CENTRO UNIVERSITÁRIO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
UNIPAC BARBACENA
ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA DOUMITH OLIVEIRA SOBRINHO PAES FIGUEIREDO
PRICILA MIRANDA BECHO RETTORE

ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO E EM CONCRETO PROTENDIDO

BARBACENA
2020

BÁRBARA DOUMITH OLIVEIRA SOBRINHO PAES FIGUEIREDO
PRICILA MIRANDA BECHO RETTORE

ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO E EM CONCRETO PROTENDIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Me. Elvys Dias Reis.

BARBACENA
2020

AGRADECIMENTOS

É chegado ao fim um ciclo de muitas risadas, choro, felicidade e frustrações. Sendo assim, dedicamos este trabalho a todos que fizeram parte desta etapa das nossas vidas.

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, que nos deu saúde e forças para superar todos os momentos difíceis que nos deparamos ao longo da nossa graduação.

Aos nossos pais, Marcelo e Jalile, Mauro e Andréa, por serem essenciais nas nossas vidas e a toda nossa família, amigos, e ao Samyr e Tiago, por incentivarem a sermos pessoas melhores e não desistirmos dos nossos sonhos.

Ao Maurinho, Renata e Enzo por estarem sempre ajudando e apoiando para realização deste sonho, e a Vó Délia por sempre amparar com um abraço de mãe nas horas difíceis.

Ao nosso orientador Elvys, por todo apoio e paciência ao longo da elaboração do nosso projeto final. Também gostaríamos de deixar um agradecimento especial às empresas ICM Engenharia e Projetos e a Construtora Cobalto por possibilitarem a execução deste trabalho de conclusão de curso, por todo apoio e incentivo.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, acompanhado pela confiança no mérito e ética aqui presentes.

Agradecemos a todos os professores por nos proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por terem nos feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os nossos eternos agradecimentos.

“Deus nunca disse que a jornada seria fácil, mas
Ele disse que a chegada valeria a pena. ” (Max Lucado)

RESUMO

A construção civil tem exigido cada vez mais o desenvolvimento de novas tecnologias. O sistema de laje de concreto protendido é um exemplo já usado mundialmente e que vem tomando espaço no Brasil, por ser capaz de vencer grandes vãos, diminuindo o emprego de grandes seções de vigas e pilares. Neste cenário, este trabalho traz uma análise comparativa da aplicação e custos orçamentários do concreto armado convencional e protendido em lajes maciças, no intuito de verificar qual sistema estrutural apresenta-se mais vantajoso e qual mantem a fachada do edifício mais harmônica com o seu projeto arquitetônico. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica que detalha o histórico e as definições destes sistemas estruturais, as diretrizes normativas, as vantagens e desvantagens, os métodos de análise, as etapas do processo construtivo e os estudos atuais em campo de pesquisa similar. Realizou-se ainda um estudo de caso, tomando como objeto uma edificação comercial existente e executada em concreto protendido, e para esse trabalho foi elaborada uma modelagem numérica no *software* CypeCad v.2016, porém empregando-se o sistema estrutural em concreto armado convencional. Os resultados da análise mostraram que o concreto armado é mais conveniente em lajes maciças de pequenos espaços entre pilares, mas que no uso de vãos maiores a utilização do concreto protendido torna-se mais atrativa. Além disso, o uso do concreto armado em balanços com grandes vãos pode não ficar harmônico com a concepção arquitetônica, o que não acontece quando se utiliza o concreto protendido. Quantitativamente, os dados obtidos indicaram que a utilização do concreto armado nesta edificação seria mais vantajosa. Dentre outros aspectos, este estudo revela parâmetros a serem analisados para a escolha do sistema estrutural de uma obra e ressalta a importância do controle de qualidade no uso do concreto, além de mão de obra e equipamentos específicos para uso do concreto protendido.

Palavras-chave: Concreto armado. Concreto protendido. Sistema estrutural. Lajes.

ABSTRACT

Civil construction has increasingly demanded the development of new technologies. The prestressed concrete slab system is an example already used worldwide and that has been taking space in Brazil, for being able to overcome large spans, decreasing the use of large sections of beams and pillars. In this scenario, this work brings a comparative analysis of the application and budget costs of conventional reinforced concrete and prestressed slabs, to verify which structural system presents itself as the most advantageous and which keeps the facade of the building more harmonious with its architectural project. For this, a bibliographic review was made that details the history and definitions of these structural systems, the normative guidelines, the advantages and disadvantages, the methods of analysis, the stages of the constructive process and the current studies in a similar research field. A case study was also carried out, taking as its object an existing commercial building and executed in prestressed concrete, through its numerical modeling in the software CypeCad v.2016, but using the structural system in conventional reinforced concrete. The results of the analysis showed that reinforced concrete is more convenient in massive slabs of small spaces between pillars, but that in the use of larger spans the use of prestressed concrete becomes more attractive. Besides, the use of reinforced concrete in overhangs with large spans may not be in harmony with the architectural concept, which does not happen when using prestressed concrete. Quantitatively, the data obtained indicated that the use of reinforced concrete in this building would be more advantageous. Among other aspects, this study reveals parameters to be analyzed for the choice of the structural system of a work and highlights the importance of quality control in the use of concrete, in addition to labor and specific equipment for the use of prestressed concrete.

