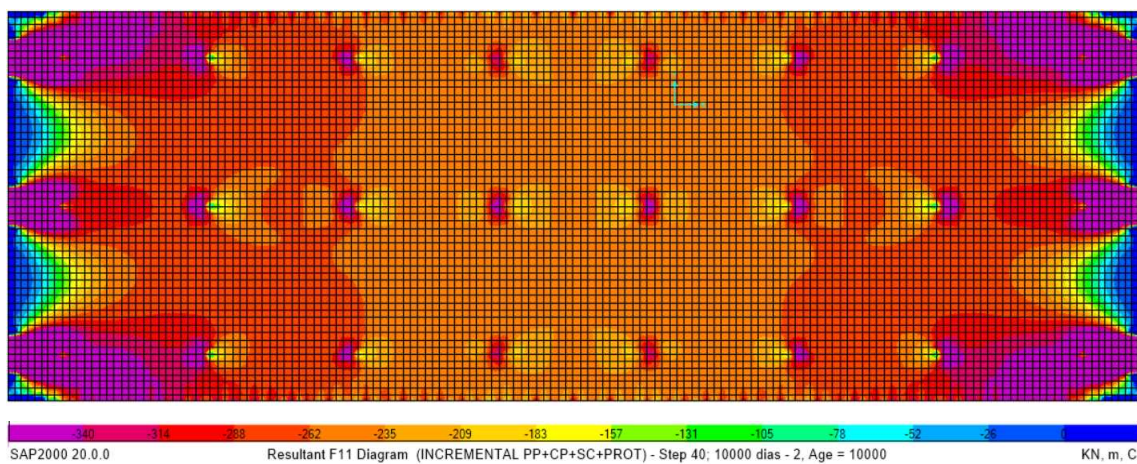
devido aos pilares do pavimento imediatamente inferior é desprezável para este estudo de caso específico e, conseqüentemente, os resultados dos esforços e deslocamentos da 2ª à 5ª laje são muito próximos. Aalami (2016a) ressalta que para casos em que se tem estruturas verticais muito rígidas nas extremidades da laje, como pilares-parede e núcleos-rígidos, os efeitos da restrição ao encurtamento da laje podem ser importantes também para os pavimentos superiores. Observa-se também que os resultados dos deslocamentos horizontais no modelo clássico são da ordem de 1/10 dos obtidos do modelo evolutivo, por não considerar os fenômenos da retração, da fluência e o efeito incremental.

Na Figura 19 e na Figura 20 são apresentadas as forças de pré-compressão da laje do 1º pavimento dos modelos evolutivo e clássico, respectivamente. Para obter a tensão de pré-compressão da laje em MPa, basta dividir o resultado da força de pré-compressão em kN/m pela altura da laje em mm. Caso não houvesse nenhuma retenção da força de pré-compressão da laje, a força média resultaria em 340 kN/m, para cordoalhas protendidas com carga de 120 kN. Essa situação é representada pelas regiões com a cor lilás nas Figuras 19 a 22.

Observa-se que a 1ª laje do modelo com AEE sofre uma perda de pré-compressão significativa. Comparando os resultados entre a Figura 19 e a Figura 20, observa-se que a retenção da força de pré-compressão do modelo com AC é bem menor do que do modelo com AEE, como era esperado. De acordo com Aalami (2000), há de se ter armadura passiva adicional para combater esforços de tração devido à retração e à variação da temperatura quando a tensão de pré-compressão resultante é menor que 0,70 MPa. Observa-se que nas regiões das ancoragens das cordoalhas há o espraiamento da força de protensão dos cabos concentrados, formando um ângulo de 45° com a borda da laje, gerando regiões em formato de cunha que deverão ter armaduras passivas adicionais, pois nessas regiões a pré-compressão é insuficiente, conforme descrito em Aalami (2000).

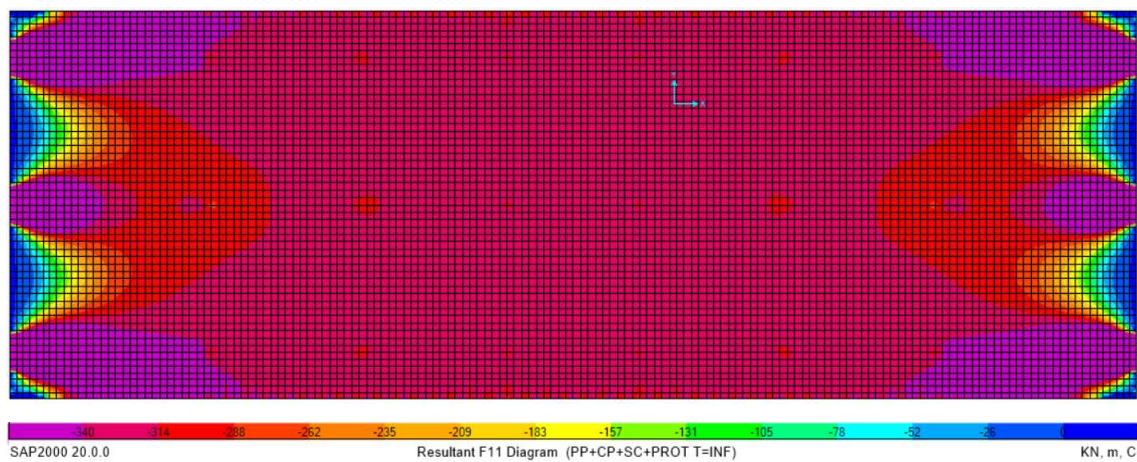
A partir da 2ª laje, por outro lado, de acordo com a Figura 21 e a Figura 22, tanto para o modelo evolutivo, quanto para o modelo clássico, observa-se uma retenção da protensão desprezável e, portanto, vale a hipótese de que a força efetiva de protensão dos cabos seja igual à força de pré-compressão da laje. De acordo com as figuras 23 a 26, existe uma grande semelhança na distribuição dos esforços de flexão nas lajes entre o modelo com AEE e o com AC, com exceção dos momentos negativos sobre os pilares da 1ª laje, em que o modelo evolutivo resulta em esforços maiores do que o clássico, devido à restrição à livre deformação da laje provocada pelos pilares, principalmente sobre os pilares de extremidade.

