

ESTUDO DAS PERDAS DE PROTENSÃO EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

MIRELLY KAROLINNE ARAÚJO PIRES

Rio Verde, GO
2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DAS PERDAS DE PROTENSÃO EM LAJES
ALVEOLARES PROTENDIDAS**

MIRELLY KAROLINNE ARAÚJO PIRES

Trabalho de curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,
como requisito parcial para obtenção do Grau
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

Rio Verde, GO

2022

Mirelly Karolinne Araújo Pires

**ESTUDO DAS PERDAS DE PROTENSÃO EM LAJES
ALVEOLARES PROTENDIDAS**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 21/12/2022, pela
Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Me. Geraldo Pereira da Silva Junior

Instituto Federal Goiano/Trindade

Prof. Me. Taline Carvalho Martins

Instituto Federal Goiano/Rio Verde

Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

Instituto Federal Goiano (IF Goiano/Trindade)

Rio Verde, GO
Dezembro, 2022

PÁGINA DESTINADA A INSERÇÃO DA FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

P667e Pires, Mirelly
Estudo das Perdas de Protensão em Lajes
Alveolares Protendidas / Mirelly Pires; orientador
Marcel Willian. -- Rio Verde, 2023.
39 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

1. Protensão. 2. Lajes Alveolares. 3. Pré-tração.
4. Perdas de Protensão. I. Willian, Marcel , orient.
II. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 nº2376

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde que foi essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso. Agradecer pela confiança depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor Marcel Willian Reis Sales, orientador do meu trabalho. Obrigado por me manter motivada durante todo o processo. E por fim, agradecer aos meus professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

BIOGRAFIA DO ALUNO

Natural da cidade de Acreúna de Goiás-GO, filha de Mislaine da Silva Araújo e Marcello Pires Cavalcante, Graduando em Engenharia Civil pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. Em 2020 começou um estágio na empresa Usina Nova Gália Ltda onde se aprofundou na execução de todos os tipos de projetos, porém percebeu uma afinidade maior com o projeto estrutural. Logo, com base nessa vivência despertou-se a vontade de continuar pesquisando a área de estruturas, para melhor entender a resolução de estruturas complexas. Busca, por meio da apresentação desse trabalho, a conclusão do bacharel em engenharia civil.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das Lajes	31
Tabela 2. Características Mécnicas do Concreto	32
Tabela 3. Dados relativos ao aço de protensão	32
Tabela 4. Perdas Iniciais	33
Tabela 5. Perdas Diferidas	34
Tabela 6. Análise de Variância e teste de Tukey para perdas iniciais	36
Tabela 7. Análise de Variância e teste de Tukey para perdas diferidas.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Lajes Protendidas	18
Figura 2. Diagrama força de protensão por tempo.	20
Figura 3. Unidades alveolares e seus componentes.	26
Figura 4. Corte longitudinal da máquina extrusora.	27
Figura 5. Exemplos de seções transversais da laje alveolar.	28
Figura 6. Exemplos de seções transversais da laje alveolar.	28
Figura 7. Seções transversais das lajes	31
Figura 8. Perdas de Protensão em lajes alveolares	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. 1. Perda por deformação por ancoragem.....	30
Eq. 2. Perda por por deformação pela relaxação da armadura.	30
Eq. 3. Perda por deformação imediata do concreto.	30
Eq. 4. Perda por retração do concreto.	31
Eq. 5. Perda por fluência do concreto.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.2	Lajes Alveolares Protendidas.....	17
1.3	Perda de Protensão.....	18
13.1	Perda por ancoragem e escorregamento dos cabos.....	20
13.2	Perda por relaxação da armadura.....	20
13.3	Perdas imediatas do concreto.....	20
13.4	Perda por retração do concreto	21
13.5	Perda por fluência do concreto	21
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	Geral	22
2.2	Específicos	22
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
4	CAPÍTULO ÚNICO	25
4.1	Introdução	25
4.2	Referencial teórico.....	27
4.2.1	Lajes Alveolares	27
4.2.1	Concreto pré-moldado	28
4.2.2	Perda de protensão	28
4.3	Método.....	30
4.4	Resultados e Discussões	33
4.5	Conclusão	37
4.6	Agradecimentos	37
4.7	Referências Bibliográficas.....	37

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / sigla	Significado
Δl	Encurtamento total que o cabo sofre durante a ancoragem
$\Delta\sigma$	Perda devido à deformação por ancoragem
A	Área da seção transversal da unidade alveolar em cm ²
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
A_p	Área total da seção transversal de aço protendido em cm
α_p	Relação entre o módulo de elasticidade do aço protendido e o do concreto
b laje	Largura da unidade de laje em cm
bw	Larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares em mm
d	Altura útil da seção transversal do elemento de laje alveolar em cm
d'	Altura útil da seção transversal do elemento de laje alveolar de seção composta em cm
E_p	Módulo de elasticidade do concreto pré-moldado
Eq.	Equação
<i>et al.</i>	E outros (as)
EUA	Estados Unidos da América
$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$	Deformação por retração
ε_y	Deformação específica da armadura de protensão devido á descompressão
f_{ck}	Resistência característica à compressão

GO	Goiás
h	Altura da unidade alveolar em cm
I	Momento de inércia em cm ⁴
kg	Quilograma
mm	Milímetros
MPa	Mega pascal
NBR	Norma brasileira
∅	Diâmetro da barra da armadura em mm
∅ alv	Diâmetro dos alvéolos em cm
σ_{cgp}	Á tensão que ocorre no concreto no nível do centro de gravidade da armadura de protensão e devido à ação das cargas permanentes inclusive a protensão
σ_{pi}	Tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão em Mpa
$\varphi(t, t_0)$	Refere-se a um coeficiente de fluência
P_0	Força de protensão no instante em que a força de protensão é transferida para o concreto
P_∞	Valor da força de protensão após terem ocorrido todas as perdas
P_a	Força na armadura de protensão, no instante imediatamente anterior à sua liberação das ancoragens externas
P_i	Força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração
P_t	Valor da protensão no tempo
t	Tempo

t_0	Tempo final
$\psi(t, t_0)$	Coefficiente de relaxação do aço no instante t para protensão e carga permanente mobilizada no instante t_0
$\Delta\sigma_{pd}$	Perda por deformação imediata no concreto
$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$	Perda de tensão por relaxação pura desde o instante t_0
$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$	Perda por retração do concreto

RESUMO

Devido à forma complexa de verificação da perda de protensão que ocorre em painéis alveolares, calculistas utilizam uma estimativa média dessa perda. Objetiva-se utilizar equacionamentos com o apoio de normas para verificar qual a taxa de perda de protensão inicial e diferidas para diferentes tipos de lajes. Selecionou-se dois grupos diferentes de lajes para tal verificação, sendo três lajes em cada grupo. Tratando-se das perdas iniciais de protensão, o primeiro grupo de lajes, atingiu um percentual médio de 6,59% de e um desvio padrão de 1,65%, já o segundo grupo médio de 5,75 % e um desvio padrão de 2,47 %, Tratando – se da análise geral das perdas iniciais de protensão, obteve-se uma média total de 6,17% de perda inicial, com desvio padrão de 1,94%. Levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais estavam dentro dos previstos (5%), no entanto, para fins de dimensionamento seria pautável aumentar essa recomendação para ao menos 8% de perda inicial. Para a perda diferida de 15% proposta pela literatura todas as lajes analisadas, estiveram dentro deste percentual, provando que o percentual apresentado para o autor atende as perdas previstas por análises numéricas.

Palavras-chave: Protensão, lajes alveolares, pré-tração, perda de protensão.

ABSTRACT

Due to the complex way of verifying the prestress loss that occurs in honeycomb panels, calculators use an average estimate of this loss. The objective is to use equations with the support of standards to verify the initial and deferred prestressing loss rates for different types of slabs. Two different groups of slabs were selected for this verification, with three slabs in each group. In the case of initial prestressing losses, the first group of slabs reached an average percentage of 6.59% and a standard deviation of 1.65%, while the second group averaged 5.75% and a standard deviation of 2.47%. Regarding the general analysis of initial prestressing losses, a total mean of 6.17% of initial loss was obtained, with a standard deviation of 1.94%. Taking into account the standard deviation, it can be considered that the results for initial losses were within the forecast (5%), however, for sizing purposes it would be reasonable to increase this recommendation to at least 8% of initial loss. For the deferred loss of 15% proposed by the literature, all the slabs analyzed were within this percentage, proving that the percentage presented to the author meets the losses predicted by numerical analyses. Versão do resumo em inglês, em bloco único.