Keywords: Reinforced concrete. Prestressed concrete. Structural system. Slabs.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 6

2 DESENVOLVIMENTO 7
2.1 Revisão de literatura 7
2.1.1 Histórico do uso de concreto armado e concreto protendido..... 7
2.1.2 Concreto armado 9
2.1.3 Concreto protendido 10
2.1.4 Vantagens e Desvantagens 13
2.2 Estudo de caso 14
2.2.1 Descrição do Edifício 14
2.2.2 Projeto e execução 14
2.2.3 Modelagem numérica do edifício 18
2.2.3.1 Concepção estrutural 18
2.2.3.2 Materiais utilizados 20
2.2.3.3 Resultados 22
2.2.4 Estudo comparativo de custos 29

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 31

REFERÊNCIAS 32

1 INTRODUÇÃO

Considerando a crescente utilização do concreto protendido nos últimos anos e suas vantagens quando comparado com o concreto armado, como o menor consumo de aço e a possibilidade de vencer grandes vãos, este trabalho se justifica pela importância de estimular o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas. Além de evidenciar as vantagens técnicas, esta pesquisa fundamenta-se na necessidade de dar mais visibilidade à utilização de estruturas em concreto protendido, principalmente em termos de custos, quando comparadas com estruturas em concreto armado convencional.

Uma desvantagem relacionada à utilização do concreto protendido é a limitada disponibilidade de mão de obra especializada, pouco difundida nas regiões do interior brasileiro. Ressalta-se que, diante desta problemática, este sistema construtivo torna-se mais oneroso pela falta de equipamentos especializados nessas regiões, ou seja, há um acréscimo de encargos quanto ao transporte dos equipamentos.

Com isso, o engenheiro civil deve considerar as vantagens e desvantagens das opções de sistemas estruturais disponíveis atualmente no mercado, que englobam o custo, prazo, facilidade de execução e qualidade. O concreto protendido deve ser mais divulgado e disseminado na área da construção civil, para que suas vantagens sobressaiam às desvantagens, que são parte da realidade das microrregiões brasileiras, por não ser transmitida a confiança suficiente para combater a cultura radicada da utilização quase unânime do concreto armado convencional.

Dessa maneira, este trabalho tem como objetivo geral apresentar a eficácia da execução de obras em concreto protendido, indicando os seus mecanismos e principais fatores que influenciam sua resistência. Especificamente, pretende-se demonstrar, preconizando o orçamento comparativo com obras de concreto armado, qual deles apresenta melhor custo-benefício. Para isso, será realizada uma revisão de literatura sobre os dois materiais e um estudo comparativo dos custos de uma edificação comercial de dois pavimentos localizada em Santos Dumont – MG, considerando sua execução em concreto armado e em concreto protendido.

Com o escopo de atender aos objetivos, este trabalho foi organizado em capítulos, sendo: o Capítulo 2 composto por uma revisão bibliográfica sobre o histórico do uso do concreto armado e do concreto protendido, bem como suas características, vantagens e desvantagens, e pelo estudo de caso comparando os custos da edificação comercial supracitada; no Capítulo 3 apresentadas as considerações finais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

Para o acompanhamento deste trabalho, faz-se necessário o entendimento de seus pontos cruciais, bem como a inserção do leitor no contexto de dimensionamento e análise estrutural no tocante às lajes de concreto armado e concreto protendido. Portanto, apresentam-se a seguir os históricos e definições correlatos ao tema, as diretrizes normativas, as vantagens e desvantagens, os métodos de análise, os *softwares* usualmente utilizados para modelagem estrutural, as etapas do processo construtivo e os estudos atuais em campo de pesquisa similar.