Figura 19 - Força de pré-compressão na direção x (kN/m) da laje do 1º pavimento no modelo com AEE na idade de 10000 dias.



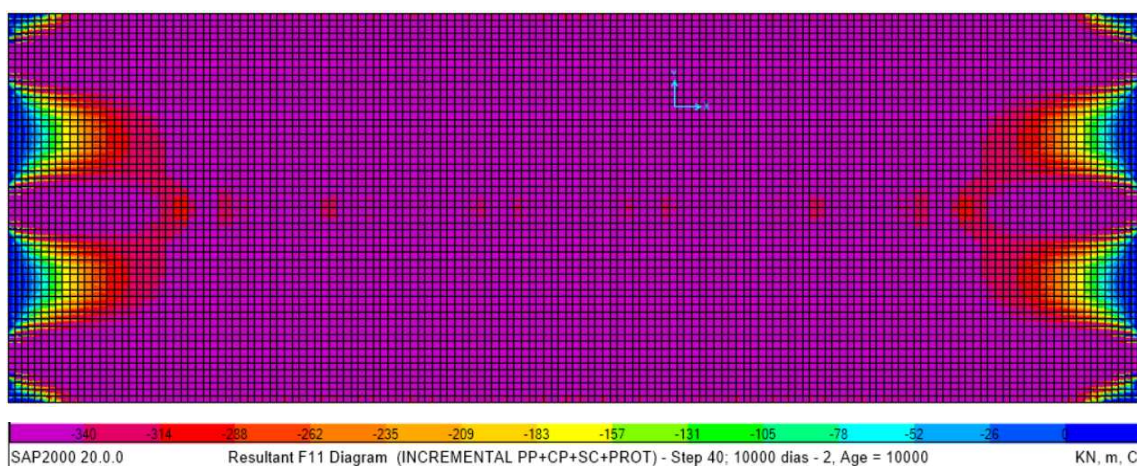
Fonte: O autor (2019).

Figura 20 - Força de pré-compressão na direção x (kN/m) da laje do 1º pavimento no modelo com AC.



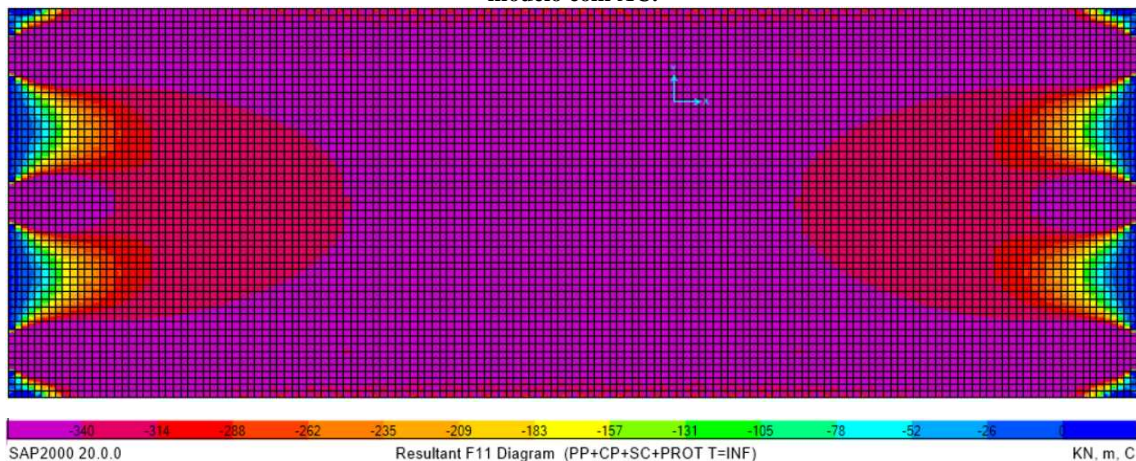
Fonte: O autor (2019).

Figura 21 - Força de pré-compressão da laje em kN/m na direção x da laje do 2º pavimento no modelo com AEE na idade de 10000 dias.