Keywords: Prestressing, hollow core slabs, prestressing, loss of prestressing.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de pré-fabricados busca atender as demandas da sociedade, oferecendo, com seus produtos, economia, desempenho técnico, eficiência, segurança e condições favoráveis de trabalho. E com a utilização das estruturas pré-fabricadas, é possível obter uma eficiência estrutural significativa comparadas aos elementos fabricados in loco, entregando elementos mais esbeltos e com maior padronização de fabricação. Além disso, garante o uso otimizado de materiais, com redução de mão de obra operária e redução de desperdício de recursos, assim, a utilização desse sistema torna possível e mais acessível a obtenção de edifícios com maiores áreas livres e vãos superiores aos convencionais.

A utilização de elementos pré-fabricados estão presentes em diversos setores da construção civil, como: edificações residenciais, comerciais e industriais, construção de grande porte e infraestrutura urbana, ferroviária e rodoviária.

Conforme Catoia (2011), os painéis alveolares são um dos elementos pré-fabricados mais populares do mundo, especialmente na América do Norte, Europa Ocidental. Originário da Alemanha, sua técnica empregada de execução é bastante desenvolvida nesse país e nos Estados Unidos, e suas dimensões em altura e vão estão em constante evolução. A autora acrescenta que as lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de elementos pré-moldados, todo ano ao redor do mundo é fabricado dezenas de milhões de metros quadrados de laje alveolar.

Atualmente, a tecnologia de produção das lajes alveolares é bastante desenvolvida e está em constante aperfeiçoamento para atingir vãos cada vez maiores ao decorrer dos avanços tecnológicos no ramo de construção. Apesar de ser uma produção de alto custo inicial devido a necessidade do maquinário específico, como a máquina de extrusão, a produção é basicamente automatizada com alto índice de produtividade. Diante disso, há uma redução de custos de mão de obra e racionalização de materiais, com redução significativa de concreto e de aço, e também uma maior velocidade na montagem.

A protensão nas lajes alveolares é um fator que potencializa sua eficiência. De acordo com Pfeil (1984), a protensão é um artifício que consiste em introduzir um estado prévio de tensões, de modo que melhore a resistência ou o comportamento de uma estrutura, sendo amplamente empregado em estruturas de concreto. No entanto, a força de protensão está sujeita às variações em sua intensidade e a redução desse valor é conhecida como perda de protensão. A incorreta estimativa de perda de protensão da estrutura pode levar ao dimensionamento ineficiente e a curvatura excessiva, quando a perda de protensão é superestimada, ou

deslocamento excessivo e fissuração da estrutura, quando a perda de protensão é subestimada (TAVARES 2020).

Portanto, objetiva-se por meio do presente trabalho, estudar as perdas de protensão, através de equacionamentos analíticos, em lajes alveolares, que ocorrem de forma imediata no momento de sua fabricação e as perdas diferidas ao longo do tempo devido a fatores que influenciam nessa perda em relação a tensão inicial aplicada nessas lajes alveolares protendidas.

1.2 Lajes Alveolares Protendidas

Para uma estrutura de concreto ser considerada protendida, é necessário que um estado prévio de tensões esteja atuando sobre ela, de modo que melhore seu comportamento. No concreto protendido existem dois tipos de armaduras: as passivas, na qual as tensões só são mobilizadas quando acontece deformação no concreto que está aderido a ela, e armadura ativas, que estão submetidas a tensões independentemente de a estrutura de concreto estar ou não sob tensão (PFEIL, 1984; CARVALHO, 2017). Conforme Tavares (2020), entre os benefícios da utilização das estruturas protendidas está a redução da quantidade necessária de concreto e aço, devido ao emprego eficiente dos materiais de maior resistência; o fato de permitirem que vão maiores sejam vencidos; maior durabilidade; menores deformações e maior resiliência.

O sistema de laje alveolar protendida é um dos sistemas de laje de concreto pré-moldado mais comumente adotados, o que pode otimizar a produtividade e a eficiência das estruturas (LEE et al. 2020). De acordo com Sales (2020) estas lajes têm conquistado o mercado graças as suas características estruturais, que permitem diversos vãos e modulações diferentes. Somado a essa qualidade, estas lajes ainda possuem a característica de serem usadas não só em sistemas pré-fabricados, mas também em sistemas de vigas e pilares moldados no local e até em estruturas mistas de aço e concreto.

Além disso, o estoque total estimado de lajes alveolares atualmente instalado na Europa é de 1.000 milhão de metros quadrados. Desde o início dos anos setenta, as lajes alveolares têm sido minuciosamente estudadas em campanhas de pesquisa, nos EUA e na Europa e muitos aspectos do produto foi intensamente testado (ALBERO, et al 2018). A Figura 1 apresenta exemplos de lajes alveolares com diferentes geometrias.

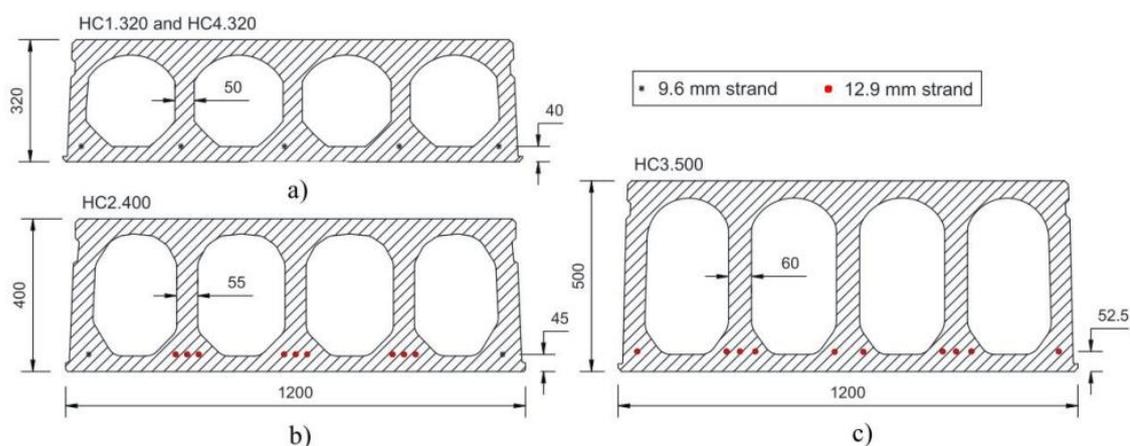


Figura 1. Lajes Protendidas
Fonte: NGUYEN (2020)

Conforme Alberio et al. (2018), o processo de fabricação das lajes alveolares foi bastante aprimorado para incluir parâmetros de projeto rigorosamente controlados e atualmente são fabricadas em fábricas de pré-moldados. O processo de fabricação consiste em operar as máquinas em pistas de aço de até 200 m de comprimento, equipadas com pilares de tensão onde os cabos são inicialmente posicionados e protendidos, esses tendões podem mudar de posição, quantidade e seção transversal, o autor ainda acrescenta que a geometria final das cavidades da laje é definida por uma parte específica e intercambiável da máquina de fundição denominada molde de acabamento e este molde pode ser substituído para fabricar diferentes designs de seção transversal ou alturas de laje. A forma, a quantidade e a posição dos orifícios da placa podem mudar usando a mesma máquina, mas com molde de acabamento diferente. Portanto, novas propostas de projetos de lajes alveolares podem produzir alterações neste molde de acabamento de fabricação. De acordo com Sales (2020), todas essas variáveis como altura de laje, propriedades do concreto, comprimento de transferência, forma de alvéolo e tipo de moldagem podem influenciar no comportamento da laje quando sujeita ao cisalhamento.

1.3 Perda de Protensão

Nas estruturas de concreto protendido, o comportamento ao longo do tempo é de suma importância para seu dimensionamento, pois a perda de protensão durante a sua vida útil é um fator de grande impacto nas condições de serviço e deformações da estrutura (TADROS; GHALI; DILGER, 1975). A perda de protensão acontece devido a diversas razões, que podem ser classificadas em perdas imediatas e perdas progressivas. Entre as imediatas, pode-se citar como principais: a perda por atrito nos cabos, perda por deformação da ancoragem e perda por deformação imediata do concreto. Entre as perdas progressivas, destaca-se a perda por retração

do concreto, por fluência do concreto e por relaxação da armadura ativa (PFEIL, 1984; CARVALHO, 2017).

Segundo Trovarelli (2019), a perda de protensão pode ocorrer por pré-tração (aderente), o pós-tração (aderente e não aderente). O tipo que iremos abordar neste estudo é o concreto protendido pré-tração, nesse modelo o pré-alongamento é realizado antes que o concreto seja lançado, utilizando apoios independentes do elemento estrutural.

A armadura (cordoalha ou fio) sofre um pré-alongamento, aplicando uma força de compressão inicial no concreto, a ligação da armadura só é desfeita após o concreto ser curado, dessa forma, a ancoragem ocorre por aderência entre os materiais (TROVARELLI 2019). O processo é realizado com o posicionamento das cordoalhas no local de concretagem, que atravessam toda a estrutura, para assim ser alongado com o auxílio de uma máquina, normalmente macacos hidráulicos.