2.1.1 Histórico do uso de concreto armado e concreto protendido

O concreto armado difundiu-se no Brasil no início do Século XX, sendo patenteado por duas firmas estrangeiras, Sistema Monier e Sistema Hennebique. Em meados da década de 1920, inicia-se o processo de difusão da tecnologia do concreto no Brasil. Após vinte anos, já com o sistema do concreto estabelecido, são desfeitas as patentes e a utilização do concreto passa a ser regida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a prática profissional passa a ser regulamentada pelo Conselho Federal (CONFEA) e Conselhos Regionais de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CREA), e os conteúdos quanto a cálculo estrutural passam a ser requisitos dos cursos de engenharia e arquitetura (SANTOS, 2008)

O sistema de concreto protendido já é bastante comum nos países europeus e norte-americanos, e foi inserido no Brasil por volta de 1948, com a construção da ponte do Galeão, na cidade do Rio de Janeiro. Para essa obra, o projeto e todo o material foram importados da França. Em 1952, a companhia siderúrgica Belgo iniciou a produção do aço de protensão e, dessa forma, a segunda obra no Brasil já foi realizada com aço brasileiro (VERÍSSIMO e CÉSAR JUNIOR, 1998). Com os avanços tecnológicos e os investimentos em pesquisa, essa técnica popularizou-se na década de 90.

Neste sentindo, diante da propagação dos sistemas estruturais de concreto armado e concreto protendido, diversos autores têm desenvolvido trabalhos referentes a este assunto, a fim de aprimorar as pesquisas neste âmbito, e elaborar uma análise comparativa entre esses dois métodos, com o objetivo de demostrar de maneira eficaz qual destes deverá ser utilizado diante da necessidade da obra arquitetônica pré-estabelecida.

No estudo de Barbosa *et al*. (2017), foi realizado um comparativo de vigas de concreto armado e vigas de concreto protendido, buscando a aplicação do concreto protendido em situações de grandes vãos entre pilares, proporcionando vigas de menores seções transversais, e o resultado obtido foi a comprovação da viabilidade da utilização deste modelo de laje no caso estudado.

Na pesquisa de Oliveira *et al*. (2018), foi realizada uma análise comparativa da exequibilidade entre lajes de concreto armado e concreto protendido em edifícios, sendo verificadas suas vantagens e desvantagens. O resultado obtido foi a demonstração da efetividade do uso do concreto protendido no Brasil, devido à sua capacidade de vencer vãos livres de maiores proporções, com a redução da altura dos elementos estruturais.

Na monografia de Silva (2015), foi realizada a equiparação dos gastos econômicos relacionados à execução de lajes em concreto armado e em concreto protendido, buscando a comprovação dos benefícios proporcionados pelo concreto protendido, o qual expressa menor consumo de materiais, obtendo como resultado um menor custo em relação às estruturas com grandes vãos.

No trabalho de Scheleider e Silva (2017), foi realizada a abordagem comparativa da análise comportamental da estrutura e seu desempenho construtivo de lajes lisas maciças armadas e protendidas, de um mesmo projeto arquitetônico utilizado para tal comparação. Seu resultado foi revelar a competitividade econômica entre as duas, demonstrando que a laje convencional maciça obtém vantagem sobre a protendida, pois em seu dimensionamento, a laje protendida economiza nas vigas, pois neste caso não há vigas no projeto e sua espessura da laje foi reforçada, logo, neste caso, a convencional trouxe um resultado econômico com maior benefício-custo.

No estudo de Pacheco e Ribeiro (2018), foram analisados dois modelos construtivos, sendo estes o concreto armado e o concreto protendido, a fim de apontar o que possui maior viabilidade técnica e executiva. Como resultado, os autores apontaram situações nas quais há a possibilidade de optar, em vãos superiores a 12 (doze) metros lineares, a solução mais viável é o uso do concreto protendido, que é mais oneroso, porém, com a possibilidade da diminuição da quantidade de elementos estruturais como pilares e vigas, podendo-se equiparar ao outro modelo citado; e, caso sejam vãos inferiores a 12 (doze) metros, é conveniente o uso do concreto armado.

Na pesquisa de Giffhorn e Lazzari (2018), foi realizado o estudo entre um projeto das vigas de concreto armado e o mesmo em protendido, de forma fictícia, com a finalidade de

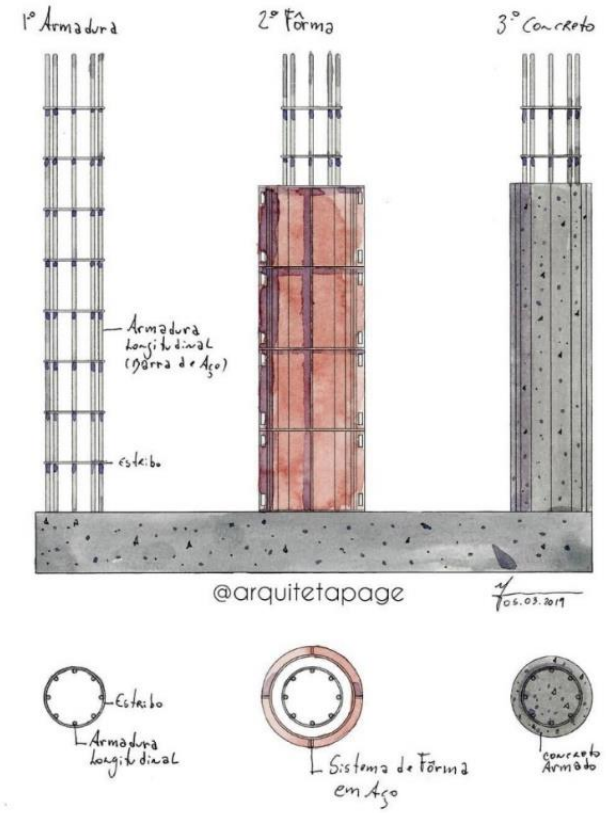
demonstrar que no protendido houve uma redução muito significativa no volume de concreto a ser utilizado em sua execução.