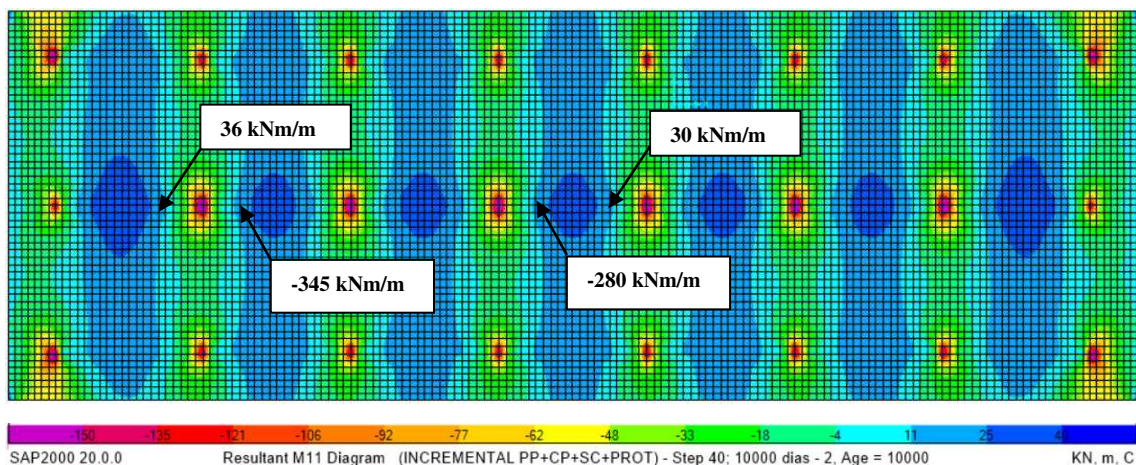
Fonte: O autor (2019).

Figura 22 - Força de pré-compressão da laje em kN/m na direção x da laje do 2º pavimento no modelo com AC.



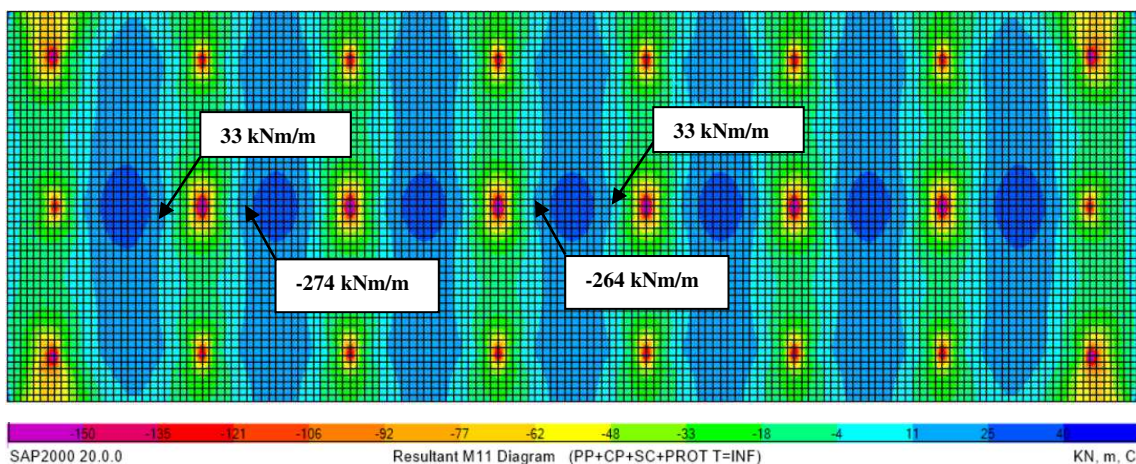
Fonte: O autor (2019).

Figura 23 – Momentos fletores na direção x da laje do 1º pavimento no modelo com AEE na idade de 10000 dias.



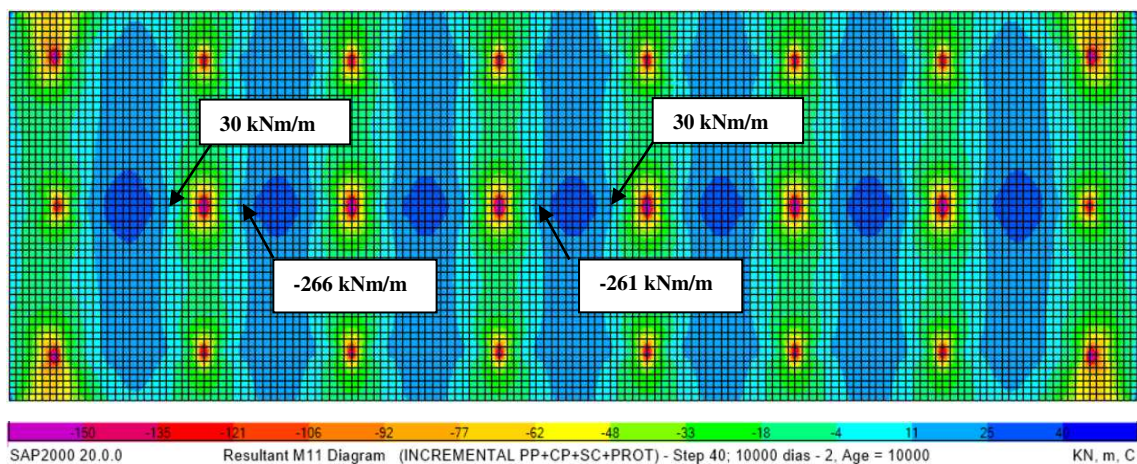
Fonte: O autor (2019).

Figura 24 – Momentos fletores na direção x da laje do 1º pavimento no modelo com AC.



