

AVALIAÇÃO COMPARATIVA PRELIMINAR ENTRE LAJE LISA EM CONCRETO PROTENDIDO E LAJE MACIÇA EM CONCRETO ARMADO

FERREIRA, João Antônio dos Santos¹

CORDEIRO, Alan de Barros²

FRANCOZO, Helio³

Universidade São Francisco

Joao.asf9666@gmail.com

¹ João Antônio dos Santos Ferreira, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Campinas - SP;

² Alan de Barros Cordeiro, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Campinas - SP;

³ Orientador Professor Me Helio Francozo, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus de Campinas- SP

Resumo. Através dos séculos novas tecnologias vêm sendo aplicadas na construção civil, o que tem possibilitado a construção de empreendimentos inimagináveis há alguns anos. Uma dessas novas tecnologias é o concreto protendido, que veio para solucionar um dos principais problemas do concreto armado, o efeito da tração nas peças estruturais, que antes dessa solução limitava a execução de lajes com grandes vãos, sem uma grande quantidade de pilares. Este trabalho de pesquisa tem o objetivo de apresentar os princípios básicos do concreto protendido aplicado na construção de lajes lisas protendidas, comparando-a com as lajes construídas pelo processo convencional. A pesquisa foi conduzida por meio de estudos de casos apresentados por autores renomados que dedicaram esforços para transmitir o conhecimento teórico e prático deste assunto. Também mediante pesquisas de projetos em sua fase de planejamento e execução, em diversos sites e canais de engenharia, além de um escritório de cálculo estrutural que trabalha com essa metodologia em seus projetos. Os métodos e ferramentas utilizadas para elaboração desse trabalho, se fundamentaram em análises de algumas obras já executadas e projetos encontrados em sites de empresas especializadas em concreto protendido, além da elaboração de um protótipo virtual de laje no programa REVIT comparando layout estrutural, processo executivo, custo, ganhos diretos e indiretos.

Palavras-chave: Laje lisa protendida. Laje maciça de concreto armado. Protensão. Concreto protendido. Concreto armado. Mão-de-obra. Esbelta. Cordoalha. Aço.

Introdução

A utilização de lajes lisas protendida em edifícios residenciais representa uma abordagem arquitetônica e estrutural inovadora que tem ganhado destaque na indústria da construção civil. Essa tendência surge como uma resposta à demanda por ambientes internos mais limpos e funcionais, nos quais a presença de vigas e pilares são reduzidas, dando aos ambientes uma estética mais limpa e sofisticada. A introdução das lajes no cenário arquitetônico representa um avanço que vai além da função estrutural e promove uma sinergia entre forma e função. A tecnologia de lajes trouxe benefícios significativos para a construção civil, abrindo novas perspectivas de projeto e otimização de espaços. Ao eliminar a necessidade de vigas e pilares, as lajes proporcionam maior liberdade de projeto, permitindo um layout mais aberto e flexível ao mesmo tempo, reduzindo a altura total do piso para uma melhor eficiência de uso vertical. Este estudo se concentra em explorar a forma aprofundada de uma vertente específica

das lajes lisas: as lajes lisas protendidas. O argumento central deste trabalho é pesquisar as vantagens e as desvantagens dessas lajes, submetendo-as a uma análise comparativa detalhada em relação às lajes convencionais. A protensão aplicada às lajes lisas, por meio da incorporação de cabos de aço tensionados, surge como uma estratégia engenhosa para maximizar a capacidade de carga das estruturas, eliminando deformações e fissuras indesejadas. A investigação abrangerá diversos aspectos, incluindo considerações técnicas, técnica e estética, a fim de fornecer uma visão abrangente dos benefícios e limitação desse sistema estrutural. A pesquisa será dividida em quatro seções fundamentais. Inicialmente, será estabelecida uma base teórica sólida sobre os princípios da protensão. Em seguida, serão explorados os princípios das lajes maciças de concreto armado e lajes lisas protendidas e a sua evolução na prática arquitetônica. A terceira seção consistirá na análise comparativa entre lajes lisas protendidas e convencionais, destacando critérios técnicos, custos, manutenção e apelo estético. Finalmente, a quarta seção apresentará um estudo de caso concreto, aplicando os conceitos discutidos em um desenho de estrutura de edifício com múltiplos pavimentos, a fim de validar e ilustrar as considerações teóricas e apresentadas. Este estudo visa contribuir para a compreensão e adoção das lajes lisas protendidas como uma alternativa viável e vantajosa, na prática da engenharia civil atual. Este trabalho busca simplificar a compreensão desses sistemas e responder questões sobre seu desempenho, custo e aplicação em projetos.

Conceito de concreto protendido

Para PFEIL, W. (1984) a palavra protensão ou pré-tensão nos informa sobre um estado inicial de tensão em alguma coisa. Podemos entender a protensão como a aplicação de forças normais que tendem a protender uma estrutura com a finalidade de criar tensões prévias contrárias as forças que incidirão no objeto, as quais queremos combater. A protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações

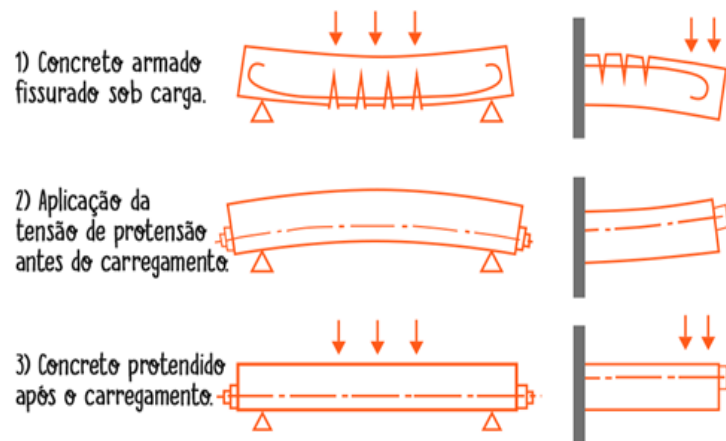


Figura 1 – Aplicação de cargas em vigas - Fonte <https://nelsoschneider.com.br/concreto-protendido/>

A aplicação da protensão na construção civil se dá pela introdução de cabos de aço, fabricados com características apropriadas para essa finalidade, ou seja, com alta resistência, sendo tracionados e ancorados na própria estrutura de concreto. Essa forma construtiva faz com que o concreto trabalhe de forma comprimida, aproveitando sua característica mais eficiente, a compressão. A utilização de cabos de aço de alta resistência possibilita o emprego de tensões elevadas, o que compatibiliza a utilização de dois materiais com características distintas, o concreto com alta resistência a compressão e o aço com elevada resistência a tração. Podemos utilizar o exemplo de uma viga de concreto armado, bi apoiada, que ao ser submetida ao

carregamento atuam sobre ela os momentos fletores positivos, tensão de compressão em sua parte superior e tensão de tração na parte inferior. Essas tensões de tração usualmente causam fissuras devido à baixa capacidade de resistência a tração do concreto. A aplicação da protensão nessa região em que o concreto é tracionado, contribui para aumentar a capacidade de resistência a tração dessa viga.

O estado prévio de tensões, introduzido pela protensão na viga de concreto, melhora o comportamento da mesma, não só para as solicitações de flexão, como também para as solicitações de cisalhamento. (PFEIL, W. 1984)

Breve relato histórico

Segundo BASTOS (2021) nos primeiros anos do desenvolvimento do concreto protendido houve desafios importantes a serem superados devido à inexistência de aços com resistências apropriadas para essa aplicação. A força de protensão aplicada nas peças produzidas, eram consideravelmente reduzidas em razão das chamadas perdas de força de protensão. Podemos citar as decorrentes da retração e da fluência do concreto, assim como a relaxação do aço, escorregamento na ancoragem, entre outras. O desenvolvimento de aços com maior resistência e propriedades adequadas para essa aplicação, fez com que o concreto protendido ganhasse escala, se tornando uma excelente opção para a construção civil. Foi por meio de personalidades inovadoras que as primeiras aplicações iniciaram a promissora técnica do concreto protendido.