2.1.2 Concreto armado

Sabe-se que concreto é um material que manifesta alta resistência às tensões de compressão, porém apresenta baixa resistência à tração (cerca de 10% da sua resistência à compressão). Tendo em vista essa problemática, para compensar o déficit encontrado do concreto e a fim de torná-lo mais resistente, tornou-se fundamental a associação de um material com alta resistência à tração: as barras de aço (Silva, 2015). Diante deste material composto (concreto e armaduras), surge então o chamado "concreto armado". Para sua existência, é imprescindível que haja real solidariedade entre o concreto e o aço, e que o trabalho seja realizado de forma conjunta. Em uma estrutura de concreto armado, o uso de aço em vigas e pilares torna-se indispensável e o dimensionamento precisa ser bem calculado, seguindo as normas que preconizam os órgãos reguladores, além da necessidade de uma correta execução. A título de exemplo, a FIG. 1 apresenta um esquema da sequência construtiva adequada de pilares em concreto armado.

Quando se pesquisa o significado de concreto armado no dicionário de engenharia, obtém-se uma definição que aponta para um concreto em que estão envoltas armações metálicas destinadas a resistir a esforços de flexão e/ou de tração a que o concreto simples resistiria mal. Define-se, então, o concreto armado como a união do concreto simples e de um material resistente à tração (envolvido pelo concreto), de tal modo que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes. Sucintamente, pode-se dizer que a composição do concreto armado se dá com a soma do concreto simples, das armaduras e da aderência entre eles (PEREIRA, 2020).

Figura 1 – Sequência de execução de pilares em concreto armado



Fonte: Pinterest[1].

2.1.3 Concreto protendido

A definição do concreto protendido, no dicionário da língua portuguesa, aponta para um tipo de concreto armado mais resistente à tração, que permite a construção de estruturas que exijam maior esforço de flexão, pavimentos e pontes com vãos mais extensos e o desenho de elementos estruturais com seções transversais de menor dimensão (DICIO, 2016).

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, define o concreto protendido como aquele no qual parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão como a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU). Dentro deste contexto, ela delineia ainda a armadura ativa como aquela constituída por barras, fios isolados

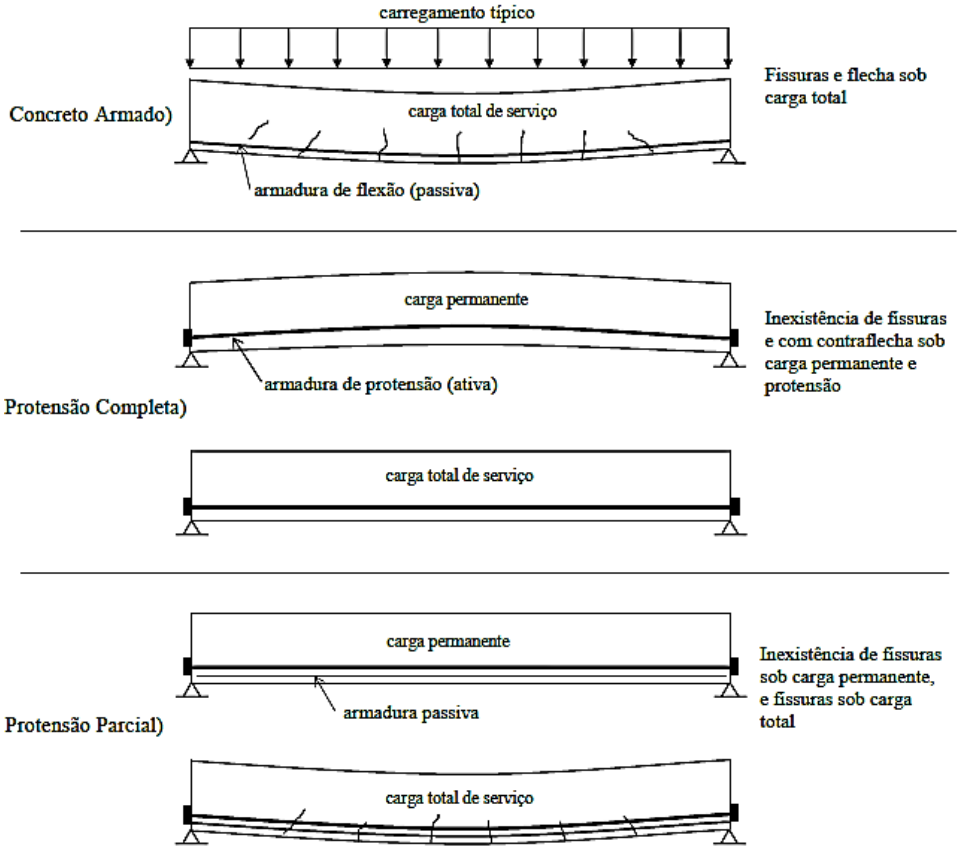
[1]fi.pinterest.com/pin/437693657537128282/

ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial.

Para Pfeil (1984), a protensão é um sistema no qual são introduzidas tensões prévias na estrutura com o intuito de requintar o comportamento do concreto sob a ação de cargas. A protensão é aplicada no concreto através de cabos distribuídos na estrutura e estirados por um macaco hidráulico, que provoca essas tensões.

Neste sentido, a FIG. 2 exibe o comportamento de uma viga de concreto armado e de concreto protendido com protensão completa e parcial.

Figura 2 – Comportamento de viga com protensão completa e parcial



Fonte: Naaman (2004).

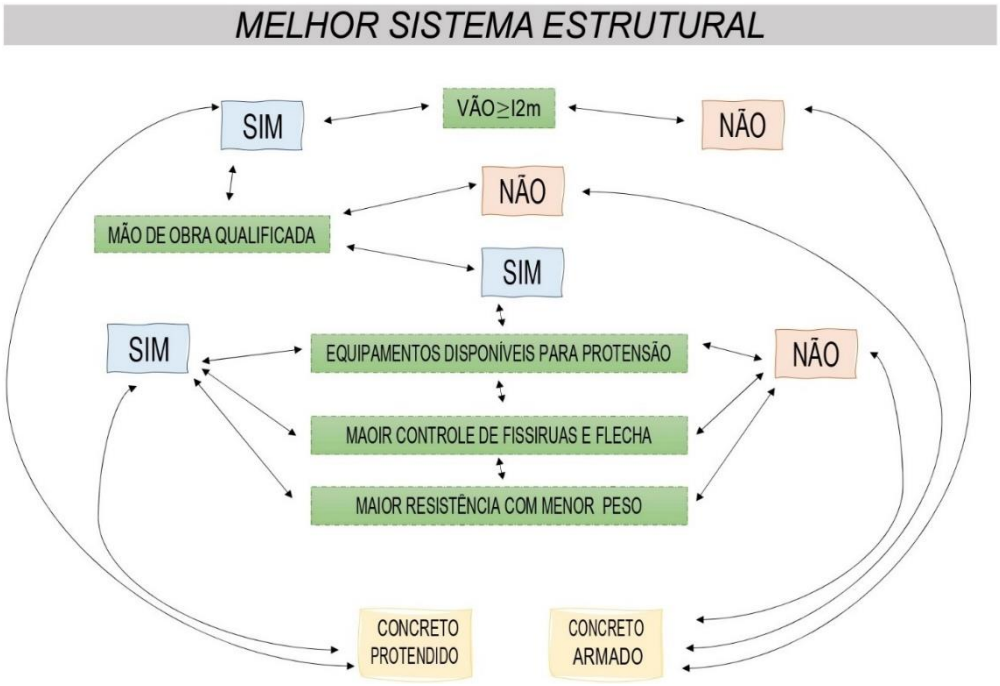
Schmid (2007) elucida a protensão de uma estrutura de concreto como uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura. Inteligente devido à redução da quantidade de materiais por aproveitar a resistência mecânica do aço e do concreto. Eficaz, pois possui uma tecnologia superior à das estruturas convencionais de concreto armado. Duradoura pelo fato de precisar de pouca ou quase nenhuma manutenção ao longo da sua vida útil. Porém, o método do sistema de protensão precisa ser fiscalizado corretamente durante sua execução, pois o menor erro pode

ser prejudicial à estrutura pelo fato de a mesma ser submetida a grandes forças. Cauduro (2002 *apud* Caixeta e Morais, 2018) explica que, na obra em que se utiliza protensão, a mão de obra envolvida no processo construtivo deve ser treinada e fiscalizada por um profissional qualificado, pois qualquer improvisação nesse método pode trazer grandes riscos.