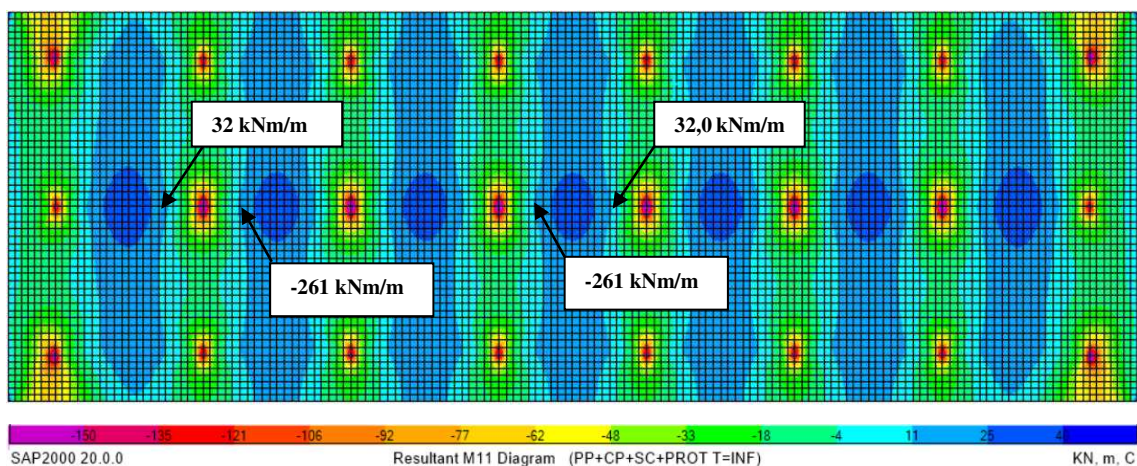
Fonte: O autor (2019).

Figura 25 - Momentos fletores na direção x da laje do 2º pavimento no modelo com AEE na idade de 10000 dias.



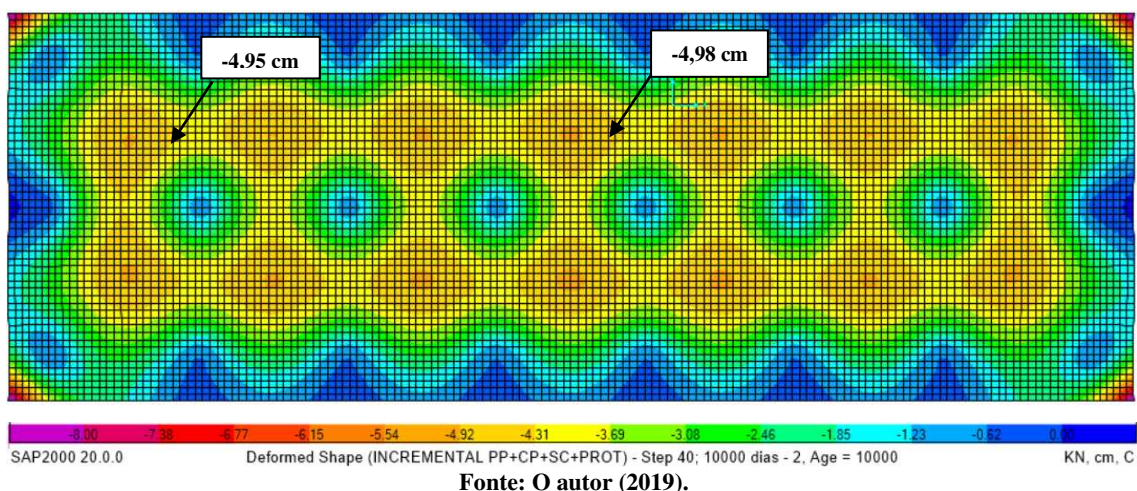
Fonte: O autor (2019).

Figura 26 – Momentos fletores na direção x da laje do 2º pavimento no modelo com AC.



Fonte: O autor (2019).

Figura 27 – Deslocamentos verticais da laje do 1º pavimento na idade de 10000 dias no modelo com AEE.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 27 e na Figura 28 são ilustrados os deslocamentos verticais da laje do primeiro pavimento dos modelos com AEE e AC, respectivamente. Na Figura 29 e na Figura 30 são ilustrados os deslocamentos verticais da laje do segundo pavimento dos

modelos com AEE e AC, respectivamente. Os resultados mostram uma razão entre as flechas diferidas e as flechas elásticas variando entre 2,6 e 2,7.

Figura 28 - Deslocamentos verticais da laje do 1º Pavimento no modelo com AC.

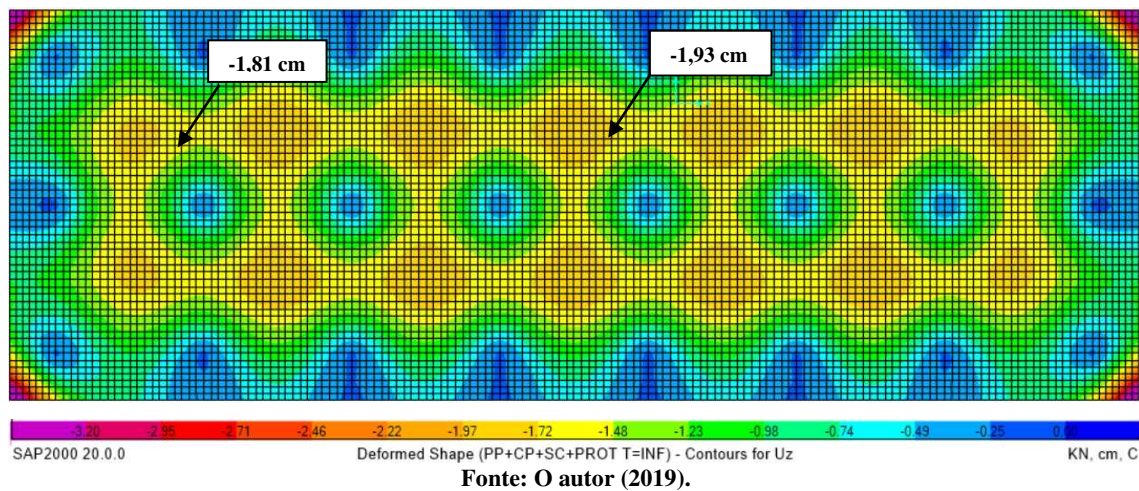


Figura 29 - Deslocamentos verticais da laje do 2º Pavimento na idade de 10000 dias no modelo com AEE.