De acordo com Cholfe (2013), há uma perda de força de protensão em elementos pré-tensionados, essas perdas podem ocorrer antes da transferência da protensão ao concreto (perdas iniciais), durante essa transferência (perdas imediatas) e depois, ao decorrer do tempo (perdas progressivas). Para toda peça em concreto protendido, deve ser previsto no projeto de pré-fabricação todas essas perdas e os procedimentos para sua determinação, que são estabelecidos pelas normas ABNT NBR 9062:2006 e ABNT NBR 6118:2014.

É possível afirmar que as perdas iniciais e imediatas ocorrem durante a primeira etapa de concretagem, onde é atuado as ações de protensão e peso próprio, e as perdas progressivas ocorrem nas seguintes etapas como serão demonstradas na Figura 2.

Conforme Tavares (2020), é possível observar as perdas de força de protensão que ocorrem ao longo do tempo de vida da peça, para o caso de pré-tração com cabos retos. Na Figura 2, P_i é a força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração, P_a é a força na armadura de protensão, no instante imediatamente anterior à sua liberação das ancoragens externas, P_0 é a força de protensão no instante em que a força de protensão é transferida para o concreto, P_t é o valor da protensão no tempo t e P_∞ é o valor da força de protensão após terem ocorrido todas as perdas.

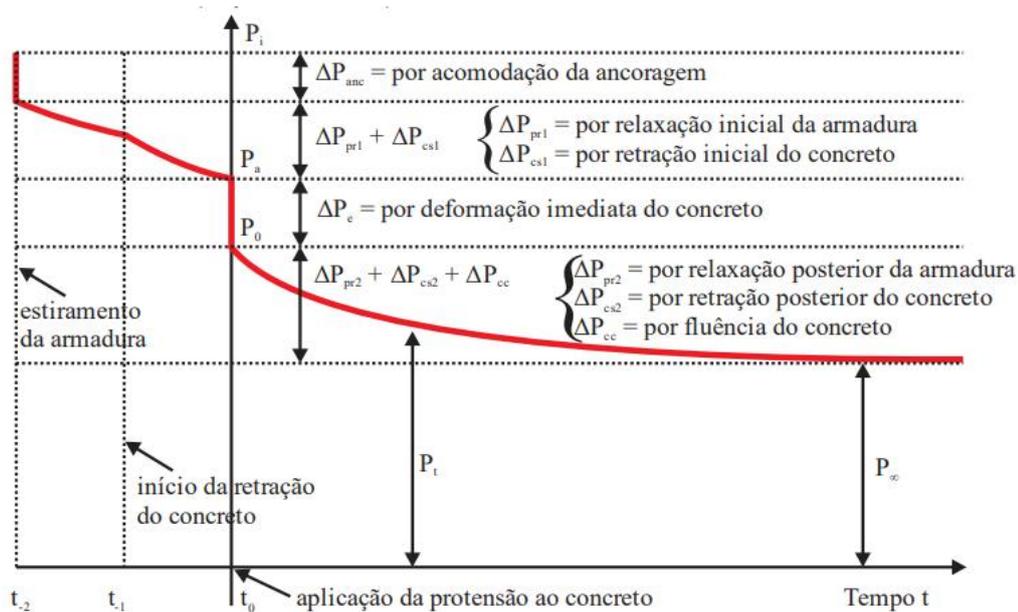


Figura 2. Diagrama força de protensão por tempo.
 Fonte: Adaptado por Tavares (2020) de Hanai (2005).

1.3.1 Perda por ancoragem e escorregamento dos cabos

De acordo com Bastos (2015), a perda de protensão por escorregamento dos cabos ocorre conveniente ao escorregamento dos cabos (fios e cordoalhas) e devido a acomodação das cunhas nos macacos de protensão, esse deslize ocasiona uma diminuição de tensão na armadura e são classificadas como perdas imediatas.

Vale ressaltar que esse escorregamento causa perda apenas na cabeceira ativa, onde está instalado o macaco de protensão, já na cabeceira da armadura passiva esse escorregamento será anulado na operação de estiramento. Quanto menor o comprimento da pista mais significativa será a perda BASTOS (2015).

1.3.2 Perda por relaxação da armadura

Conforme Bastos (2015), a relaxação da armadura é a perda de tensão com o tempo em um aço estirado, sob comprimento e temperatura constantes. A relaxação do aço é a perda gradual de tensão na armadura, provocada pelo estado de deformação constante sobre ela. Quando a perda de tensão por relaxação acontece, a tensão necessária para manter a deformação total constante diminui em função do tempo (ZEREN e ZEREN, 2003). Segundo a ABNT NBR 6118 (2014).

1.3.3 Perdas imediatas do concreto

Para elementos pré-tracionados, as perdas imediatas do concreto ocorrem exclusivamente através da perda de deformação inicial do concreto. Essa perda subsequente do

próprio processo de transferência da força de protensão ao material, que necessariamente sofre uma deformação para ficar protendido.

A variação da força de protensão em elementos estruturais com pré-tração, por ocasião da aplicação da protensão ao concreto, em razão do seu encurtamento, deve ser calculada em regime elástico, considerando-se a deformação da seção homogeneizada. (ABNT NBR 6118:2014, pg. 50).

1.3.4 Perda por retração do concreto

De acordo com Petrucelli (2009), conceitua-se a retração como a variação volumétrica que o concreto sofre depois de endurecido. Na verdade, a retração começa ocorrer logo após o lançamento do concreto, porém para determinar a perda que causa só interessa a parte do fenômeno que ocorre depois da atuação da protensão. O autor ainda acrescenta, a retração é devida principalmente à saída da água que não reage com o cimento (água em excesso). Dessa forma, pode-se perceber que, além do tempo, as variáveis que interferirão no processo são a temperatura, a umidade do ambiente, a espessura da peça e a quantidade de água (em geral avaliada pela plasticidade do concreto).

O principal motivo da retração do concreto é resultado da perda de água que ocorre à medida que haja uma variação de temperatura e que a umidade relativa do ambiente é reduzida, além disso, alguns fatores influenciam essa retração como o tipo de cimento empregado, tipo de agregado, dosagem incorreta, utilização de aditivos, tempo de cura e condições do ambiente. De acordo com Bastos (2015), 80% da retração ocorre no primeiro ano e depois é estabilizado.

1.3.5 Perda por fluência do concreto

O concreto é um material composto sujeito a deformações intrínsecas, decorrentes da sua estrutura interna. A fluência está relacionada ao concreto sob ações de longa duração, e esse fenômeno também se manifesta ao longo do tempo, produzindo deformações reversíveis e irreversíveis progressivas nas regiões solicitadas (HANAI 2005).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a influência da altura e da forma do alvéolo em lajes alveolares protendidas.

2.2 Específicos

- Estudar as perdas iniciais de protensão em dois grupos de lajes alveolares protendidas por meio dos cálculos de deformação por ancoragem, relaxação da armadura e deformação imediata do concreto.
- Estudar as perdas diferidas de protensão em dois grupos nas lajes alveolares protendidas por meio dos cálculos de retração do concreto, fluência do concreto e relaxação da armadura.
- Comparar os percentuais de perdas iniciais e diferidas encontrados nas análises numéricas com os percentuais utilizados usualmente por projetistas.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014

_____. **NBR 7482 - Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7483 - Cordoalhas de aço para concreto protendido – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14861 – Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

ARAUJO, Carlos Antonio Menegazzo et al. **Estudo de lajes alveolares pré-tracionadas com auxílio de programa computacional**: Dissertação. 2007.

BASTOS, Paulo S. S. **Concreto protendido - notas de aula**. Disciplina: 2129 - Concreto Protendido. Bauru: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2015.

BATTAGIN, A. F.; ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, 2011.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido: pré-tração, pós-tração, cálculo e detalhamento**. São Paulo: PINI, 2017. ISBN: 9788572664820. 2017

CATOIA, Bruna. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto protendido: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 2013.

CHUST, Roberto Carvalho. **Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. São Paulo: PINI, 2012.

El DEBS, Mounir K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESCUSP), 2000.

GUSTANI, Paulo Henrique Ferreira. **Laje alveolar protendida: roteiro de dimensionamento e panorama de produção nas regiões sudoeste e centro-sul do Paraná**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos, Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharias de Estruturas, 2005. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/cp_ebook_2005.pdf>

LEE, Deuckhang et al. **Resistências de elementos de laje oca pré-moldados pré-esforçados reforçados ao cisalhamento.** ACI Structural Journal , v. 117, n. 2, pág. 129-139, 2020.

MONTEIRO, João Matheus Alves. **Simulação numérica para dimensionamento de peças de concreto protendido submetidas à flexão.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.

NACHT, Pedro Kaj Kjellerup. **Ferramenta gráfico-interativa de verificação de tensões no estado limite de serviço de vigas protendidas com pós-traçoaderente.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PAJARI, Matti. **Resistência de lajes alveolares protendidas à ruptura por cisalhamento da alma.** Espoo, Finlândia: Centro de Pesquisa Técnica da Finlândia, 2005.