O processo de protensão do concreto consiste em empregar a tensão nos cabos de aço antes da cura do concreto. Há dois tipos de protensão no mercado, a protensão aderente e a protensão não-aderente. A primeira concebe o uso de cabos em bainhas metálicas, podendo essas serem lisas ou onduladas, em que se faz a injeção da calda de cimento, sendo possível angariar o tanto de aderência que é necessário no sistema. A segunda compreende a utilização de cabos engraxados e cobertos por bainhas de polietileno ou polipropileno, os dois de alta aderência, proporcionando proteção contra corrosão.

Assim, torna-se de extrema importância para os profissionais de Engenharia e Arquitetura escolherem o melhor sistema estrutural para cada tipo de obra, o que leva em conta alguns parâmetros. A FIG. 2, apresentada anteriormente, elucida bem as diferenças entre os dois tipos de sistema, apresentando o modelo de uma viga em concreto armado, na qual pode-se notar a formação de fissuras em sua face tracionada, e também o processo de protensão sem o surgimento de fissuras. A FIG. 3, por sua vez, apresenta um fluxograma desenvolvido com o intuito de auxiliar na escolha do sistema estrutural.

Figura 3 – Fluxograma para escolha do esquema estrutural



Fonte: Pacheco e Ribeiro (2018). Adaptada pelas autoras.

2.1.4 Vantagens e desvantagens

Existem vantagens e desvantagens apontadas por projetistas e executores de obras em concreto armado e concreto protendido, a fim de apontar os principais tópicos para escolha e aplicação do melhor sistema estrutural para cada situação a ser analisada. O QUADRO 1 apresenta uma comparação entre os dois materiais.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens de sistemas estruturais em concreto armado e concreto protendido

Sistema Estrutural	Vantagens	Desvantagens
Concreto Armado	• No Brasil, seus componentes são facilmente encontrados e possuem baixo custo; • Boa durabilidade, quando usado na proporção ideal; • Execução relativamente rápida; • O concreto por si só é um material de prevenção e combate a incêndio; • Impermeável, quando sua dosagem é feita de maneira correta; • Resistente a choques e vibrações.	• Elevado peso próprio; • Transtornos quando se trata de reforma e adaptações; • Necessita de mais manutenção, em razão de fissuras e flechas; • Não é bom isolante térmico e acústico;
Concreto Protendido	• Eficiente quanto à fissuração; • Empregando aços de alta resistência, evita a ocorrência de fissuração incabível; • Para a redução do peso próprio, pode-se empregar um concreto com a resistência mais elevada; • Seções mais esbeltas; • Possui menor peso próprio; • Capaz de vencer grandes vãos, desobstruindo as grandes seções de vigas e pilares.	• Elevado custo, quando se trata de obra menores; • Necessidade de mão de obra especializada; • Elevado nível de detalhamento de projeto; • Equipamentos especializados; • Controle de execução mais rigoroso; • Perdas de protensão.

Fonte: Pacheco e Ribeiro (2018). Adaptada pelas autoras.

2.2 Estudo de caso

Neste capítulo, será apresentado todo o processo executivo de uma laje em concreto protendido, tomando-se como objeto de estudo um edifício comercial localizado em Santos Dumont, Minas Gerais.

O objetivo dessa seção é utilizar a obra de concreto protendido já executada e modelar a edificação em concreto armado, para estudar qual destes sistemas é mais viável técnica e economicamente.

2.2.1 Descrição do edifício

Situado à rua Doutor Guilherme de Castro, no centro da cidade de Santos Dumont, Minas Gerais, o edifício comercial tomado como objeto de estudo neste trabalho é composto de dois pavimentos e foi construído em um terreno de 585 m^2.

A edificação conta com dois andares, sendo um térreo e outro o pavimento tipo, sendo que o primeiro possui uma área de 421,50 m^2 e o segundo possui 472,10 m^2, totalizando uma área construída de 893,60 m^2.

2.2.2 Projeto e execução

As empresas contratadas para a elaboração dos projetos, ICM Engenharia e Projetos e Transmar Consultoria e Engenharia, forneceram um pacote completo, composto por vários projetos, a saber: Projeto de Instalações Hidrossanitárias, Projeto de Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico (PPIC) e Projeto de protensão, sendo que todos os projetos foram executados sob a vistoria dos responsáveis da empresa.

O proprietário da obra optou por terceirizar os serviços de execução, sendo assim, a empresa contratada contou com mão de obra própria para a realização de serviços, visando garantir a segurança e a organização do canteiro.

Neste sentido, a partir de um memorial fotográfico de elaboração própria, foi possível identificar materiais e outros aspectos importantes durante a execução da obra. Na FIG. 4, apresentam-se as armaduras a serem utilizadas na confecção das vigas, em que é possível notar a correta execução dos ganchos de ancoragem da viga e a limpeza e organização do canteiro de obras.