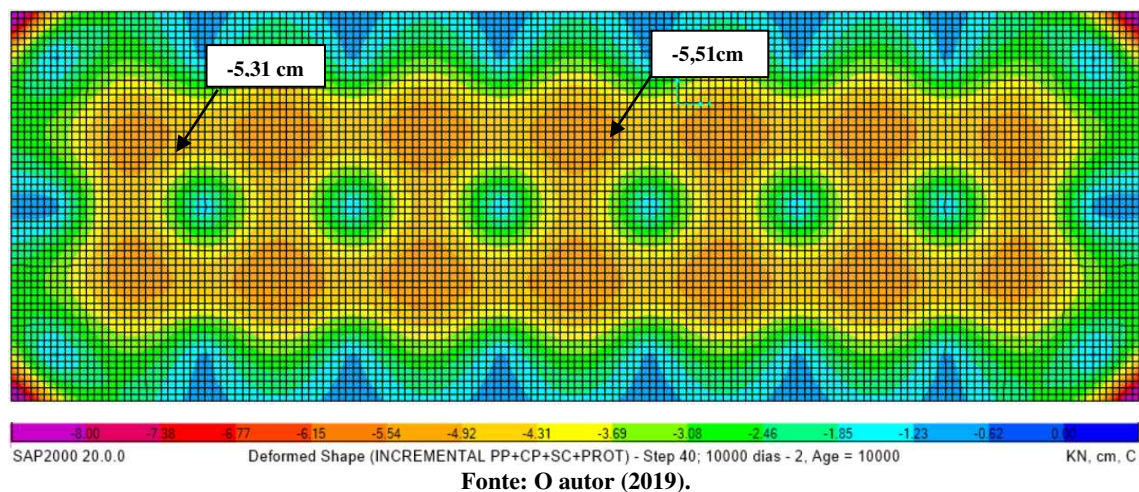
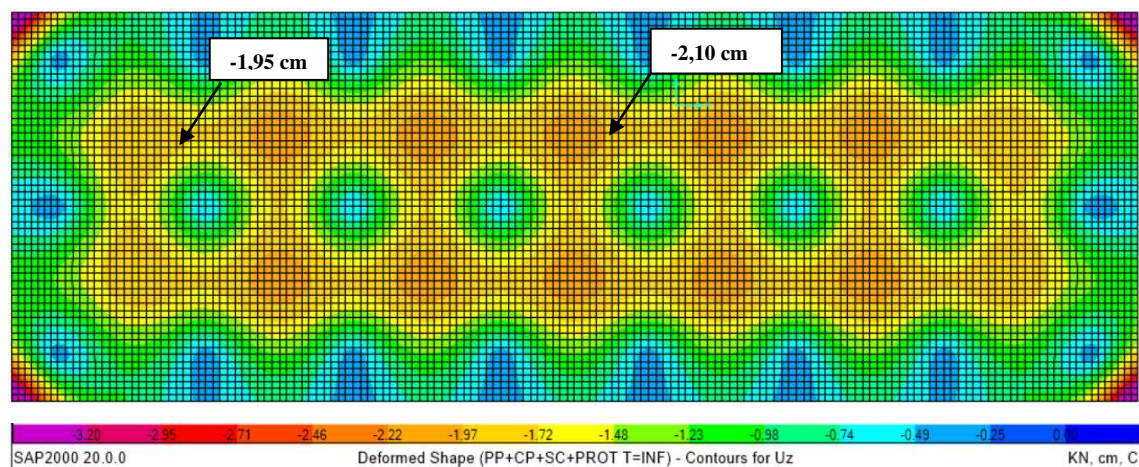
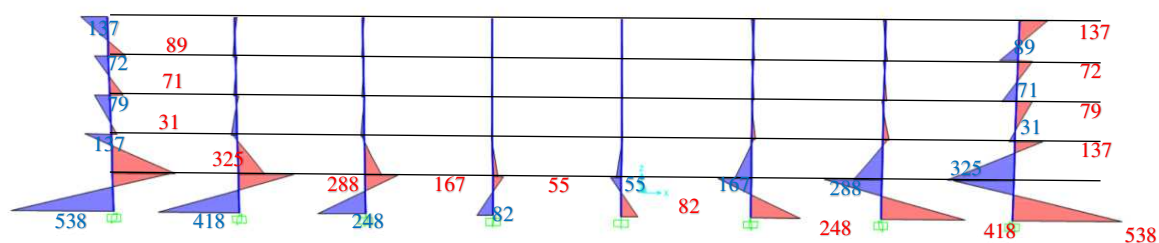


Figura 30 - Deslocamentos verticais da laje do 2º Pavimento no modelo com AC.