PFEIL, W. **Concreto protendido** vol. 1 - Introdução. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1984

PETRUCELLI, Natalia Savietto. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas.** Dissertação. São Carlos. 2009.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Capítulo 2: características do concreto. **Estruturas De Concreto**, p. 2.1-2.10, 2004.

TADROS, M. K.; GHALI, A.; DILGER, W. H. **Time-dependent prestress loss and deflection in prestressed concrete members.** PCI Journal; 20(3):86–89, 1975.

TATU. Tatu Pré-Moldados (2008). **Laje alveolar protendida.** Disponível em: <https://www.tatu.com.br/Paineis%20Alveolares%20Tatu>.

TAVARES, Matheus De Godoy. **Simulação da perda de protensão aderente em elementos de concreto.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TROVARELLI, Marília de Lara. **Vídeos Ilustrativos o Comportamento Físico das Perdas de Protensão em Viga.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M. Lenz. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998.

ZEREN, A.; ZEREN, M. **Stress relaxation properties of prestressed steel wires.** Journal of Materials Processing Technology. v. 141, p. 86–92, 2003

4 CAPÍTULO ÚNICO

Estudo das perdas de protensão em lajes alveolares protendidas

Study of prestressing losses in prestressed hollow core slabs

Resumo

Devido à forma complexa de verificação da perda de protensão que ocorre em painéis alveolares, calculistas utilizam uma estimativa média dessa perda. Objetiva-se utilizar equacionamentos com o apoio de normas para verificar qual a taxa de perda de protensão inicial e diferidas para diferentes tipos de lajes. Selecionou-se dois grupos diferentes de lajes para tal verificação, sendo três lajes em cada grupo. Tratando-se das perdas iniciais de protensão, o primeiro grupo de lajes, atingiu um percentual médio de 6,59% de e um desvio padrão de 1,65%, já o segundo grupo médio de 5,75 % e um desvio padrão de 2,47 %, Tratando – se da análise geral das perdas iniciais de protensão, obteve-se uma média total de 6,17% de perda inicial, com desvio padrão de 1,94%. Levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais estavam dentro dos previstos (5%), no entanto, para fins de dimensionamento seria pautável aumentar essa recomendação para ao menos 8% de perda inicial. Para a perda diferida de 15% proposta pela literatura todas as lajes analisadas, estiveram dentro deste percentual, provando que o percentual apresentado para o autor atende as perdas previstas por análises numéricas.

Palavras-chave: Protensão, lajes alveolares, pré-tração, perda de protensão.

Abstract

Due to the complex way of verifying the prestress loss that occurs in honeycomb panels, calculators use an average estimate of this loss. The objective is to use equations with the support of standards to verify the initial and deferred prestressing loss rates for different types of slabs. Two different groups of slabs were selected for this verification, with three slabs in each group. In the case of initial prestressing losses, the first group of slabs reached an average percentage of 6.59% and a standard deviation of 1.65%, while the second group averaged 5.75% and a standard deviation of 2.47%, Regarding the general analysis of initial prestressing losses, a total mean of 6.17% of initial loss was obtained, with a standard deviation of 1.94%. Taking into account the standard deviation, it can be considered that the results for initial losses were within the forecast (5%), however, for sizing purposes it would be reasonable to increase this recommendation to at least 8% of initial loss. For the deferred loss of 15% proposed by the literature, all the slabs analyzed were within this percentage, proving that the percentage presented to the author meets the losses predicted by numerical analyses. Versão do resumo em inglês, em bloco único.

Keywords: Prestressing, hollow core slabs, prestressing, loss of prestressing.

4.1 Introdução

Os novos desafios enfrentados pela Indústria da Construção civil, especialmente no setor de edificações, geralmente são resumidos pela necessidade de redução de custos com elevação nos níveis de qualidade de processos e de produtos, com a filiação de procedimentos gerenciais

mais eficientes e técnicos. A pesquisa metódica e o aumento do conhecimento podem promover o desenvolvimento tecnológico exigido na área.

A integração do uso de estruturas pré-moldadas e pré-fabricadas tem como objetivo principal solucionar questões como maior rapidez e agilidade no momento da execução da obra, e mais assertividade e padronização de peças para grandes obras.

O painel alveolar utilizado para fabricação de lajes alveolares protendidas corresponde a um elemento pré-moldado extremamente versátil, que pode ser utilizado em diversos tipos de sistemas de construção civil e correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas. É um elemento pré-fabricado que tem como objetivo reduzir o consumo de material e o peso próprio da estrutura, em comparação as lajes maciças de mesma altura, e sua porcentagem de vazios variam entre 30% a 50%, e convenientemente, aproveitados para embutir instalações elétricas e mecânicas.

Esses painéis protendidos utilizam uma resistência à compressão elevada ($f_{ck} \geq 40MPa$), as lajes são armadas por cordoalhas protendidas com pré-tração neste caso, o que permite vencerem grandes vãos de até 20 metros, geralmente essas lajes possuem contra-flecha no momento de sua fabricação e não possuem armadura de cisalhamento, sendo apenas o concreto protendido responsável pela resistência desse tipo de esforço. Sua estrutura pode ser observada na Figura 3.

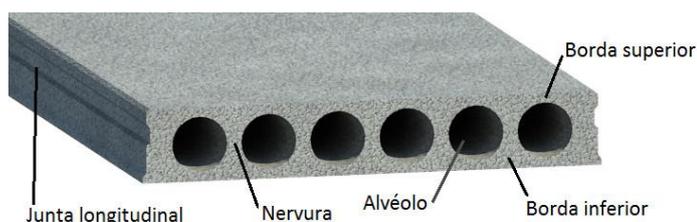


Figura 3. Unidades alveolares e seus componentes.

Fonte: TATU (2008)

No entanto, um dos fatores que devem ser pautados, que no ramo de fabricação de elementos de concreto protendido, há uma perda de protensão inicial e diferidas, as quais devem ser estudadas e analisadas de forma prudente, e geralmente essa perda de protensão é tratada e discutida de forma simplificada, diante disso, é de suma importância esse presente estudo de perda de protensão para ser possível analisar se de fato essa taxa de perda de protensão condiz com a realidade utilizada.

De acordo com Chust (2014), as diminuições desses esforços de protensão que ocorrem ao longo dos cabos, geralmente são chamadas de perdas e podem ser divididas em perdas iniciais e imediatas ou perdas diferidas ao longo do tempo. As primeiras ocorrem principalmente na forma que se procede à protensão e às propriedades elásticas do aço e do concreto. Já as perdas diferidas ou ao longo do tempo ocorrem devido as propriedades viscoelásticas do concreto e do aço.

Conforme Veríssimo e César Júnior (1998), essas perdas de protensão podem ser estimadas por meio de equacionamentos e existem diversos fatores que contribui com essa perda, que é dividida em perdas imediatas e diferidas. As perdas imediatas ocorrem durante o processo de protensão e após a ancoragem dos cabos, além da relaxação inicial da armadura. Já as perdas diferidas e ocorrem ao longo do tempo, são ocasionadas pela retração e fluência do concreto, além também, da relaxação posterior da armadura de protensão.

A incorreta estimativa de perda de protensão da estrutura pode levar ao dimensionamento ineficiente e a curvatura excessiva, quando a perda de protensão é superestimada, ou

deslocamento excessivo e fissuração da estrutura, quando a perda de protensão é subestimada (TAVARES 2020).

Portanto, objetiva-se por meio deste estudo, obter as perdas de protensão em dois grupos de lajes alveolares protendidas, através de equacionamentos analíticos, que ocorrem de forma imediata no momento de sua fabricação e as perdas diferidas ao longo do tempo devido a fatores que influenciam nessa perda em relação a tensão inicial aplicada.

4.2 Referencial teórico

4.2.1 Lajes Alveolares

Segundo Catoia (2011), as lajes alveolares protendidas são fabricadas basicamente por dois métodos no Brasil, através de formas deslizantes ou por máquinas de extrusão, que é a mais utilizada no processo de fabricação, onde a produção geralmente é feita em longas pistas de protensão, que variam de 80 a 200 metros, com máquinas extrusoras, o que permite a fabricação de um bloco único no comprimento da pista, após a liberação da protensão, são cortados em comprimentos conforme dimensões solicitadas de projetos.

Conforme Alberio (2018) É através da máquina extrusora (Figura 4), que o concreto é expulso e comprimido nas paredes dos moldes, é utilizado um baixo fator água-cimento, o mais próximo necessário para a hidratação do cimento, assim, garantindo elevada resistência à compressão e o mínimo de poros na peça de concreto. Os alvéolos são feitos através de compactação do concreto por tubos helicoidais e nesse processo é utilizado apenas um estágio de lançamento e de compactação do concreto.