Figura 4 – Ferragens a serem utilizadas.

Fonte: as autoras (2020).

Em um estágio mais avançado da obra, a FIG. 5 apresenta o sistema de escoramento metálico para a execução da segunda laje, sobre o qual serão apoiadas as fôrmas.

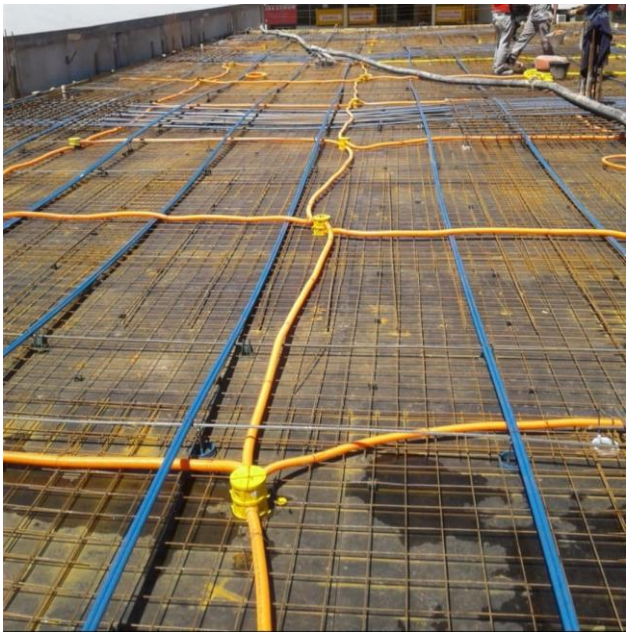
Figura 5 – Escoramento para execução da segunda laje

Fonte: as autoras (2020).

Na FIG. 6 identificam-se, na cor azul, cordoalhas do sistema em concreto protendido. Nota-se que elas estão igualmente espaçadas, assim como as armaduras construtivas da laje.

Nesta mesma figura, também se observa a qualidade da execução por meio dos eletrodutos, na cor alaranjada, que estão devidamente posicionados, sem interferir negativamente nos outros elementos da laje e, através dos espaçadores, corretamente distribuídos, visando assegurar o cobrimento necessário para a laje.

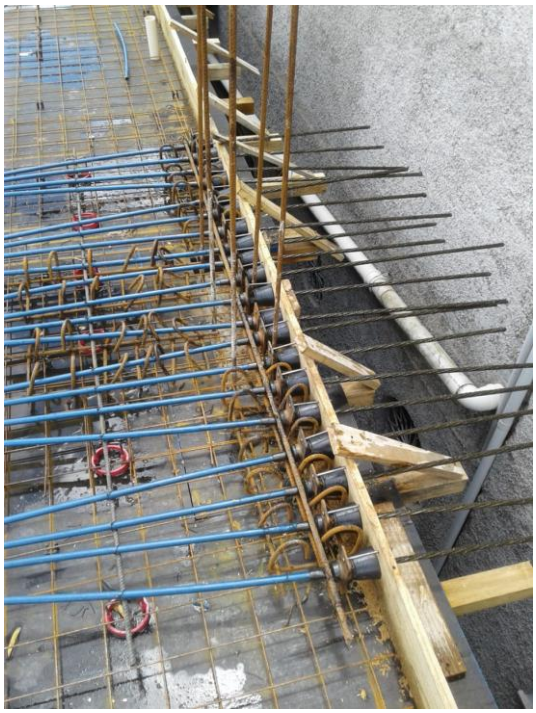
Figura 6 – Posicionamento das cordoalhas na laje



Fonte: as autoras (2020).

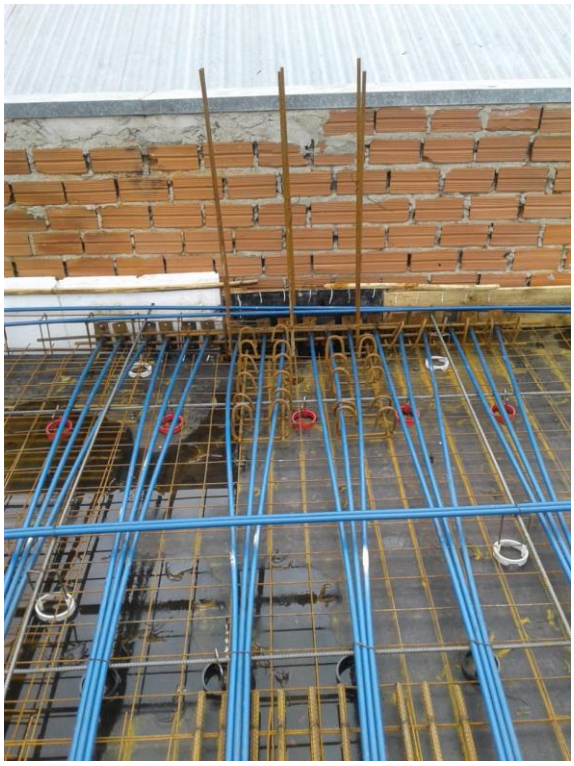
A FIG. 7 apresenta os dispositivos utilizados na ancoragem das cordoalhas do sistema de protensão. Nela, é possível destacar a utilização de cunhas, que geralmente ficam alojadas em cavidades cônicas de blocos ou placas de aço. A FIG. 8, por sua vez, exibe um trecho da laje com maior densidade de armaduras e, portanto, maior rigidez, com os espaçamentos devidamente respeitados entre as cordoalhas transversais e longitudinais.