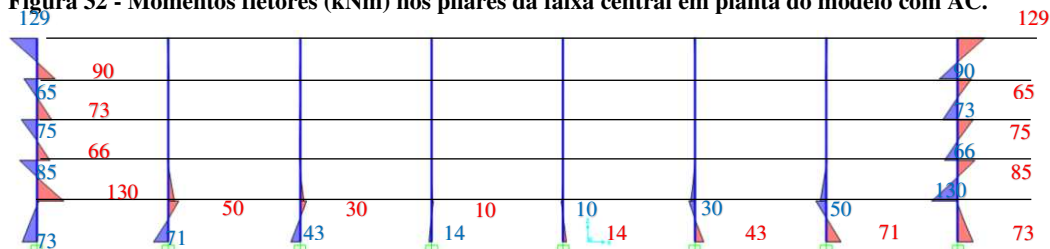
Na Figura 31 e na Figura 32 são apresentados os diagramas de momento fletor dos pilares das faixas centrais em planta dos modelos evolutivo e clássico, respectivamente. Os momentos fletores dos pilares do primeiro pavimento do modelo com AEE resultaram em valores muito superiores ao modelo com AC. Na Figura 33 é ilustrada a força de protensão da cordoalha ao longo do seu comprimento e verifica-se que a estimativa de uma força média de 120 kN por cordoalha após todas as perdas é bem próxima da média dos valores obtidos ao longo do cabo calculados com auxílio do SAP2000 v20.

Figura 31 - Momentos fletores (kNm) nos pilares da faixa central em planta do modelo com AEE na idade de 10000 dias.



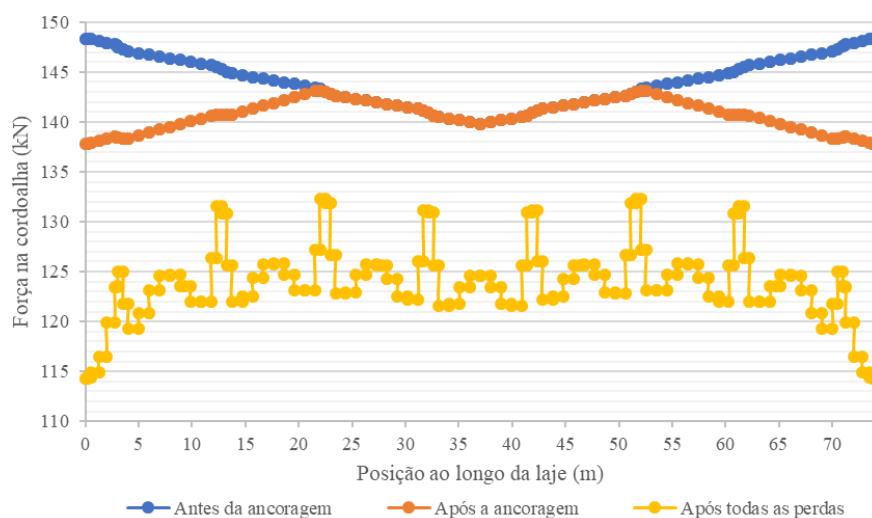
Fonte: O autor (2019).

Figura 32 - Momentos fletores (kNm) nos pilares da faixa central em planta do modelo com AC.



Fonte: O autor (2019).

Figura 33 - Força de protensão da cordoalha ao longo da laje no modelo com AEE aos 10000 dias.



Fonte: O autor (2019).

6 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um estudo comparativo entre a análise estrutural evolutiva não-linear (AEE) e a análise clássica linear-elástica (AC) de um edifício garagem com lajes lisas protendidas, com base em um modelo completo da estrutura discretizado em elementos finitos, utilizando-se o software SAP2000.

Os resultados obtidos demonstraram a importância de se utilizar uma análise estrutural evolutiva para o projeto de edifícios com lajes lisas protendidas de maior comprimento, principalmente para a estimativa dos esforços dos elementos estruturais do primeiro pavimento. Devido à restrição ao encurtamento da laje provocada pelos pilares, que estão engastados na fundação, e devido aos efeitos dependentes do tempo, como retração e fluência do concreto e relaxação do aço da armadura protendida, os esforços nos pilares obtidos pela AEE são muito maiores que os obtidos da AC. Esta diferença é de tal ordem que pode comprometer o desempenho da estrutura tanto em relação a estados limites de serviço, como em relação aos estados limites últimos. Além disso, observou-se que os momentos fletores negativos na ligação entre a laje do primeiro pavimento e os pilares extremos foram maiores no modelo evolutivo do que no modelo clássico, em decorrência da forte restrição à livre deformação da laje provocada pelos pilares.

No tocante à avaliação do comportamento estrutural, os resultados obtidos demonstraram que as restrições ao encurtamento da laje a partir do segundo pavimento foram de pouca importância e os esforços dos elementos estruturais obtidos com a AEE foram muito próximos aos obtidos com AC. Cabe ressaltar que em estruturas com elementos verticais muito rígidos, a influência da restrição ao encurtamento da laje pode se estender para os pavimentos superiores.

Quando se comparou os resultados dos deslocamentos verticais das lajes entre os modelos com AEE e AC, a razão entre as flechas diferidas no tempo do modelo AEE e as flechas elásticas do modelo AC variou entre 2,6 e 2,7.