“A primeira aplicação de protensão ocorreu nos Estados Unidos, por P. H. Jackson, em 1866, com patente para arcos de concreto. Em 1888, C. E. W. Doehring na Alemanha obteve patente para protensão de lajes de concreto com fios de aço. No entanto, o desempenho dos primeiros elementos protendidos era prejudicado pela baixa resistência dos aços disponíveis, e pelas perdas de protensão, diminuindo a aplicação.” (BASTOS, 2021)

Podemos citar a contribuição do francês Eugene Freyssinet, que entendeu a relevância das perdas de forças de protensão e propôs formas de compensação. Considerou a necessidade da utilização de aços com maior resistência e alongamento, fazendo com que as perdas por retração e fluência do concreto fossem compensadas

No Brasil, em 1948 foi construída no Rio de Janeiro a primeira ponte em CP, com sistema de Eugene Freyssinet, e em 1952 a Companhia Belgo-Mineira iniciou a fabricação de aços de protensão. Daquela época e até o presente momento, o CP vem sendo aplicado com grande sucesso, nos mais variados tipos de construção, no mesmo nível técnico dos países precursores. (BASTOS, 2021)

Concreto protendido Pré-tracionado

No processo de protensão, é estirado ou tracionado os aços da armadura de protensão, fios, cordoalhas ou barras. Esse estiramento normalmente se faz com o uso de macacos hidráulicos, que pode ser feito antes ou depois que o elemento protendido for construído. Quando o estiramento é feito antes do endurecimento do concreto, é chamado de pré-tensão ou pré-tração, e quando for feito após o elemento pronto, chamamos de pós-tensão ou pós-tração.

Segundo o item 3.1.7 da NBR 6118:2023, o concreto com armadura ativa pré-tracionada, protensão com aderência inicial, tem-se como forma construtiva o pré- alongamento da armadura ativa, apoiando os mecanismos de estiramento nas estruturas de fabricação, formas,

antes do lançamento do concreto. Após o endurecimento do concreto, os dispositivos são liberados e a ancoragem do aço no concreto é feita apenas pela aderência.

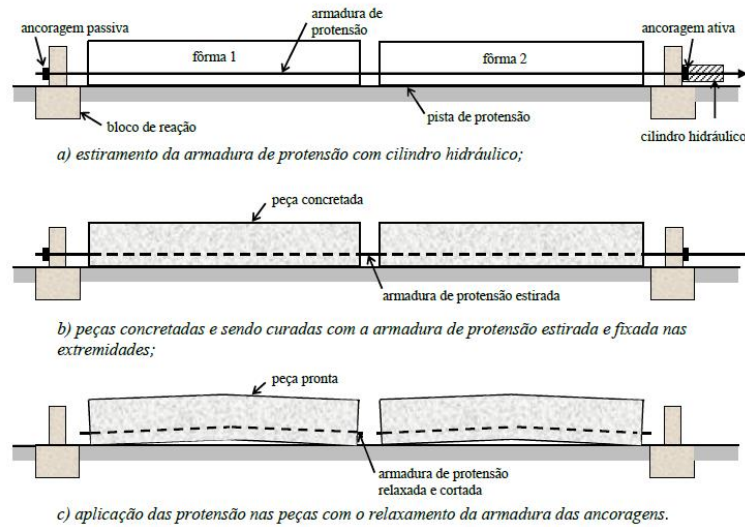


Figura 2 – Pré-tração – Fonte: (BASTOS, 2021).

Após o término da operação de estiramento, o fio é fixado nos dispositivos da ancoragem ativa, e o cilindro é retirado para, sucessivamente, ir fazendo o estiramento dos fios seguintes. Portanto, a extremidade onde o estiramento é feito é chamada ancoragem ativa, e a extremidade em que não são estirados é a ancoragem passiva (BASTO, 2021)

Concreto Protendido Pós-tração com aderência

No item 3.1.8 da NBR 6118:2023 é definido como concreto protendido pós-tração com aderência a forma construtiva em que o aço é estirado após o endurecimento do concreto, sendo utilizados como apoio o próprio elemento estrutural, formando posteriormente a aderência com o concreto através da injeção de nata de concreto nas chamadas bainhas. Segundo Bonilha, (2016) a utilização do método de pós-tração com injeção de calda de cimento preenchendo os espaços vazios no interior da bainha para adquirir a aderência, é muito utilizado em estruturas protendidas de médio e grande porte, tais como obras viárias, pontes e viadutos. São as conhecidas estruturas protendidas construídas nos locais da obra. Neste processo a transmissão da força de protensão é feita pelas ancoragens ativas e passivas, as cunhas e porta cunhas ficam inseridas na própria peça, ou seja, no concreto. Assim, quando a aplicada a força de protensão comprimindo o concreto a força é transferida para a peça.

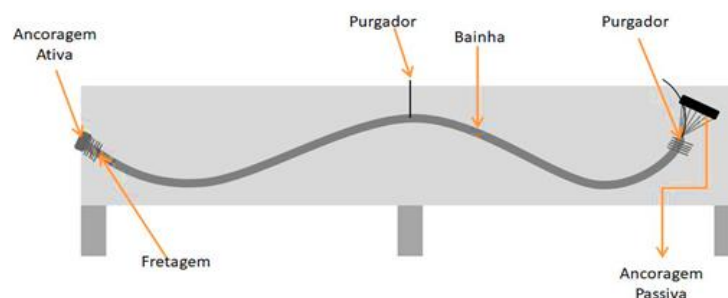


Figura 3 – Pós-tração - Fonte: <https://nelsoschneider.com.br/concreto-protendido/>

Os cabos de protensão (conjuntos de cordoalhas) podem ser estirados em estágios diferentes, proporcionando incrementos de força de protensão na peça quando necessários, conforme existam diferentes estágios de construção e as cargas vão sendo progressivamente aumentadas. Após a operação de estiramento, a bainha é geralmente preenchida com calda (nata) de cimento sob pressão, para proteger o aço e proporcionar aderência com o concreto, o que faz com que os dois materiais trabalhem de modo solidário, em conjunto, e com melhor comportamento da peça na resistência à fissuração e à flexão [...]. Com a injeção de calda de cimento tem-se a pós-tensão com aderência, e sem a injeção tem-se a pós-tensão sem aderência. (BASTO, 2021)

Concreto Protendido Pós-tracionado sem aderência

A NBR 6118:2023 define que concreto protendido pós-tracionado sem aderência é o processo em que o estiramento do aço de protensão, armadura ativa, é realizado após o endurecimento do concreto, utilizando como apoio o próprio elemento estrutural construído. Contudo, nesse método o aço não se adere ao concreto, ficando a armadura ligada em apenas dois pontos.

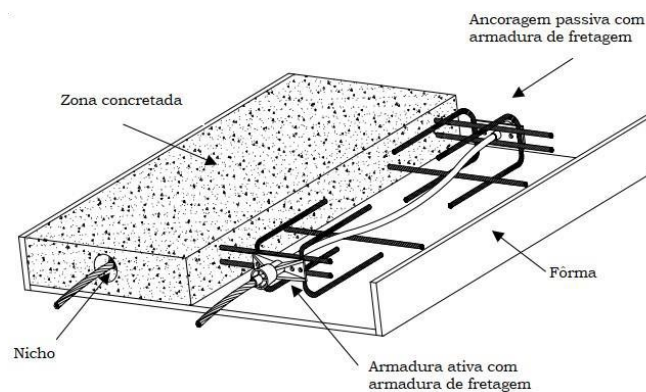


Figura 4 – Esquema simplificado de protensão não aderente (ancoragem passiva, ativa e armadura de fretagem). Fonte: (ALMEIDA FILHO; 2002)

Para BASTOS (2021), a pós-tensão sem aderência tem sido largamente utilizada no Brasil e no mundo, devido aos ganhos que apresenta na construção de lajes maciças e nervuradas, piso industriais, vigas e reforço estrutural. A cordoalha de sete fios é envolta com graxa para diminuir o atrito com a capa de polietileno durante a movimentação na operação de estiramento [...]. A capa funciona como uma bainha, impedindo o contato do concreto com a cordoalha.