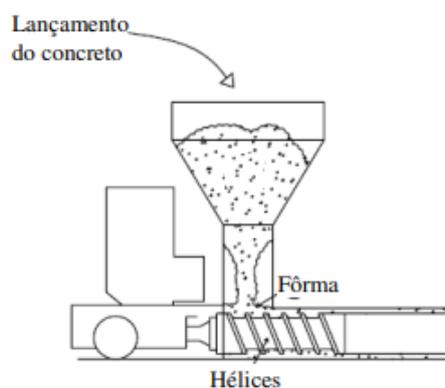


Figura 4. Corte longitudinal da máquina extrusora.

Fonte: CATOIA (2011).

De acordo com Araujo (2007), os fabricantes variam a quantidade de cabos utilizados nos painéis e a largura de modulação de 900 mm a 1250 mm, no entanto no Brasil o padrão utilizado é de 1250 mm. Existem também muitas variações da seção transversal de unidades alveolares, os alvéolos podem ter seção transversal de forma oval, circular, retangular, etc. Essas diferenças são devidas ao maquinário e o processo de produção utilizado.

Alguns exemplos de seções transversais são indicados na Figura 5, podendo ser observado também que os lados das seções transversais não são planos, pois, há entalhes nas laterais, próxima ao topo, que são chamadas de chaves de cisalhamento (Figura 6), o preenchimento dessas juntas entre os painéis tem como objetivo a garantia de um bom funcionamento entre as placas que constituem uma laje alveolar.

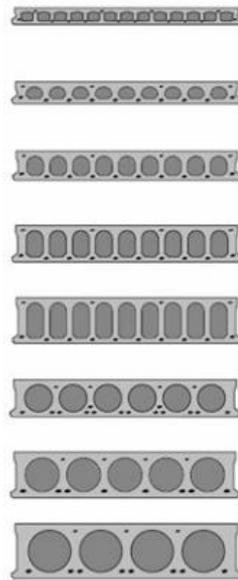


Figura 5. Exemplos de seções transversais da laje alveolar.
Fonte: ARAÚJO (2007).

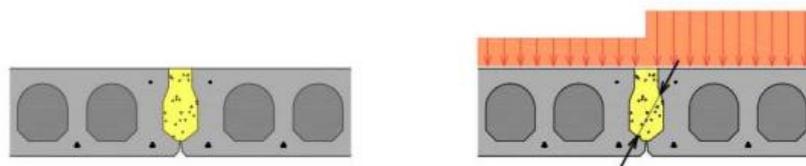


Figura 6. Chave de cisalhamento.
Fonte: ARAÚJO (2007).

4.2.1 Concreto pré-moldado

Conforme Jeyashree, Rajkumar e Satyanarayanan (2022), o concreto protendido é usado em vários tipos de aplicações estruturais, empregando sistemas de concreto pré-tensionado, pós-tensionado, combinado moldado *in loco* ou pré-moldado. A utilização de elementos de concreto pré-moldado protendido na construção de estruturas leva a economias substanciais de material e fôrmas. Os autores ainda acrescentam que devido a esses benefícios, os componentes de concreto pré-moldado protendido estão sendo cada vez mais preferidos devido à sua eficiência estrutural, controle de qualidade, montagem mais rápida, melhor sustentabilidade e aparência arquitetônica estética

Segundo El Debs (2000), os elementos pré-moldados mais utilizados no Brasil são os painéis alveolares, seção retangular, painel pi ou TT, seção I, painel U e seção T invertido (somente vigas).

4.2.2 Perda de protensão

Segundo Nacht (2015) conceitua a protensão como sendo um estado interno de tensões aplicado ao momento estrutural, e para simular a protensão, esse estado de tensões pode ser definido por esforços externos, divididos em esforços axiais e esforços de flexão.

De acordo com Chust (2014), alguns projetistas ou autores apenas estimam essas perdas de protensão, para efeito de projeto, efetuando apenas um cálculo mais detalhado nas verificações finais. Já na obra do autor supracitado se faz ao contrário, primeiro é verificado essas taxas de perdas e depois dessa obtenção de resultados é empregado no projeto. Conforme Veríssimo e César Júnior (1998), essa perda de força de protensão existe devido a alguns fatores no momento da execução, tais como: acionamento dos macacos hidráulicos, liberação dos cabos e a transferência de protensão.

De acordo com Cholfe (2013), há uma perda de força de protensão em elementos pré-tracionados, essas perdas podem ocorrer antes da transferência da protensão ao concreto (perdas iniciais), durante essa transferência (perdas imediatas) e depois, ao decorrer do tempo (perdas progressivas). Para toda peça em concreto protendido, deve ser previsto no projeto de pré-fabricação todas essas perdas e os procedimentos para sua determinação, que são estabelecidos pelas normas ABNT NBR 9062:2017 e ABNT NBR 6118:2014.

De acordo com o Chust (2014), normativamente, o princípio de concreto protendido é primeiramente minimizar a fissuração do concreto, através da introdução de tensões normais de compressão em regiões onde, devido a outras ações, existem tensões de tração. Dessa forma, quando se projeta uma peça em concreto protendido procura-se fazê-lo de maneira que em todas as regiões, e nas diversas combinações de ação, as tensões sejam somente de compressão ou de pequena intensidade de tração. Além disso, os efeitos da protensão não se reduzem apenas às questões de serviço, também no estado limite último (próximas ao colapso) há alguns benefícios como o fato de se poder usar armaduras com tensão muito mais elevadas que as passivas submetidas a maiores deformações específicas.

Para fins de cálculo e dimensionamento, foram empregados equacionamentos analíticos para perdas de protensão conforme a NBR 6118:2014, para este estudo também se levou em consideração o equacionamento apresentado por Catoia (2011), para perdas de protensão em lajes alveolares protendidas.

O estudo da deformação por ancoragem se trata da deformação no concreto provocada pelo cabo que está sendo tracionado, acarretando perda de tensão no cabo já ancorado, e foi calculada a partir da Equação 1 (Eq 1).

$$\Delta\sigma = \Delta l * E_p \quad \text{Eq 1}$$

No qual $\Delta\sigma$ refere-se a perda devido à deformação por ancoragem; E_p refere-se ao módulo de elasticidade do concreto pré-moldado e Δl ao encurtamento total que o cabo sofre durante a ancoragem.

A perda por relaxação da armadura, acontece quando a tensão da armadura diminui com o tempo, isto pode ocorrer mesmo sem alteração em seu comprimento, a deformação pela relaxação da armadura para estudo foi calculada a partir da Eq 2.

$$\psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}} \quad \text{Eq. 2}$$

No qual $\psi(t, t_0)$ refere-se ao coeficiente de relaxação do aço no instante t para protensão e carga permanente mobilizada no instante t_0 ; $\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$ é a perda de tensão por relaxação pura desde o instante t_0 do estiramento da armadura até o instante t considerado e σ_{pi} a tensão na armadura

ativa imediatamente após a aplicação da protensão. A relaxação da armadura como perda diferida também é calculada por meio da Eq. 2.

A perda por deformação imediata do concreto (Eq. 3), corresponde ao comportamento do concreto como sólido verdadeiro, e é causada por uma acomodação dos cristais que formam o material.

$$\Delta\sigma_{pd} = \varepsilon_y * E_p \quad \text{Eq. 3}$$

No qual, $\Delta\sigma_{pd}$ é a perda por deformação imediata no concreto; ε_y refere-se à deformação específica da armadura de protensão devido á descompressão, E_p , refere-se ao módulo de elasticidade do concreto pré-moldado.

A perda devido à retração do concreto, calculada a partir da Eq. 4 e se trata da redução de volume do material, geralmente motivada pela eliminação da água contida em seu interior (exsudação), e/ou fatores químicos, climáticos e ocorre nas primeiras nas idades até atingir uma umidade considerada estável.

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) * E_p \quad \text{Eq. 4}$$

No qual: $\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$ refere-se a perda por retração do concreto; $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ á deformação por retração e E_p ao módulo de elasticidade do concreto pré-moldado.

A perda por fluência do concreto, sendo uma deformação diferida, é causada por uma força aplicada que corresponde a um acréscimo contínuo das deformações com o tempo, que ocorrem mesmo para uma tensão constante. A perda por fluência do concreto para este estudo foi calculada a partir da Eq. 5.

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} * \varphi(t, t_0) * \alpha_p \quad \text{Eq. 5}$$

No qual: $\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0)$ refere-se a perda por fluência; σ_{cgp} á tensão que ocorre no concreto no nível do centro de gravidade da armadura de protensão e devido à ação das cargas permanentes inclusive a protensão; $\varphi(t, t_0)$ refere-se a um coeficiente de fluência e α_p se trata da relação entre o módulo de elasticidade do aço protendido e o do concreto.

4.3 Método

Neste estudo foram analisadas seis lajes alveolares protendidas, sendo três lajes alveolares com alturas diferentes e alvéolos similares (Grupo 1), e três lajes com alvéolos diferentes e alturas iguais (Grupo 2), como pode ser observado na Figura 4. As lajes escolhidas foram retiradas do estudo de Pajari (2005).