A investigação apresentada, sobre o comportamento de estruturas com lajes lisas protendidas, pode ser estendida, variando-se a geometria da estrutura e considerando outros fenômenos tais como a variação da temperatura, a fissuração do concreto de uma forma mais realista, o efeito do escoramento da laje durante a fase construtiva, as ações horizontais de vento, o desaprumo durante a construção e a variação da rigidez das fundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio para a realização e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AALAMI, B. O.; BARTH, F. G. Restraint cracks and their mitigation in unbonded post-tensioned building structures, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, 49 pp; 1988.
2. AALAMI, B. O. Load balancing: a comprehensive solution to post-tensioning. ACI Structural Journal, p. 662-670; 1990.
3. AALAMI, B. O. One-way and two-way post-tensioned floor systems. Post-Tensioning Institute: Technical Notes, Issue 3, Phoenix, 1993.
4. AALAMI, B. O. Hyperstatic (Secondary) Actions in Prestressing and Their Computation. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Phoenix, 1998a.
5. AALAMI, B. O. Prestressing losses and elongation calculations, ADAPT Technical Note, Issue T9-04, 16 pp; 1998b.
6. AALAMI, B. O. Layout of post-tensioning and passive reinforcement in floor slabs. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 8, Phoenix, 2000.
7. AALAMI, B. O.; KELLEY, G. S. Design of concrete floors with particular reference to post-tensioning. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 11, Phoenix, 2001.
8. AALAMI, B. O. Crack mitigation and evaluation: shortening of post-tensioned members and restraint of supports. ADAPT, Technical Notes 451, Redwood City, 2016a.
9. AALAMI, B. O. Temperature design of post-tensioned floors. ADAPT, Technical Notes 463, Redwood City, 2016b.
10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building code requirements for structural concrete and commentary – ACI 318, Farmington Hills, 2011.
11. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Recommendations for concrete members prestressed with unbonded tendons – ACI 423.3R, Farmington Hills, 2005.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
13. CARNEIRO, A. L. Análise e dimensionamento de lajes lisas protendidas sem aderência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
14. COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DO BETÃO (CEB) – FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DA PROTENSÃO (FIP). Model Code 1990: final draft. Lausanne, Switzerland, 1991.

15. EMERICK, A. A. Projeto e Execução de Lajes Protendidas. Editora Interciência Brasília, 2005. 192 p.
16. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). Model Code 2010: final draft. Lausanne, Switzerland, 2011.
17. FINTEL, M. GHOSH, S. K., Case study of effects of post-tensioning the beams in a 45-story building. ACI Journal, V. 75, No. 5, pp. 184-191, 1978.
18. GUO, G.; JOSEPH, L. M. e BIEBERLY, G. E. Restrain Design of Cast-in-place post-tensioned underground parking structures. Post-Tensioning Institute, Technical Paper, V. 7, nº. 1; 2009.
19. GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part I: model selection. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013a.
20. GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part II: calculations. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013b.
21. GUO, G.; JOSEPH, L. M.; DARWIN, D. Effects of story-by-story post-tensioning on multi-story buildings. ACI Structural Journal, V. 110, No. 4, 2013.

3

CONCLUSÕES

3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma revisão de literatura sobre os seguintes temas: análise estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas utilizando modelos simplificados, com base no Método dos Pórticos Múltiplos, ou por meio de modelos de pórtico espacial completo da estrutura; problemas relacionados à restrição ao encurtamento da laje; análise estrutural clássica e análise estrutural evolutiva.

A partir da comparação de resultados da análise de estruturas de edifícios com lajes lisas protendidas obtidos com dois métodos distintos, a saber, a análise estrutural evolutiva não-linear e a análise clássica linear-elástica, pôde-se chegar às conclusões descritas a seguir.

Para a análise estrutural de edifícios com lajes lisas protendidas com comprimento acima de 50 metros, é importante utilizar uma análise estrutural evolutiva que leve em conta a variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo, bem como as etapas de carregamento correspondentes às etapas da construção. Este método de análise permite uma estimativa mais realista dos esforços nos elementos estruturais do primeiro pavimento, que são fortemente influenciados pela restrição ao encurtamento das lajes provocada pelos pilares engastados na fundação, do que se obtém com a análise clássica.

Para edifícios com lajes de até 75 metros de comprimento sem pilares-paredes ou núcleos rígidos, a partir do 2º pavimento, os esforços adicionais devido à restrição ao encurtamento da laje são de pouca relevância, podendo ser desconsiderados e os resultados de esforços solicitantes entre os modelos evolutivo e clássico são semelhantes.

Observou-se a importância de se adotar alguma medida construtiva para mitigar os problemas relacionados à restrição ao encurtamento da 1ª laje acima da fundação, para os modelos com lajes de comprimento superior a 50 metros, como a utilização de faixas

de concretagens posterior (*delay strips* ou *pour strips*) ou ligações flexíveis entre a laje e os pilares, que permitam um deslocamento relativo entre esses dois elementos estruturais.

Comparando os resultados dos deslocamentos verticais das lajes entre os modelos com AEE e AC, neste estudo de caso, a razão entre as flechas diferidas no tempo do modelo com AEE e as flechas elásticas do modelo AC variou entre 2,6 e 2,7.

A escolha adequada do modelo que representa a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo é fundamental, pois ele interfere diretamente no cálculo do encurtamento da laje e, conseqüentemente, na redistribuição de esforços no pórtico ao longo do tempo.