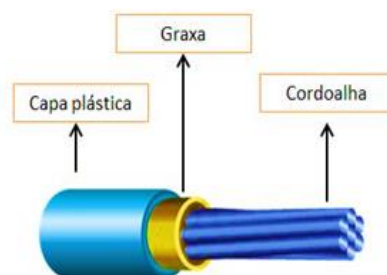


Figura 5 – Cordoalha sem aderência. Fonte: <https://nelsoschneider.com.br/concreto-protendido/>

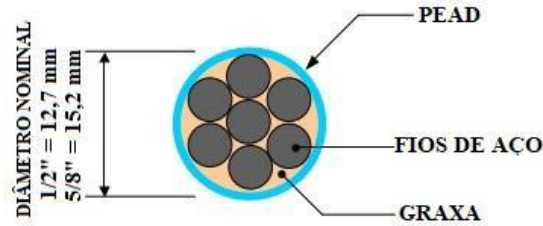


Figura 6 – Seção transversal da monocordoalha engraxada. (Fonte: EMERICK; 2002)

Este processo de pós-tensionamento sem aderência tem os mesmos princípios construtivos do pós-tensionamento com aderência, diferindo apenas o tipo de “bainha” e a não aderência nela por não ser injetado calda de cimento. Atualmente, a protensão com cabos de cordoalhas engraxadas está presente na maioria dos projetos de lajes “planas” ou “nervuradas” dos edifícios residenciais e comerciais. Também é grande a aplicação das cordoalhas engraxadas em pisos estruturais e pré-moldados com pós-tração executados nos canteiros de obra. (BONILHA, 2016)

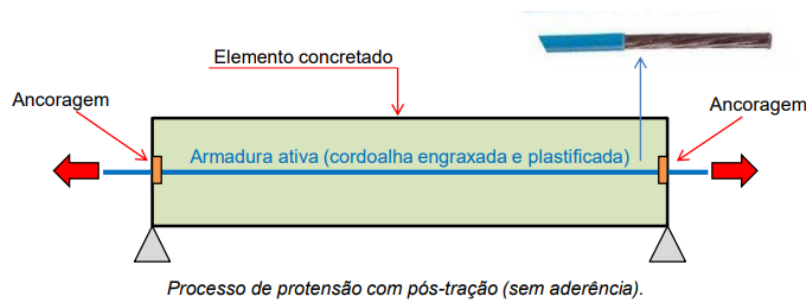


Figura 7 – Fonte: https://www.rlf.com.br/arquivos/RLF_CP_PostsLinkedIn_2020-R1.pdf

Concreto Protendido com Pós-tracionamento Externo

A maioria das construções com concreto protendido é realizada com a armadura no interior do elemento estrutural, contudo há alguns casos em que a protensão feita com a armadura ativa no exterior da peça apresenta vantagens, e segundo Bastos, vem sendo aplicação em alguns casos específicos, como em seção celular ou caixões de estruturas de grande porte. Uma das características dessa forma de protensão, é que por ser externa os cabos podem ser substituídos a qualquer momento.

Como explica BASTOS (2021), a armadura de protensão externa é uma das partes da armadura do elemento estrutural, que pode conter também a armadura inseridas no concreto, passiva, ativa ou ambas.

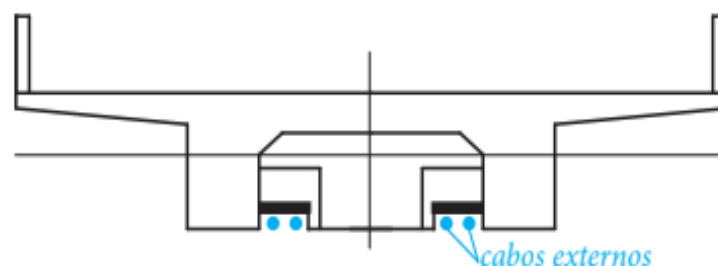


Figura 8 – Armadura de protensão externa. (Bonilha et. Al.; 2016)

A protensão externa pode ser encarada como uma força aplicada, posicionada adequadamente com o auxílio de dispositivos especiais (desviadores). As aplicações mais comuns deste tipo de protensão podem ser encontradas em pontes e viadutos e também como reforços de estruturas prontas. (BONILHA, 2016)

Perdas gerais na protensão

Conforme apresentado por HANAI, J.B. (2005), no processo de protensão do concreto há diversas perdas decorrente da natureza dos materiais e dispositivos, tais como: perda por retração e fluência do concreto, perdas por relaxação e fluência do aço de protensão, perdas de protensão por atrito dos cabos, perda de tensão na armadura decorrente da deformação imediata do concreto e perda de tensão na armadura decorrente de acomodação das ancoragens.

Sabemos que o concreto está sujeito a deformações devido as suas características naturais e composição físico-química. Uma dessas deformações se dá pela retração por secagem que se intensifica ao longo do tempo. Outra que podemos citar é a fluência que ocorre no concreto, também, por razão do tempo. Em decorrência dessas deformações a protensão é afetada com o encurtamento do concreto, provocando perdas por retração e fluência do concreto. Outra perda progressiva que podemos observar nas peças protendidas é decorrente da relaxação e fluência do aço. Ao submeter o aço as forças constantes ele tende a diminuir a tensão por relaxação por consequência de sua natureza construtiva. A fluência ocorre quando a tensão permanece constante, provocando o aumento da deformação do aço. Com esses fenômenos característicos do aço ocorrendo na aplicação da protensão, temos as perdas por relaxação e fluência do aço de protensão. Ao estirar a armadura de protensão ocorre o atrito entre o aço de protensão e a bainha, principalmente nos cabos instalados curvos, diminuindo a tensão aplicada. Essa é uma perda de protensão por atrito dos cabos que ocorre instantaneamente. No caso da fabricação de peças pré-tracionadas há uma perda de protensão pertinente ao processo de fabricação, uma vez que os cabos são tracionados e após a concretagem e liberação das ancoragens, o concreto se acomoda devido à ação da tensão nos cabos, essa é a perda decorrente da deformação imediata do concreto. Por fim, podemos citar a perda de protensão devido à acomodação da ancoragem, quando essas são liberadas do macaco hidráulico há uns pequenos deslizamentos dos elementos provocando essa perda. Ainda podemos citar Perda de tensão na armadura decorrente da deformação imediata do concreto.

Equipamentos e Acessórios para Protensão

De acordo com BASTOS (2019), as ferramentas e equipamentos utilizados na técnica de concreto protendido, na construção civil, são divididos em duas categorias: Ferramentas para fabricação dos cabos de protensão, tais como, cilindros de laminação que são utilizados para laminá-los em fios ou cordões, e máquinas de trefilação que são utilizadas para tracionar os fios ou cordões, aplicando-lhes uma tensão específica. Abaixo alguns exemplos.

- Máquinas de bobinagem: São utilizadas para bobinar os fios ou cordões em forma de cabo.
- Ferramentas e equipamentos para tensionamento e ancoragem dos cabos de protensão.
- Macacos hidráulicos: Os macacos hidráulicos são os equipamentos mais utilizados para tensionamento dos cabos de protensão. Eles são capazes de aplicar forças elevadas, com precisão e segurança.
- Chaves de tensão: As chaves de tensão são utilizadas para fixar os cabos de protensão nas ancoragens. Elas são projetadas para garantir que os cabos sejam tensionados de forma uniforme.
- Banheiras de nata de cimento: As banheiras de nata de cimento são utilizadas para

injetar nata de cimento nas bainhas metálicas. A nata de cimento é um material que protege os cabos de protensão da corrosão.

- Bombas de injeção: As bombas de injeção são utilizadas para injetar a nata de cimento nas bainhas metálicas. Elas devem ser capazes de fornecer uma vazão de injeção adequada para garantir que a nata de cimento seja distribuída uniformemente ao longo das bainhas
- Manômetros: Os manômetros são utilizados para medir a pressão da nata de cimento. Eles são essenciais para garantir que a pressão de injeção seja adequada para garantir a segurança da estrutura.
- Além dessas ferramentas e equipamentos, também são necessários outros materiais, como:
- Cabo de protensão: É um elemento estrutural composto por fios ou cordões de aço, que são submetidos a um processo de tensionamento antes da concretagem.
- Bainha metálica: É uma capa protetora que envolve o cabo de protensão.
- Ancoragem: É um dispositivo que fixa o cabo de protensão à estrutura.