Lajes com alvéolos similares e alturas diferentes

Lajes com alvéolos diferentes e alturas iguais

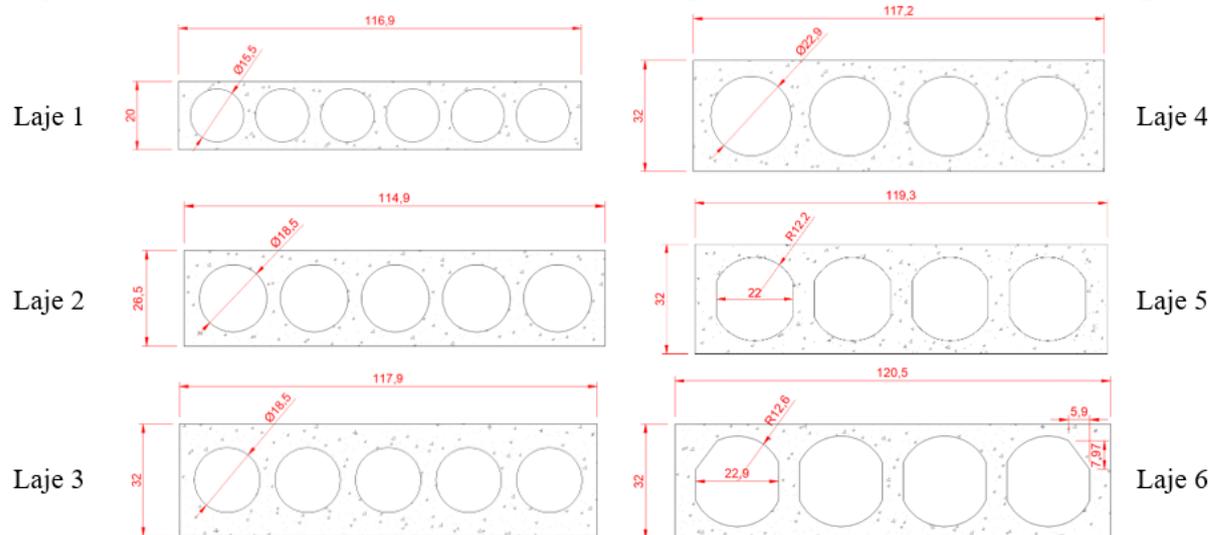


Figura 7. Seções transversais das lajes

Fonte: Adaptado de Pajari (2005)

A Tabela 1 apresenta os valores característicos adotados para cada unidade alveolar.

Tabela 1. Características das Lajes

Elemento	Lajes Alveolares					
	Alvéolos similares e alturas diferentes			Alvéolos diferentes e alturas iguais		
	Laje 01	Laje 02	Laje 03	Laje 04	Laje 05	Laje 06
A (cm ²)	1205,80	2088,14	2428,78	2102,91	2015,44	1945,64
I(cm ⁴)	77933,30	178187,16	321945,60	374031,41	325768,53	329046,58
h (cm)	20,00	26,50	32,00	32,00	32,00	32,00
d' (cm)	3,90	4,00	4,20	3,30	4,20	3,80
d (cm)	16,10	22,50	27,80	28,70	27,80	28,20
ø alv (cm)	15,50	18,50	18,50	22,90	22,00	22,90
b laje (cm)	116,90	114,40	117,90	117,20	119,30	120,50
b _w (mm)	239,00	219,00	254,00	256,00	313,00	289,00
ø (mm)	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50
A _p (cm)	8,75	6,25	12,50	7,50	5,00	13,75
σ _{pi} (MPa)	1100,00	1100,00	1100,00	1000,00	1000,00	1000,00
Δl (m)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

A=Área da seção transversal da unidade alveolar em cm²; I= Momento de inércia em cm⁴; h= Altura da unidade alveolar em cm; d'= Altura útil da seção transversal do elemento de laje alveolar de seção composta em cm; d = Altura útil da seção transversal do elemento de laje alveolar em cm; ø alv= Diâmetro dos alvéolos em cm; b laje= Largura da unidade de laje em cm; b_w= Soma das larguras das nervuras das unidades de lajes alveolares em mm; ø= Diâmetro da barra da armadura em mm; A_p= Área total da seção transversal de aço protendido em cm; σ_{pi}= Tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão em MPa. Δl= Encurtamento total que o cabo sofre durante a ancoragem.

Fonte: Próprio Autor (2022)

Afim de padronizar os resultados obtidos, todos os elementos possuem os mesmos dados iniciais e foram analisados teoricamente no momento de retirada da laje da pista de um dia e depois de dez dias de cura. Os valores iniciais seguiram o estudo de Catoia (2011), que para fins de cálculo, considerou uma temperatura média para data de análise de 20°C e umidade relativa do ambiente de 70%. Para o concreto, considerou-se sua produção com o Cimento Portland, CP V-ARI, adotou-se também o abatimento do concreto menor que 4 cm. As características mecânicas do concreto podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2. Características Mecânicas do Concreto

Características Mecânicas Do Concreto			
Resistência do concreto à compressão na data de efetivação da protensão	f_{cj}	(MPa)	30,00
Resistência do concreto à compressão na data do ensaio	f_{cj}	(MPa)	40,00

Fonte: Próprio Autor (2022)

O aço da categoria CP190RB, foi o adotado para os cálculos, e os seus dados relativos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados relativos ao aço de protensão

Dados relativos ao aço de protensão			
Diâmetro do aço de protensão	\varnothing	(mm)	12,50
Área total da armadura de protensão da laje (1 cordoalha)	A_p	(cm ²)	1,25
Módulo de Elasticidade do aço	E_p	(GPa)	190,00
Para aços de classe RB, a tensão na saída do aparelho deve atender aos limites:			
$\sigma_{pi} \leq$	0,77. f_{ptk}	Resistência da armadura ativa à tração	f_{ptk} (MPa) 1900,00
	0,85. f_{pyk}	Resistência de escoamento da armadura ativa	f_{pyk} (MPa) 1710,00

Fonte: Próprio Autor (2022)

Neste estudo calculou-se as perdas teóricas de protensão nas lajes alveolares, apresentadas na Figura 7, que ocorrem de forma imediata, ou seja, no primeiro dia de fabricação e as perdas diferidas ao longo do tempo, que para este estudo será de dez dias. Para que isso ocorra, foram empregados equacionamentos analíticos para perdas de protensão conforme a NBR 6118:2014, para este estudo também se levou em consideração o equacionamento apresentado por Catoia (2011), para perdas de protensão em lajes alveolares protendidas.

Para as perdas iniciais considerou-se a deformação por ancoragem (Eq. 1), relaxação da armadura (Eq. 2) e deformação imediata do concreto (Eq. 3). No cálculo das perdas diferidas foram consideradas: retração do concreto (Eq. 4), fluência do concreto (Eq. 5) e relaxação da

armadura (Eq. 2). Os valores de perda de protensão estimados pela soma das equações de 1 até 5 foram comparadas com as perdas iniciais de 5% e 15% comumente utilizados por projetistas, conforme Pajari (2005).

A fim de se verificar se havia diferença significativa entre os resultados encontrados para as médias de perdas iniciais e perdas diferidas entre os dois grupos, foi feito através do software SISVARTM, a análise de variância (ANAVA), e posteriormente o deteste Tukey que foi utilizado para comparar o contraste entre as médias dos grupos.

4.4 Resultados e Discussões

A Tabela 4 apresenta os valores referentes as perdas iniciais de protensão e é possível observar que para deformação por ancoragem ($\Delta\sigma$), todas as seis lajes apresentaram a mesma perda de 11,40 MPa, isto porque para esta equação não houve variáveis com valores diferentes entre as lajes.

Tratando-se da perda imediata por relaxação da armadura ($\Delta\sigma_r$), as Lajes 1, 2 e 3 obtiveram uma perda de tensão de protensão 5,90 Mpa e as Lajes 4, 5 e 6 de 1,49 Mpa, analisando os cálculos para esta variável, foi possível identificar que a tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas foi o motivo desta diferença, como a tensão inicial nas primeiras lajes foram maior assim como também a tensão inicial, é possível dizer quanto maior a tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas maior será a perda de protensão imediata por relaxação da armadura.

Referente a perda por deformação imediata do concreto, o valor mais expressivo foi encontrado no grupo de lajes com alvéolos diferentes e alturas iguais, Laje 6, correspondendo a 72,32 MPa, o menor valor foi 24,69 MPa valor referente a Laje 05, também pertencente ao segundo grupo de lajes estudadas. O Grupo 1, alcançou uma média de 55,16 MPa e desvio padrão de 18,14 MPa, o Grupo 2 de 44,60 Mpa e desvio de 24,76 Mpa. Para esta variável a média geral encontrada foi de 49,88 MPa e desvio padrão de 20,25 Mpa. Através da Figura 8, é possível verificar a diferença encontrada para esta variável, o que mostra grande variação entre os modelos analisados.