Verificou-se a necessidade de considerar a fissuração do concreto dos pilares ao longo do tempo de forma mais realista do que adotando simplificadamente $0,8E_{ci}$, eventualmente utilizando uma discretização com elementos finitos que permita a computação das tensões em vários pontos da seção transversal, em especial em estruturas com lajes com maior comprimento, pois os pilares sofrem esforços de flexão consideráveis que podem gerar fissuras à medida que a laje encurta e, conseqüentemente, diminuir a sua rigidez, gerando uma nova redistribuição de esforços entre a laje e os pilares. Trata-se de um fenômeno que depende de uma série de fatores dependentes do tempo que acontecem simultaneamente, como a retração e a fluência do concreto, bem como as perdas de protensão nos cabos, produzindo variações nos esforços e deformações que só podem ser determinadas por meio de uma análise estrutural evolutiva não-linear.

A análise estrutural evolutiva, com a consideração dos efeitos diferidos no tempo, comprovou que a estimativa de uma perda de protensão total em torno de 20% para cordoalhas engraxadas, para os casos estudados, é consistente.

Por fim, este trabalho evidenciou a potencialidade da análise estrutural evolutiva para a avaliação do comportamento de estruturas sensíveis a fenômenos variáveis com o tempo, como é o caso dos edifícios com lajes protendidas, bem como a consistência dos modelos representativos da retração do concreto, da fluência do concreto e da relaxação do aço de protensão disponíveis atualmente.

3.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, observou-se que alguns aspectos sobre as estruturas com lajes lisas protendidas podem ser estudados de modo mais aprofundado para melhor compreensão do seu comportamento estrutural. Esses aspectos são listados a seguir:

- comparar os resultados das análises estruturais evolutiva e clássica utilizando outros modelos representativos da variação das propriedades do concreto ao longo do tempo;
- discretizar os pilares com elementos finitos capazes de simular a fissuração do concreto dos pilares, por meio de softwares que disponibilizem esse recurso.
- realizar análises estruturais evolutivas mais completas, levando-se em consideração os efeitos do escoramento da laje durante a fase construtiva, as ações horizontais de vento, o desaprumo durante a construção, a interação solo-estrutura das fundações e a variação da temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALAMI, B. O.; BARTH, F. G. Restraint cracks and their mitigation in unbonded post-tensioned building structures, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, 49 pp; 1988.

AALAMI, B. O. Load balancing: a comprehensive solution to post-tensioning. ACI Structural Journal, p. 662-670; 1990.

AALAMI, B. O. One-way and two-way post-tensioned floor systems. Post-Tensioning Institute: Technical Notes, Issue 3, Phoenix, 1993.

AALAMI, B. O. Hyperstatic (Secondary) Actions in Prestressing and Their Computation. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Phoenix, 1998a.

AALAMI, B. O. Prestressing losses and elongation calculations, ADAPT Technical Note, Issue T9-04, 16 pp; 1998b.

AALAMI, B. O. Layout of post-tensioning and passive reinforcement in floor slabs. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 8, Phoenix, 2000c.

AALAMI, B. O.; KELLEY, G. S. Design of concrete floors with particular reference to post-tensioning. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, Issue 11, Phoenix, 2001.

AALAMI, B. O. Crack mitigation and evaluation: shortening of post-tensioned members and restraint of supports. ADAPT, Technical Notes 451, Redwood City, 2016a.

AALAMI, B. O. Temperature design of post-tensioned floors. ADAPT, Technical Notes 463, Redwood City, 2016b.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building code requirements for structural concrete and commentary – ACI 318, Farmington Hills, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Recommendations for concrete members prestressed with unbonded tendons – ACI 423.3R, Farmington Hills, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto protendido – Procedimento. NBR 7197, Rio de Janeiro, 1989.

CARNEIRO, A. L. Análise e dimensionamento de lajes lisas protendidas sem aderência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DO BETÃO (CEB) – FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DA PROTENSÃO (FIP). Model Code 1990: final draft. Lausanne, Switzerland, 1991.

CSI Analysis Reference Manual For SAP 2000, ETABS, and SAFE. Computers and Structures Inc. Berkeley, California, USA. 2017.

EMERICK, A. A. Projeto e Execução de Lajes Protendidas. Editora Interciência Brasília, 2005. 192 p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). Model Code 2010: final draft. Lausanne, Switzerland, 2011.

FERREIRA, W. E. R. Influência das etapas de construção na análise de estruturas de múltiplos andares de concreto armado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2008.

FINTEL, M. GHOSH, S. K., Case study of effects of post-tensioning the beams in a 45-story building. ACI Journal, V. 75, No. 5, pp. 184-191, 1978.

GUO, G.; JOSEPH, L. M. e BIEBERLY, G. E. Restrain design of cast-in-place post-tensioned underground parking structures. Post-Tensioning Institute, Technical Paper, V. 7, nº. 1; 2009.

GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part I: model selection. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013a.

GUO, G.; JOSEPH, L. M. Shortening estimation for post-tensioned concrete floors — Part II: calculations. ACI Structural Journal, V. 110, No. 1, 2013b.

GUO, G.; JOSEPH, L. M.; DARWIN, D. Effects of story-by-story post-tensioning on multi-story buildings. *ACI Structural Journal*, V. 110, No. 4, 2013.

KELLEY, G. S., Prestress losses in post-tensioned structures. Post-Tensioning Institute, Technical Notes, 6 pp; 2000.

KÜSTER, L. D. Contribuição ao projeto de pavimentos de lajes sem vigas protendidas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

LOUREIRO, G. J. Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006, p. 1734-1755.

TQS Informática. Efeito Incremental. TQS Docs. Manual do Usuário. Disponível em: <<http://docs.tqs.com.br/>>. Acesso em: 28 de fev. de 2020.