A escolha das ferramentas e equipamentos adequados para cada obra é de fundamental importância para garantir a qualidade e a segurança da estrutura protendida.

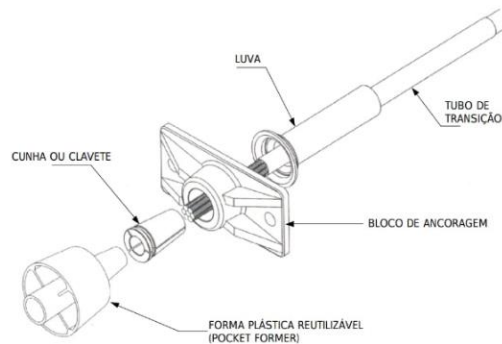


Figura 9 – Detalhamento das peças da ancoragem ativa. Fonte: <https://www.escolaengenharia.com.br/laje-protendida/>

Material e Métodos

Laje Lisa Protendida

Existem três tipos principais de lajes em concreto protendido:

Laje nervurada: Este tipo é muito semelhante à laje nervurada de concreto armado, com a diferença do tipo de armação e espessura de cobrimento mais elevado, que é exigido em todos os elementos protendidos para garantir a proteção da armadura. É mais leve que a laje maciça e é ideal para coberturas de grandes vãos, pois permite uma economia significativa de concreto.

Laje pré-Moldada: Este modelo vem se tornando cada vez mais comum nas obras, pois agiliza a execução, libera espaço no canteiro de obras e reduz o desperdício de materiais. É ideal para projetos que exigem rapidez na execução, como edifícios comerciais e residenciais.

Laje maciça: Este tipo de laje possui uma espessura constante em toda a sua extensão. É o modelo mais utilizado devido à sua agilidade e facilidade de execução. É ideal para estruturas que necessitam de resistência uniforme em toda a sua extensão.

A “laje lisa” ou laje sem vigas é um conceito de design estrutural que envolve a remoção de parte das vigas que compõem o pavimento. Este tipo de laje é comumente utilizado em edifícios de múltiplos pavimentos, onde as vigas do contorno do edifício e as vigas próximas à escada, elevadores e áreas de circulação comum são geralmente mantidas. A decisão de usar ou

não essas vigas são determinadas pelo projetista. Na ausência de vigas, as lajes são projetadas para transmitir seu carregamento diretamente aos pilares. Isso pode exigir o uso de armaduras de punção para aumentar a resistência da laje, calculadas com base na área de influência de cada pilar. A laje maciça lisa foi escolhida para que a comparação fosse mais coerente, pois possui todos os aspectos que os outros tipos de lajes também têm. Ela é mais esbelta, estruturalmente excelente, vence grandes vãos e oferece os melhores layouts, possibilitando arquiteturas esteticamente melhores. É muito utilizada em edifícios, reduz o pé direito e o peso da estrutura. O cálculo de lajes planas protendidas segue os mesmos passos, independentemente do processo escolhido, o cálculo se desenvolve da seguinte forma:

Tabela 1 – Sequência de Cálculo

Sequência de Cálculo	
1	Escolha da opção com ou sem aderência.
2	Distribuição dos pilares e escolha da espessura da laje em função do vão, do cobrimento e da resistência ao fogo desejados.
3	Fixação das características dos materiais a serem empregados.
4	Determinação das cargas.
5	Cálculo dos esforços solicitantes.
6	Escolha da protensão, isto é, da carga a ser “balanceada”, e arranjo dos cabos.
7	Cálculo dos momentos secundários devidos à protensão.
8	Verificação do ELU para a flexão com o dimensionamento da armadura passiva necessária.
9	Verificação do ELU para o puncionamento.
10	Verificação dos Estados Limites de Utilização (limitação das fissuras, deformações lineares, vibração, resistência ao fogo).
11	Detalhamento da armadura passiva mínima.

Fonte: Rudloff, 2009.

A NBR 6118:2023 estabelece alguns critérios para o projeto de estruturas em concreto protendido, como a classe de agressividade ambiental, o domínio de deformação, o cobrimento, o nível e o tipo de protensão, entre outros.

Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

Fonte: NBR 6118:2023



Abordando o tema da agressividade, a durabilidade das estruturas é fortemente influenciada pelas características do concreto e pela qualidade do seu revestimento. Ensaios devem estabelecer parâmetros mínimos de durabilidade, podendo adotar os requisitos das tabelas 2.1 e 2.2 na ausência destes.

Tabela 2.1 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118:2023

Tabela 2.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Revestimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga ^b /pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Revestimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O revestimento da armadura passiva deve respeitar os revestimentos para concreto armado.
^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um revestimento nominal ≥ 15 mm.
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os revestimentos da classe de agressividade IV.
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter revestimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118:2023

Tabela 3 – Sequência construtiva da laje protendida

1. Montagem das fôrmas que irão suportar a laje antes da protensão.	7. Concretagem e cura do concreto.
2. Instalação das ancoragens.	8. Retirada das fôrmas verticais de borda.
3. Colocação da armadura passiva inferior e de punção.	9. Protensão dos cabos segundo o plano de protensão definido no projeto, com a obtenção dos alongamentos que serão comparados com os de projeto.
4. Distribuição dos cabos de protensão em planta.	10. Retirada gradativa das fôrmas.
5. Fixação dos cabos em elevação sobre os suportes (cadeirinhas), conforme projeto.	11. Corte das pontas, proteção das ancoragens e fechamento (grauteamento) dos nichos, obedecendo à técnica específica (7).
6. Colocação da armadura passiva superior.	12. Injeção dos cabos, se forem aderentes.

Fonte: Rudloff, 2009.

A espessura da laje é influenciada por fatores como o ELU de flexão e o puncionamento. Porém, para definir valores práticos, pode-se seguir as seguintes determinações:

- $L/h \leq 48$, para lajes de cobertura.
- $L/h \leq 40$, para lajes de piso.

Para RUDLOFF, (2019), a espessura das lajes protendidas lisas não deve ser inferior a 16 cm. Esbeltez (L/h) superior a 40 exige comprovação da segurança em relação aos estados limites de utilização, de deformações e vibrações excessivas

Segundo a NBR 6118:2023, a distância máxima entre cordoalhas, cabos ou feixes de cabos não deve ultrapassar 6 h e não deve exceder 120 cm. Os cabos localizados na faixa externa de apoio devem ser contidos em uma parte da laje cuja largura não exceda a dimensão do pilar de apoio mais 3,5 vezes a espessura da laje em cada lado do pilar. É necessário manter uma distância mínima de 5 cm entre cabos ou feixes de cabos, ou entre cabos e armaduras passivas. O cobrimento mínimo de cabos em relação à face das aberturas nas lajes deve ser de 7,5 cm. No mínimo quatro barras devem ser dispostas na face tracionada sobre os apoios das lajes lisas ou cogumelo protendidas, em uma faixa que não exceda a largura do apoio mais 1,5 vez a altura total da laje para cada lado. As armaduras para resistir à punção devem ser formadas por estribos verticais ou conectores (studs), com preferência para o uso destes últimos. O diâmetro da armadura de estribos não pode ser maior que $h/20$ da laje e as barras longitudinais devem estar em contato mecânico com os cantos dos estribos. A agressividade ambiental, que se refere às ações físicas e químicas que impactam as estruturas de concreto, deve ser classificada e avaliada de acordo com a Tabela 6.1, da NBR 6118:2023, e as condições de exposição da estrutura. O responsável pelo projeto estrutural pode considerar uma classificação mais agressiva, baseando-se nos dados do ambiente onde a estrutura será construída.

Conforme Rudloff, (2009) a concentração de cabos nas faixas dos pilares é uma prática comum e eficaz, permitindo flexibilidade para eventuais aberturas na laje. A colocação dos cabos deve seguir uma ordem rigorosa, especialmente nos cruzamentos, e os cabos devem ser fixados em alinhamentos suaves e perpendiculares às suas ancoragens por pelo menos 50 cm. Os valores da figura 10 podem ser adotados para as tolerâncias na colocação.