Tabela 4. Perdas Iniciais

		$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma_{pd}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{p,s}$ (MPa)	Total (Mpa)	Perdas (%)
Grupo 1	Laje 01	11,40	5,90	68,63	85,93	7,81%
	Laje 02	11,40	5,90	34,53	51,83	4,71%
	Laje 03	11,40	5,90	62,33	79,63	7,24%
	Média	-	-	55,16	72,46	6,59%
	Dev. padrão	-	-	18,14	18,14	1,65%
	Coef. De variação	-	-	32,89%	25,04%	25,05%
Grupo 2	Laje 04	11,40	1,49	36,79	49,68	4,97%
	Laje 05	11,40	1,49	24,69	37,58	3,76%
	Laje 06	11,40	1,49	72,32	85,21	8,52%
	Média	-	-	44,60	57,49	5,75%
	Dev. padrão	-	-	24,76	24,76	2,47%
	Coef. De variação	-	-	55,51%	43,06%	43,03%
Média total		-	-	49,88	64,97	6,17%
Dev. Padrão Total		-	-	20,25	21,07	1,94%
Coef. de Variação Total		-	-	40,61%	32,43%	31,38%

$\Delta\sigma$ = Deformação por ancoragem; $\Delta\sigma_{pd}$ = Relaxação da amadura inicial; $\Delta\sigma_{p,s}$ = Deformação imediata do concreto.

Fonte: Próprio Autor (2022)

A Laje 6, foi que apresentou maior percentual de perda de protensão inicial, com o valor de 85,21 MPa, o que representou 8,52 % em relação a tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas, a Laje 1 também obteve um valor de 85,93 MPa de perda inicial, a unidade alveolar perdeu cerca de 7,81% da tensão inicial de protensão. Já a Laje 5, com uma perda de 37,58 MPa representando 3,76%, obteve o menor índice de perda inicial de proteção. A variável que mais influenciou as porcentagens de perdas iniciais foi a deformação imediata do concreto.

Quando comparados com a perda inicial de 5% (PAJARI, 2005), a Laje 2 com média de 4,71%, 4 com 4,97% e 5 com 3,76% de perda foram as que atenderam estes limites, tratando-se das médias, o Grupo 1, atingiu um percentual médio de 6,59% de perda inicial e um desvio padrão de 1,65%, o grupo atingiu um coeficiente de variação e 25,05% considerado um coeficiente de média dispersão. Já o Grupo 2, atingiu um percentual médio de 5,75% de perda inicial e um desvio padrão de 2,47%, o coeficiente de variação foi de 43,03% considerado um coeficiente de alto desvio, no entanto levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais dos dois grupos estavam dentro dos previstos por Pajari (2005).

Tratando-se da análise geral das lajes, obteve-se uma média total de 6,17% de perda inicial, com desvio padrão de 1,94% e um alto coeficiente de variação de 31,38 %. Levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais estavam dentro dos previstos por Pajari (2005), no entanto, para fins de dimensionamento e execução, seria pautável aumentar essa recomendação para ao menos 8% de perda inicial, garantindo maior confiabilidade e segurança, embora análises de grupos bem maiores de lajes seja recomendado para confirmar este valor.

Tabela 5. Perdas Diferidas

		$\Delta\sigma_{p,s}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{p,s}$ (t,t0) (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	Total (MPa)	Perdas (%)
Grupo 1	Laje 01	15,21	79,71	3,53	98,45	8,95%
	Laje 02	12,15	38,67	5,59	56,41	5,13%
	Laje 03	11,15	66,20	3,90	81,25	7,39%
	Média	12,84	61,53	4,34	78,70	7,15%
	Dev. padrão	2,12	20,92	1,10	21,14	2,00%
	Coef. De variação	16,51%	34,00%	25,35%	26,86%	28,57%
Grupo 2	Laje 04	13,22	42,01	0,02	55,25	5,02%
	Laje 05	13,40	28,72	0,65	42,77	3,82%
	Laje 06	13,84	80,28	0,00	94,12	8,56%
	Média	13,49	50,34	0,22	64,05	5,82%
	Dev. padrão	0,32	26,77	0,37	26,78	2,46%
	Coef. De variação	2,37%	53,18%	168,18%	41,81%	50,00%
Média total		13,16	55,93	2,28	71,38	6,67%
Dev. Padrão Total		1,40	22,34	2,37	23,02	2,07%
Coef. de Variação Total		10,64%	39,94%	103,95%	32,25%	30,98%

$\Delta\sigma_{p,s}$ = Retração do concreto; $\Delta\sigma_{p,s}$ (t,t0) = Fluência do concreto; $\Delta\sigma_r$ = Relaxação da armadura posterior.

Fonte: Próprio Autor (2022)

Dentre os resultados apresentados para perdas devido à retração do concreto ($\Delta\sigma_{p,s}$), a Laje 3, do primeiro grupo, com perda de 11,15 MPa, alcançou o menor resultado, já a Laje 6, do segundo grupo perdeu cerca de 13,84 MPa. O Grupo 1, para esta variável teve uma perda média de 12,84 MPa, com desvio padrão de 2,12 MPa e coeficiente de variação de 16,51%. A menor laje do grupo (Laje 1), com menor diâmetro de alvéolo e altura do grupo foi a que teve a maior perda por retração do concreto, enquanto a Laje 3, sendo a laje com maior altura, diâmetro do alvéolo e comprimento foi a que obteve a menor perda (11,15 MPa).

Para o segundo grupo de laje analisado os valores encontrados para as perdas por retração do concreto ficaram muito aproximados, isto pode ter ocorrido devido à similaridade dos diâmetros dos alvéolos, o maior valor encontrado foi o da Laje 6 (13,84 MPa), sendo a Laje com maior comprimento do grupo, já a Laje 4, com menor comprimento obteve também a menor perda por retração do concreto do grupo (13,22 MPa). O Grupo obteve um valor médio de 13,49 MPa para esta variável e desvio padrão de 0,32 MPa. A média geral para esta variável foi de 13,16 MPa e desvio padrão de 1,40 MPa. O coeficiente de variação total foi de 10,64%.

Nos resultados apresentados para perdas devido fluência ($\Delta\sigma_{p,s}(t,t_0)$), a Laje 2 (38,67 Mpa) , alcançou o menor resultado, já a Laje 6, com perda de 80,28 MPa obteve o pior desempenho para esta variável. O Grupo 1, teve uma perda média de 61,53 MPa. Desvio padrão de 20,92 MPa e coeficiente de variação de 34%, já o segundo grupo médio de 50,34 MPa, desvio padrão de 26,77 MPa e coeficiente de variação de 53,19%. A média geral para esta variável foi de 55,93 MPa e desvio padrão de 22,34 MPa. O coeficiente de variação total foi de 39,94%. A fluência foi a variável que mais influenciou nas perdas diferidas.

As perdas diferidas por relaxação da armadura ($\Delta\sigma_r$), com média total de 2,28 MPa e desvio padrão de 2,37 MPa, foi a variável com menos influência sobre as perdas diferidas e totais (Figura 8). O segundo grupo de lajes com média de 0,22 MPa e desvio padrão de 0,37 MPa, teve valores muito aproximados de zero, e a menor perda por relaxação da armadura com a Laje 06 (0,00 MPa). Já a média do primeiro grupo foi de 4,34 Mpa e desvio padrão de 1,10 MPa.

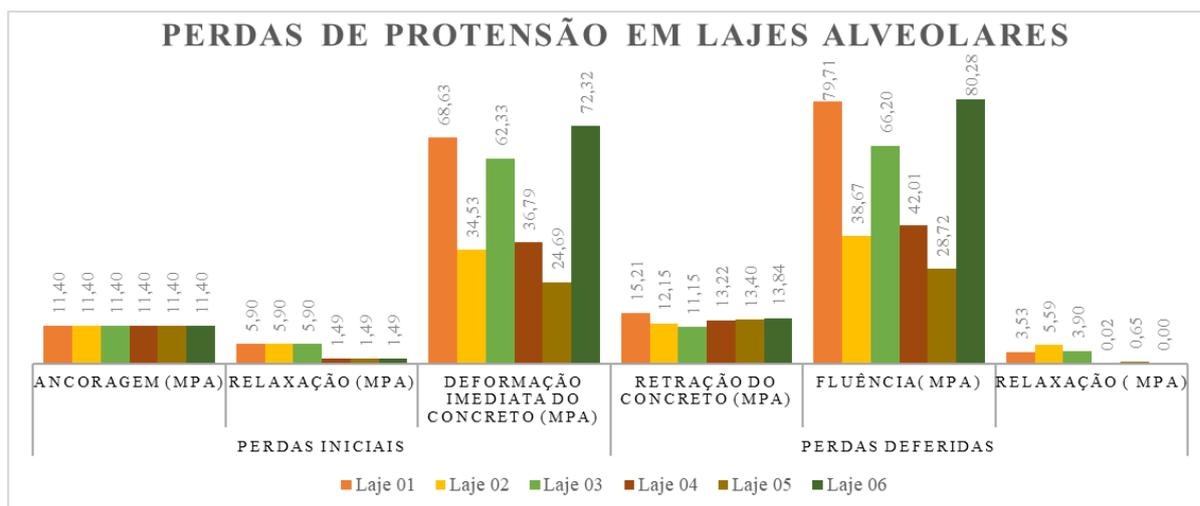


Figura 8. Perdas de Protensão em lajes alveolares
 Fonte: Próprio Autor (2022)

Tratando – se das perdas diferidas de tensão, a Laje 6 também foi a que apresentou maior percentual, com o valor de 94,12 MPa, o que representou uma perda de 9,42% em relação a tensão inicial de protensão aplicada nas cordoalhas, a Laje 1 com 98,45 MPa de perda diferida,

perdeu cerca de 8,95% da tensão inicial de protensão. A Laje 5, com uma perda de 42,77 MPa representando 4,28%, obteve o menor índice de perda diferida de proteção. A variável que mais influenciou as porcentagens de perdas diferidas foi a fluência do concreto.