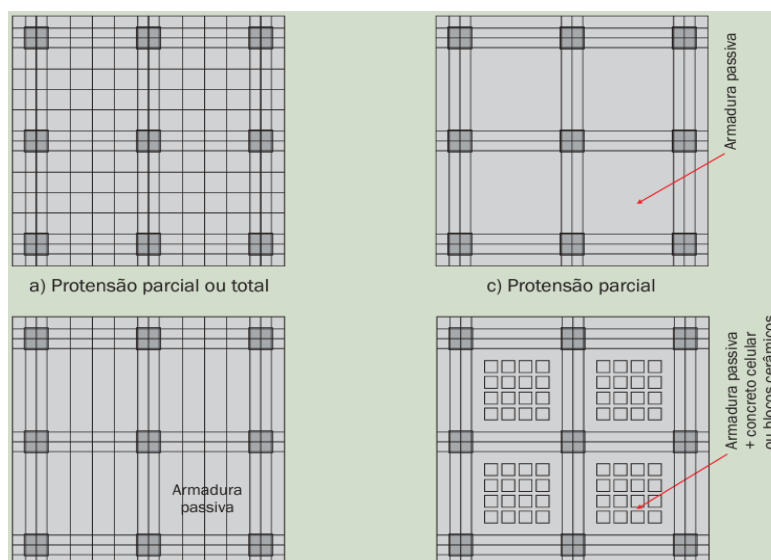


Figura 10 - Fonte: Rudloff, 2009.

Em cabos não aderentes, a força de protensão é transferida ao concreto apenas através das ancoragens, que devem ter proteção especial contra a corrosão para garantir a durabilidade da laje. A sequência de lançamento dos cabos deve ser definida previamente para evitar a “costura” de cabos na obra. As formas devem ter uma faixa adicional de 50 cm de largura ao

longo das bordas que contêm as ancoragens ativas, com capacidade de 2 kN/m para a operação de protensão. Os cabos devem se estender pelo menos 80 cm além de suas ancoragens.

Tabela 4 – Tolerância na colocação dos cabos

Espessura da laje	Tolerâncias	
	vertical	horizontal
$h \leq 200 \text{ mm}$	$\pm h / 40$	$\pm 20 \text{ mm}$
$h > 200 \text{ mm}$	$\pm 5 \text{ mm}$	$\pm 20 \text{ mm}$

Fonte: Rudloff, 2009.

A aplicação da força de protensão ocorre em duas etapas após a concretagem. Pode-se aplicar 50% da força de protensão a partir do quarto dia após a concretagem, liberando o escoramento e as formas, mas mantendo pontaletes nos terços dos vãos. Os 50% finais podem ser aplicados a partir do oitavo dia após a concretagem. A laje deve permanecer escorada se tiver que suportar carga durante a execução da laje subsequente. Essas práticas estão alinhadas com as diretrizes da NBR 6118:2023 e contribuem para a segurança e eficiência das estruturas de concreto protendido.

Laje Maciça de Concreto Armado

A NBR 6118:2023, estabelece que elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência. Isso significa que a integridade estrutural desses elementos depende da interação entre o concreto e a armadura.

“Laje maciça é aquela onde toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiada em vigas ou paredes ao longo das bordas. Laje com borda ou bordas livres é um caso particular de laje apoiada nas bordas.”
(BASTOS, 2015)

Segundo ARAÚJO (2003), as lajes maciças são placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou alvenarias. Este é o tipo de laje predominante nos edifícios residenciais, onde os vãos são relativamente pequenos. A principal função das lajes é receber os carregamentos atuantes no andar, provenientes do uso da construção (pessoas, móveis e equipamentos), e transferi-los para os apoios.

Segundo Barros e Melhado (2006), as etapas incluem a montagem das formas de vigas e lajes, montagem da armadura de vigas e lajes, concretagem de vigas e lajes, e desforma.

Antes da liberação das formas e do posicionamento das armaduras, é necessário verificar o posicionamento das fôrmas, incluindo o encontro viga/pilar, o posicionamento das escoras das vigas, laterais das vigas e escoras das lajes, bem como a distribuição de travessões e longarinas de apoio da laje e de painéis. Após a verificação de todos esses elementos, é feita uma limpeza geral da forma, e aplicado o desmoldante quando for utilizado.

As armaduras, que devem estar previamente cortadas e pré-montadas, são posicionadas nas formas após a liberação das mesmas. Antes de colocar a armadura da viga na forma, deve-se colocar as pastilhas de cobrimento. Também é importante posicionar a armadura de encontro

viga-pilar (amarração) quando especificada em projeto e marcar as posições das armaduras nas lajes. Uma vez executada a armadura, deve-se proceder o controle de recebimento para liberação da laje para a concretagem.

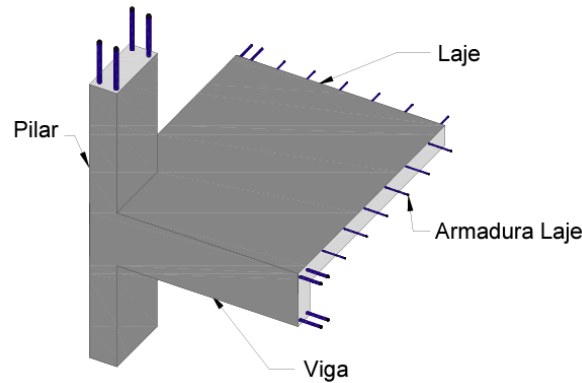


Figura 11 - Fonte: Spohr (2008)

Além disso, é importante notar que a escolha do tipo de laje depende de vários fatores, incluindo as cargas aplicadas, as condições de apoio e os requisitos arquitetônicos. As lajes maciças são frequentemente usadas quando se deseja uma superfície de piso contínua sem vigas salientes. No entanto, em vãos maiores, pode ser mais econômico usar lajes nervuradas ou lajes lisas. As lajes maciças de concreto, que possuem espessuras que normalmente variam de 7 cm a 15 cm, são projetadas para uma ampla gama de construções. Elas são comumente usadas em edifícios de múltiplos pavimentos, sejam eles residenciais ou comerciais, em muros de arrimo, escadas e reservatórios.

Tabela 5 – Espessuras mínimas de lajes maciças

ESPESSURA	TIPO
7 cm	Cobertura não em balanço
8 cm	Lajes de piso não em balanço
10 cm	Lajes em balanço
10 cm	Lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN
12 cm	Lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN
15 cm	Lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de $\ell/42$ para lajes de piso biapoiadas e $\ell/50$ para lajes de piso contínuas

Fonte: NBR 6118:2023

Essa laje apresenta benefícios significativos em termos de custo e facilidade de construção, tornando-as uma opção preferencial para esses tipos de projetos. Portanto, embora as lajes maciças de concreto sejam extremamente versáteis e amplamente utilizadas em muitos contextos, elas não são a solução ideal para todas as situações. Ela é valorizada por ser menos sensível a erros de projeto ou construção devido à uma menor complexidade de projeto, contudo, apesar de ser uma alternativa de muito utilizada por sua concepção simplificada, ainda é essencial um projeto e execução cuidadosos para garantir a segurança e eficácia da estrutura.

Resultados e Discussão

Comparativo e vantagens e desvantagens entre laje lisa e maciça

Considerando a utilização de lajes de concreto protendido em projetos arquitetônicos que exijam grandes vãos sem apoio, a protensão oferece uma série de vantagens significativas. Isso porque oferece a possibilidade de criar espaços mais amplos, pois o concreto protendido é capaz de vencer grandes vãos que o concreto armado não conseguiria, permitindo uma maior flexibilidade no design do espaço. Conforme tabela abaixo:

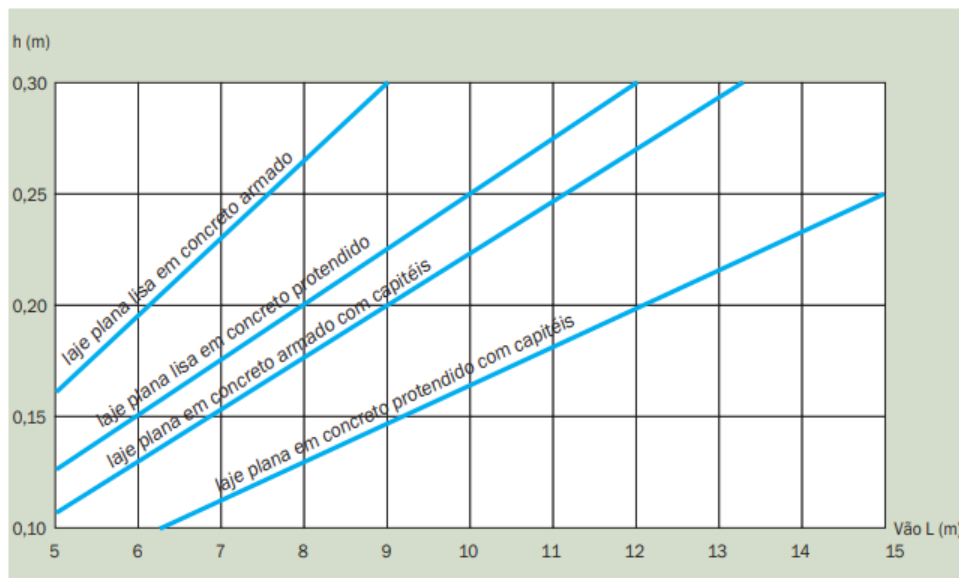
Tabela 6 – Espessuras de lajes lisas protendidas com cordoalha engraxada

VÃO LIVRE ENTRE APOIOS (m)	ESPESSURA MÍNIMA (cm)
Até 7,0	16
de 7,0 até 8,0	18
de 8,0 até 9,0	20
de 9,0 até 10,0	22
de 10,0 até 11,0	24
Faixa Econômica: 7,0 a 9,0 metros (h: 18 a 20cm)	

Fonte: Emerick (2002)

O gráfico a seguir compara os diferentes tipos de laje.

Gráfico 1 – Comparativo entre lajes em concreto armado e protendido.



Fonte: Rudloff, 2009.

Podemos exemplificar com as figuras 12 e 13, um pouco das vantagens relatadas anteriormente, quando comparadas com as figuras 14 e 15 a seguir.

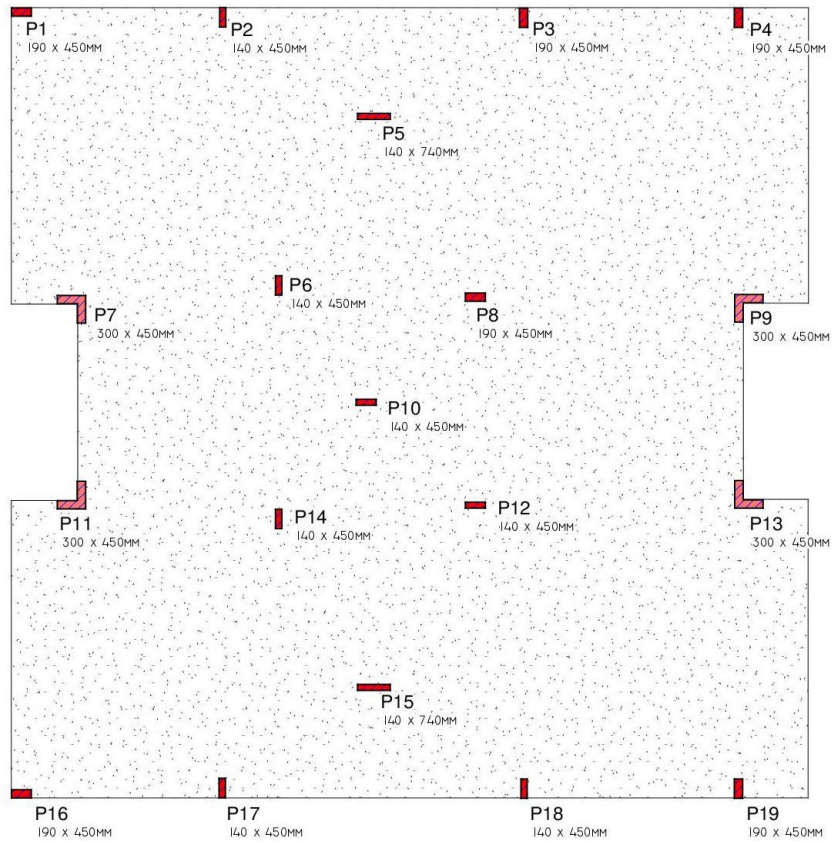


Figura 12 – Planta, laje lisa protendida - Fonte: Os próprios autores

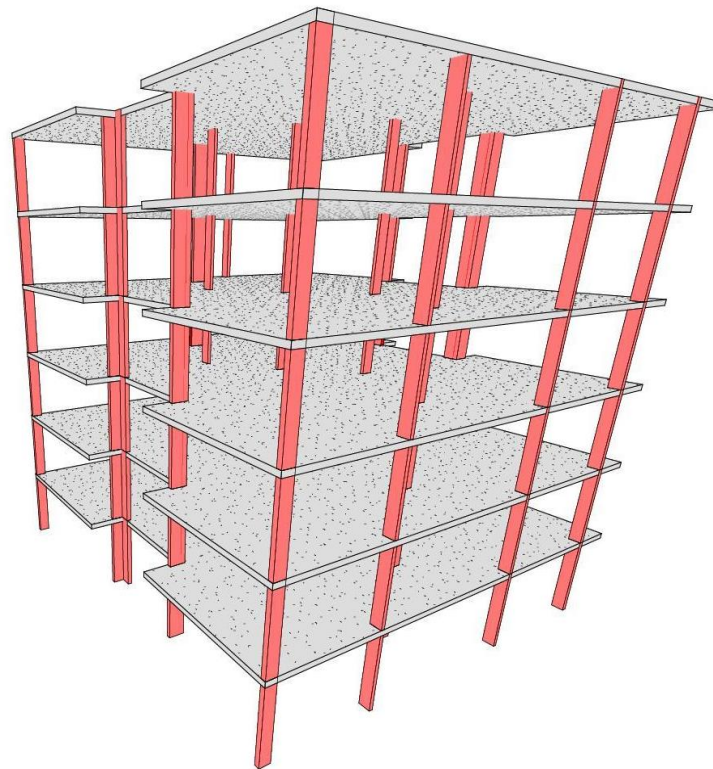


Figura 13 – Projeto estrutural, laje lisa protendida - Fonte: Os próprios autores