Tendo em vista a perda diferida de 15% proposta por Pajari (2005), tanto as lajes do Grupo 1, quanto as do Grupo 2, médias e valores individuais, estiveram dentro destes limites, provando que o percentual apresentado para o autor atende as perdas previstas por análises numéricas. A Tabela 6 apresenta os valores referentes as perdas totais de protensão. A Tabela 6 apresenta os valores referentes as perdas totais de protensão.

A Tabela 06 apresenta os resultados da análise de variância e teste de Tukey realizados para comparar as médias de perdas iniciais encontradas para lajes dos dois grupos.

Tabela 6. Análise de Variância e teste de Tukey para perdas iniciais

FV	Gl	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Grupo	1	36,30106	336,3010	0,7140	0.4457
Erro	4	1884,2492	471,0623		
Total Corrigido	5	2220,5503			
CV (%) =	33,4				
Média Geral:	64,9766667		Nº de obs:	6	
Teste de Tukey para perdas iniciais					
Tratamentos				Médias	Resultados do teste
Grupo 2				57,4900	a1
Grupo 1				72,4633	a1

Fonte: Próprio Autor (2022).

No qual: SQ é a soma de quadrados, gl o grau de liberdade QM o quadrado médio CV o coeficiente de variação e F a variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras.

Analisando a Tabela 6 pode-se verificar que estatisticamente, pelo teste Tukey, para as perdas iniciais, formou-se apenas um grupo (a1), desta forma pode-se entender através da análise estática, que dois os grupos de lajes estudados apresentam médias semelhantes entre si e que estatisticamente não podem ser considerados distintos

A Tabela 07 apresenta os resultados da análise de variância e teste de Tukey realizados para comparar as médias de perdas diferidas para lajes dos dois grupos.

Tabela 7. Análise de Variância e teste de Tukey para perdas diferidas

FV	Gl	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Grupo	1	322,2268	322,2268	0,5540	0,4982
Erro	4	2327,8923	581,9730		
Total Corrigido	5	2650,1191			
CV (%) =	33,8				
Média Geral:	71,3750		Nº de obs:	6	
Teste de Tukey para perdas diferidas					
Tratamentos				Médias	Resultados do teste
Grupo 2				64,0466	a1
Grupo 1				78,7033	a1

Fonte: Próprio Autor (2022).

Analisando a Tabela 7 também pode-se verificar que estatisticamente, pelo teste Tukey, que não houve diferença mínima significativa encontrada para as médias de perdas diferidas, pois pelo teste formou-se apenas um grupo (a1), desta forma pode-se entender, que dois os grupos

de lajes estudados apresentam médias semelhantes entre si e que estatisticamente não podem serem considerados distintos. Apesar de não ter obtido diferenças significativas entre os grupos através do método aplicado, pode ser que em amostras maiores, as alturas das lajes e diâmetros dos alvéolos ainda sejam fatores que diferenciam tais grupos para a perda de protensão das lajes alveolares.

4.5 Conclusão

Quando comparados com a perda inicial de 5% recomendada por Pajari (2005), o Grupo 1, atingiu um percentual médio de 6,59% de perda inicial e um desvio padrão de 1,65%. Já o Grupo 2, atingiu um percentual médio de 5,75 % de perda inicial e um desvio padrão de 2,47 %, no entanto levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais dos dois grupos estavam dentro dos previstos por Pajari (2005).

Já a média geral das perdas iniciais de pretensão foi de 6,17%, com desvio padrão de 1,94% e um alto coeficiente de variação de 31,38 %. Levando em consideração o desvio padrão, pode-se considerar que os resultados para perdas iniciais estavam dentro dos previstos por Pajari (2005), no entanto, para fins de dimensionamento e execução, seria pautável aumentar essa recomendação para ao menos 8% de perda inicial, garantindo maior confiabilidade e segurança. Contudo, sugere-se estudos com mais lajes para se determinar com precisão este valor.

Tendo em vista a perda diferida de 15% proposta por Pajari (2005), tanto as lajes do Grupo 1, quanto as do Grupo 2, médias e valores individuais estiveram dentro destes limites, provando que o percentual apresentado para o autor atende as perdas previstas por análises numéricas para lajes com diferentes geometrias.

Através das análises estatísticas pode-se verificar que não houve diferença mínima significativa encontrada para as médias entre os grupos, isto tanto perdas iniciais quanto para perdas diferidas, pois para ambos os testes os grupos apresentaram médias semelhantes entre si. Apesar de não ter obtido diferenças significativas entre os grupos através do método aplicado, pode ser que em amostras maiores, as alturas das lajes e diâmetros dos alvéolos ainda sejam fatores que diferenciam tais grupos para a perda de protensão das lajes alveolares.

4.6 Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde.

4.7 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014

_____. **NBR 7482 - Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7483 - Cordoalhas de aço para concreto protendido – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14861 – Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

ARAUJO, Carlos Antonio Menegazzo et al. **Estudo de lajes alveolares pré-tracionadas com auxílio de programa computacional**: Dissertação. 2007.

BASTOS, Paulo S. S. **Concreto protendido - notas de aula**. Disciplina: 2129 - Concreto Protendido. Bauru: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2015.

BATTAGIN, A. F.; ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, 2011.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido: pré-tração, pós-tração, cálculo e detalhamento**. São Paulo: PINI, 2017. ISBN: 9788572664820. 2017

CATOIA, Bruna. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto protendido: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 2013.

CHUST, Roberto Carvalho. **Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. 2ªed. São Paulo: PINI, 2014.

El DEBS, Mounir K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESCUSP), 2000.

GUSTANI, Paulo Henrique Ferreira. **Laje alveolar protendida: roteiro de dimensionamento e panorama de produção nas regiões sudoeste e centro-sul do Paraná**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos, Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharias de Estruturas, 2005. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/cp_ebook_2005.pdf

JEYASHREE, T. M.; RAJKUMAR, PR Kannan; SATYANARAYANAN, K. S. **Developments and research on fire response behaviour of prestressed concrete members– A review**. Journal of Building Engineering, v. 57, p. 104797, 2022.

LEE, Deuckhang et al. **Resistências de elementos de laje oca pré-moldados pré-esforçados reforçados ao cisalhamento**. ACI Structural Journal , v. 117, n. 2, pág. 129-139, 2020.

MONTEIRO, João Matheus Alves. **Simulação numérica para dimensionamento de peças de concreto protendido submetidas à flexão**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.

NACHT, Pedro Kaj Kjellerup. **Ferramenta gráfico-interativa de verificação de tensões no estado limite de serviço de vigas protendidas com pós-traçoad aderente**. 2015. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PAJARI, Matti. **Resistência de lajes alveolares protendidas à ruptura por cisalhamento da alma**. Espoo, Finlândia: Centro de Pesquisa Técnica da Finlândia, 2005.

PFEIL, W. **Concreto protendido** vol. 1 - Introdução. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1984

PETRUCELLI, Natalia Savietto. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. Dissertação. São Carlos. 2009.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Capítulo 2: características do concreto. **Estruturas De Concreto**, p. 2.1-2.10, 2004.

TADROS, M. K.; GHALI, A.; DILGER, W. H. **Time-dependent prestress loss and deflection in prestressed concrete members**. PCI Journal; 20(3):86–89, 1975.

TATU. Tatu Pré-Moldados (2008). **Laje alveolar protendida**. Disponível em: <https://www.tatu.com.br/Paineis%20Alveolares%20Tatu>.

TAVARES, Matheus De Godoy. **Simulação da perda de protensão aderente em elementos de concreto**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TROVARELLI, Marília de Lara. **Vídeos Ilustrativos o Comportamento Físico das Perdas de Protensão em Viga**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M. Lenz. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998.

ZEREN, A.; ZEREN, M. **Stress relaxation properties of prestressed steel wires**. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 141, p. 86–92, 2003