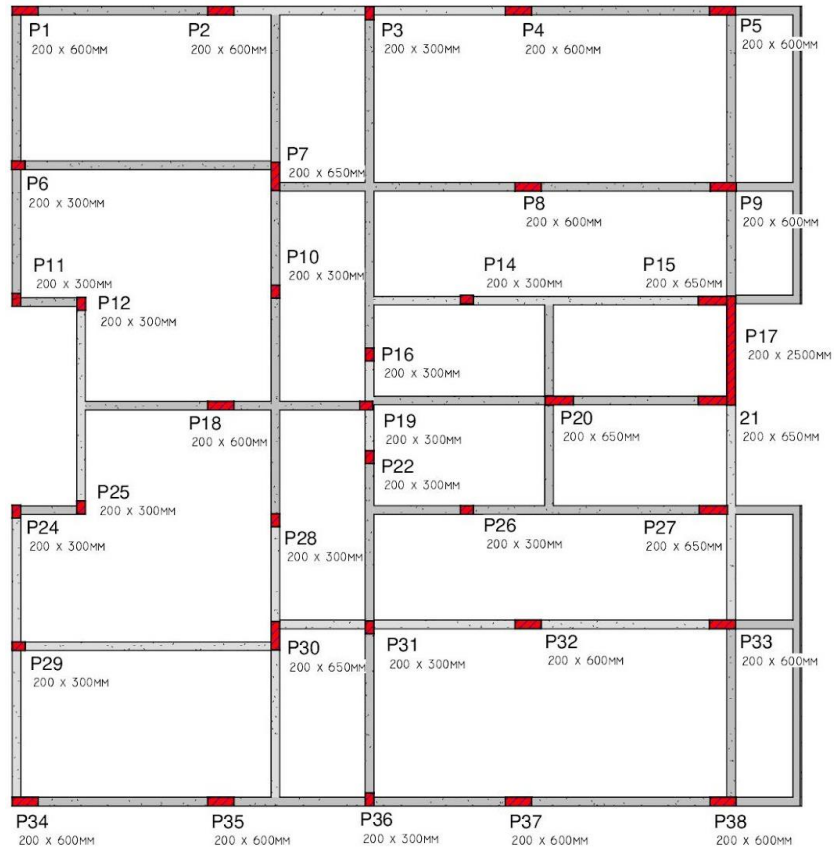


Figura 14 – Planta, laje maciça concreto armado - Fonte: Os próprios autores

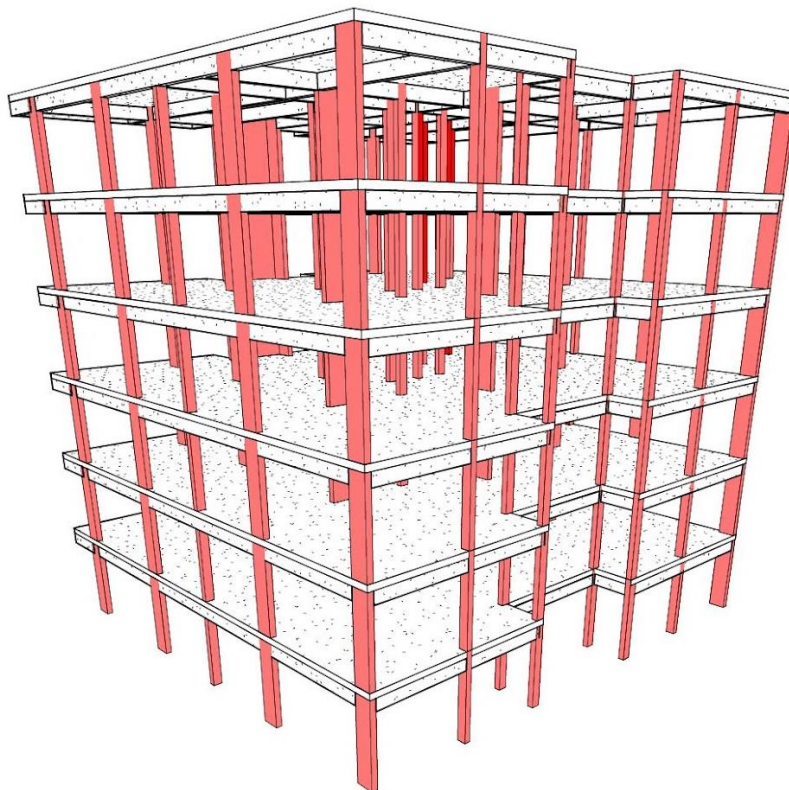


Figura 15 – Projeto estrutural, laje maciça concreto armado - Fonte: Os próprios autores

Nos desenhos apresentados anteriormente, podemos claramente observar a quantidade elevada de pilares necessários para a construção com lajes maciças em comparação a construção utilizando a laje protendida.

Segundo Emerick (2002), ao avaliar a viabilidade de diferentes tipos de lajes, como a laje lisa, é crucial considerar não apenas o custo dos materiais, mas também outros fatores importantes como tempo de execução, reaproveitamento de formas e aparência final da estrutura. Essa abordagem holística garante uma análise mais precisa e eficaz, permitindo a escolha da solução mais econômica e eficiente para cada projeto específico

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens

	Concreto Armado	Concreto Protendido
Vantagens	1 - Mais simples de projetar e construir	1 - Maior durabilidade devido à redução da fissuração
	2 - Menor custo inicial de materiais	2 - Menores deslocamentos finais (flechas), garantindo acabamentos de melhor qualidade
	3 - Menos sensível a erros de projeto ou construção	3 - Possibilidade de utilizar aços especiais sem que a peça seja condenada por fissuração excessiva
		4 - Propicia seções mais esbeltas, vãos maiores e estruturas mais leves
		5 - Reduz a força cortante e a tensão principal de tração, propiciando menor quantidade de estribos
		6 - Equilibra grande parte do carregamento aplicado à estrutura, podendo ser encarada como uma prova de carga para a peça protendida
		7 - Maior resistência à fadiga
	Concreto Armado	Concreto Protendido
Desvantagens	1 - Menor durabilidade devido à maior susceptibilidade à fissuração	1 - Nas peças protendidas em que a armadura ativa não está protegida por bainhas, o efeito da corrosão pode ser danoso para a segurança da estrutura
	2 - Maiores deslocamentos finais (flechas)	2 - Erros de projeto ou de construção podem resultar em ruínas das estruturas
	3 - Limitações na utilização de aços especiais devido à possibilidade de fissuração excessiva	
	4 - Seções menos esbeltas e vãos menores	
	5 - Maior força cortante e tensão principal de tração	
	6 - Menor resistência à fadiga.	

Fonte: CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. Concreto Protendido: Teoria e Prática. (2018).

Além disso, a utilização de lajes lisas proporciona uma maior liberdade no projeto arquitetônico. A maior distância entre os pilares permite a criação de layouts mais abertos e

versáteis, facilitando a adaptação do espaço às necessidades específicas do projeto. Isso também permite uma vasta variação de formatos arquitetônicos, incluindo contornos curvos, lajes em L, balanços, entre outros.

Nas execuções dos dois sistemas construtivos, o sistema em concreto protendido leva vantagem quanto a velocidade da execução, devido à ausência de vigas, há menos armações e formas, mesmo que a colocação de cordoalhas para o sistema protendido seja um processo mais técnico e requeira profissionais mais qualificados, esse sistema apresentou vantagens quanto ao número de escoras e uma obra mais limpa. Portanto, a laje lisa oferece uma solução eficiente para o design estrutural, permitindo maior flexibilidade no layout do edifício e reduzindo potencialmente os custos de construção em grandes edificações. Esses conceitos estão alinhados com as diretrizes da NBR 6118:2023.

Comparativo do consumo dos principais materiais:

Para efeito de comparação, será utilizado um edifício de 6 pavimentos, totalizando 1.704m² de área construída. A espessura considerada para de cada tipo de laje, foi de 15 cm para laje maciça de concreto armado e 16 cm para laje de concreto protendido, com base na NBR 6118:2023.

Tabela 8 – Concreto protendido (Consumo aproximado)

COMPOSIÇÕES	UN	LAJE LISA QUANTIDADE	TOTAL
Concreto	Laje	m ³ 272,64	
	Pilares	m ³ 84,36	357
	Vigas	m ³ 0,00	
Forma, desforma e escoramento	m ²	852,00	852,00
Aço CA-50 e CA-60 De acordo com Botelho (2004), a média de aço por m ³ é de 100kg	Laje	Kg 27264,00	
	Pilares	Kg 8436,00	35700,00
	Vigas	Kg 0,00	
Cordoalha engraxada CP - 190 - RB 12,7mm	Laje	Kg 5452,80	5452,80

Fonte: Os próprios autores

Tabela 9 – Concreto armado (Consumo aproximado)

COMPOSIÇÕES	UN	LAJE MACIÇA QUANTIDADE	TOTAL
Concreto	Laje	m ³ 255,60	
	Pilares	m ³ 91,20	446,57
	Vigas	m ³ 99,77	
Forma, desforma e escoramento	m ²	1136,00	1136,00
Aço CA-50 e CA-60 De acordo com Botelho (2004), a média de aço por m ³ é de 100kg	Laje	Kg 25560,00	
	Pilares	Kg 9120,00	44657,00
	Vigas	Kg 9977,00	

Fonte: Os próprios autores

Segundo Botelho (2004), em média para cada metro cúbico de concreto devemos usar 100kg de aço. A construção utilizando laje em concreto protendido é cerca de 8% mais leve do que a que utiliza concreto armado, de acordo com as tabelas estimativas utilizadas como referência. É importante ressaltar que é desafiador obter valores precisos, uma vez que cada projeto possui suas próprias características únicas. Para se obter valores reais, é preciso fazer todos os cálculos estruturais utilizando todos os requisitos informados ao longo deste artigo

As lajes lisas também contribuem para uma estrutura mais leve. Como as lajes são esbeltas, elas reduzem o peso total da estrutura. Isso pode resultar em economia de materiais e custos, além de facilitar o processo de construção. Além disso, as lajes lisas apresentam um alto grau de resistência a trincas e fissuras. Outro benefício das lajes lisas é o alto desempenho estrutural e o maior isolamento térmico e acústico. Além disso, elas têm um alto apelo estético, o que pode melhorar ainda mais a aparência geral do projeto arquitetônico. Por fim, a utilização de lajes de concreto protendido permite um maior controle tecnológico da obra. Isso se traduz em uma redução de deformações e fissurações na estrutura, garantindo uma maior durabilidade e menor necessidade de manutenção ao longo do tempo. Portanto, as lajes de concreto protendido representam uma opção eficiente e econômica para projetos arquitetônicos modernos.

Desvantagens da laje lisa protendida e laje maciça concreto armado

Apesar das vantagens apresentadas, deve-se considerar algumas desvantagens na construção de lajes lisas protendidas, pois requer mão de obra com conhecimento especializado em protensão. Isso inclui a compreensão de como aplicar a tensão correta, como ancorar adequadamente a armadura e como verificar a qualidade da protensão. Além disso, a equipe de construção deve ser capaz de interpretar corretamente os desenhos de projeto e implementá-los com precisão. A falta de mão de obra especializada pode levar a erros na construção, o que pode comprometer a segurança e a eficácia da laje protendida. As lajes lisas protendidas tendem a ser mais caras do que as lajes de concreto armado convencionais. Isso se deve em parte à necessidade de mão de obra especializada e equipamentos especiais mencionados anteriormente. Além disso, o custo dos materiais, como as cordoalhas de aço de alta resistência usadas na protensão, também pode ser maior. Embora as lajes protendidas possam oferecer benefícios a longo prazo, como maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, o custo inicial mais alto pode ser um fator limitante para alguns projetos.

Embora as lajes maciças de concreto armado sejam comumente utilizadas na construção civil, elas apresentam várias desvantagens. A maior susceptibilidade à fissuração pode resultar em menor durabilidade, pois as fissuras permitem a entrada de agentes corrosivos que deterioram o concreto e a armadura de aço. Além disso, essas lajes tendem a apresentar maiores deslocamentos finais, conhecidos como flechas, que podem causar problemas estéticos e funcionais. A utilização de aços especiais pode ser limitada devido à possibilidade de fissuração excessiva, restringindo a capacidade da estrutura de suportar cargas elevadas. As lajes maciças de concreto armado também tendem a ter seções menos esbeltas e vãos menores, limitando as opções de design e a flexibilidade do espaço interior. Elas também podem estar sujeitas a uma maior força cortante e tensão principal de tração, exigindo reforço adicional e aumentando a complexidade e o custo da construção. Por fim, essas lajes têm uma resistência à fadiga menor, o que significa que podem ser menos capazes de resistir a cargas repetitivas ao longo do tempo, levando a uma deterioração mais rápida. Portanto, é importante considerar essas desvantagens ao escolher o tipo de laje a ser utilizado em um projeto de construção.

Conclusões

Compreender a escolha entre a laje maciça de concreto armado e a laje lisa de concreto protendido é fundamental para qualquer projeto de construção. Cada tipo de laje tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha do tipo apropriado deve ser baseada nas necessidades específicas do projeto. A laje maciça de concreto armado é frequentemente escolhida para projetos menos complexos devido à sua simplicidade de projeto e construção, e

ao menor custo inicial de materiais. No entanto, sua durabilidade pode ser comprometida pela maior susceptibilidade à fissuração, e suas limitações na utilização de aços especiais podem restringir sua aplicação em alguns projetos. Por outro lado, a laje lisa de concreto protendido, embora possa ser mais complexa e cara inicialmente, oferece vantagens significativas em termos de durabilidade, desempenho e flexibilidade de design. Sua capacidade de reduzir a fissuração, permitir a utilização de aços especiais, e proporcionar seções mais esbeltas e vãos maiores, torna-a uma escolha atraente para projetos mais ambiciosos. No entanto, é crucial garantir que a armadura ativa esteja adequadamente protegida para evitar a corrosão, e que o projeto e a construção sejam realizados com precisão para evitar falhas estruturais. A indústria da construção civil enfrenta desafios na obtenção de mão de obra qualificada, especialmente em áreas que exigem maior especialização, como o concreto protendido. A especialização nesta técnica avançada, que aumenta a resistência do concreto à tensão, abre uma grande oportunidade de mercado. Apesar da complexidade e da constante evolução da técnica, a demanda por profissionais qualificados é alta, oferecendo a chance de se destacar na indústria da construção civil. Em resumo, a escolha entre a laje maciça de concreto e a lisa de concreto protendido deve ser baseada nas necessidades específicas do projeto, levando em consideração fatores como custo, complexidade, desempenho e durabilidade. E os custos deverão ser analisados de forma global, no qual traz um equilíbrio de custos maior entre os dois tipos de estrutura. Isso significa que, além dos custos iniciais de materiais e construção, também devem ser considerados os custos de manutenção a longo prazo, a vida útil da estrutura e o valor que ela adiciona ao projeto como um todo. Portanto, embora um tipo de laje possa parecer mais caro inicialmente, ele pode acabar sendo mais econômico a longo prazo quando todos os fatores são considerados. Finalmente, é importante lembrar que a construção é um campo em constante evolução, com novas técnicas e materiais sendo desenvolvidos regularmente. Portanto, é essencial manter-se atualizado sobre as últimas tendências e inovações para garantir que você esteja fazendo as melhores escolhas para o seu projeto. Seja qual for o tipo de laje escolhida para o projeto, lembre-se de que a chave para um projeto bem-sucedido é um planejamento cuidadoso, uma execução precisa e uma manutenção adequada. Com esses elementos em mente, você estará bem preparado para enfrentar qualquer desafio que seu projeto possa apresentar.

Referências Bibliográficas

ABNT. (2023). NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Disponível em: <https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=SWwyM3RFZUQyUzRUSTJSRTNacktBTTdXbmdPQzNGNIIPbEk5d3VneERvaz0=&Req=>. Acesso em: 15 nov. 2023.

Almeida Filho, Fernando M. (2002). **Estruturas de Pisos de Edifícios com a Utilização de Cordoalhas Engraxadas**. Universidade de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26052006-153328/publico/2002ME_FernandoMAAlmeidaFilho.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

Araújo, J. M. (2003). **Curso de Concreto Armado** - Volume 1. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Curso_de_Concreto_Armado_Volume_1.html?hl=pt-PT&id=ZdfVpM17i_AC&redir_esc=y. Acesso em: 15 nov. 2023.

Bastos, P. (2021). **Fundamentos de Concreto Protendido**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Disponível em:

<https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/Protendido/Ap.%20Protendido.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

Bastos, P. (2015). **Flexão Simples - Vigas**. Disponível em:
https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Paulo%20Bastos_FlexaoSimples_Vigas_2015.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

Barros, M. M. S. B.; Melhado, S. B. (2006). **Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Versão Ampliada e atualizada em 2006: Mércia Maria S. Bottura de Barros e Viviane: Tecnologia da Construção de Edifícios I. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5075606/mod_resource/content/1/Apostila_Producao_estruturas.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

BOTELHO, M. H. C. Concreto armado, eu te amo, v.II. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.com.br/alfonso/magic.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

Cholfé, L., & Bonilha, L. (2018). **Concreto Protendido: Teoria e Prática**.

EMERICK, A. A. (2002). **Projeto e execução de lajes protendidas**. Disponível em:
http://www.deecc.ufc.br/Download/TB812_Estruturas%20de%20Concreto%20Protendido/LP.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

Hanai, J. B. (2005). **Fundamentos do Concreto Protendido**. Universidade de São Paulo. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2255776/mod_resource/content/1/Fundamentos%20do%20Concreto%20Protendido%20-%20J%20B%20Hanai.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

Pfeil, Walter. (1984). **Concreto Protendido (Vol. 1)**. Disponível em:
https://www.academia.edu/36747669/Pfeil_Concreto_Protendido_Vol1. Acesso em: 15 nov. 2023.

RUDLOFF. (2009). **Lajes Planas Protendidas**. Disponível em:
https://www.rudloff.com.br/downloads/publicacao1_lajes_planas_protendidas.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.