Figura 7 – Dispositivos de ancoragem das cordoalhas



Fonte: as autoras (2020).

Figura 8 – Cordoalhas transversais e longitudinais



Fonte: as autoras (2020).

Figura 9 – Concretagem primeiro piso

Fonte: as autoras (2020).

2.2.3 Modelagem numérica do edifício

Para modelar a laje do edifício comercial e calcular os momentos fletores, forças resultantes e deformações, foi utilizado o programa CypeCad v.2016[2], que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). As subseções seguintes apresentam considerações gerais sobre a concepção da estrutura, os materiais e as ações utilizados na modelagem numérica e, por fim, os resultados obtidos.

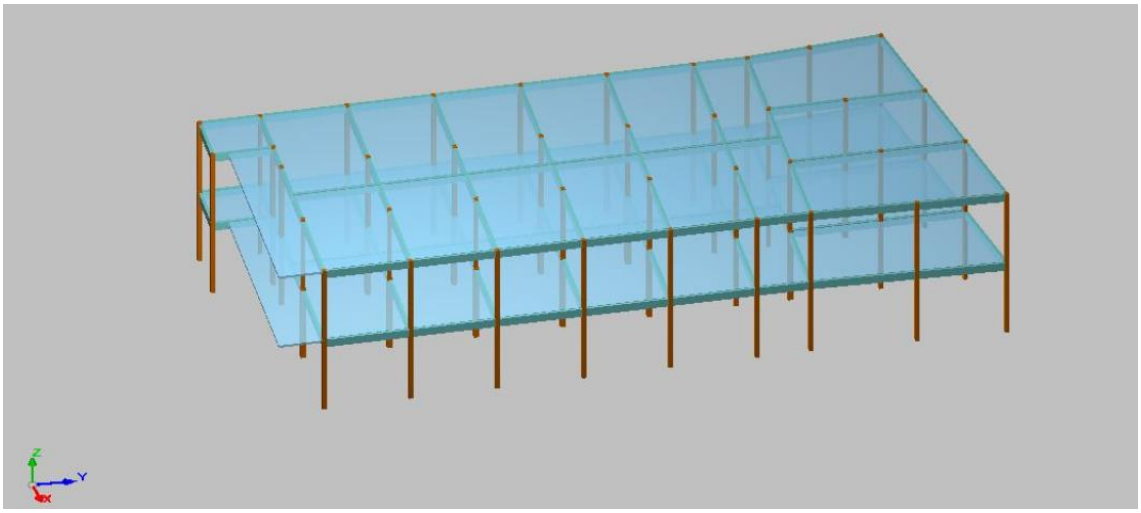
2.2.3.1 Concepção estrutural

A análise comparativa será realizada para uma laje maciça utilizando os dois diferentes sistemas construtivos: concreto armado convencional e concreto protendido (sendo este utilizado como sistema estrutural). Em ambos, as maiores dimensões são 14,40 e 33,65 metros, nas fachadas frontal e lateral, respectivamente.

[2] versoes.cype.pt/avaliacao.htm

No sistema de concreto armando convencional, considerou-se a espessura da laje igual a 12 cm e vigas com seção 15x40 cm. Foram necessários 39 pilares com 3,68 m de altura (pé direito), distribuídos da seguinte maneira: 1 pilar de 20x21 cm, 11 pilares de 20x25 cm, 27 pilares 20x20 cm. Não foram modeladas as fundações, e como as paredes atuam diretamente nas vigas e o foco deste trabalho são as lajes, foram desconsideras as cargas das paredes. A FIG. 10 exibe o modelo numérico desenvolvido neste sistema.

Figura 10 – Modelo numérico tridimensional do edifício em concreto armado



Fonte: CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

No sistema de concreto protendido existente, em contrapartida, as lajes foram apoiadas sobre 18 pilares com seção 20x60 cm e mesmo pé direito, de 3,68 metros de altura, por pavimento. Neste caso, não existem vigas e a espessura da laje considerada também foi de 20 cm.

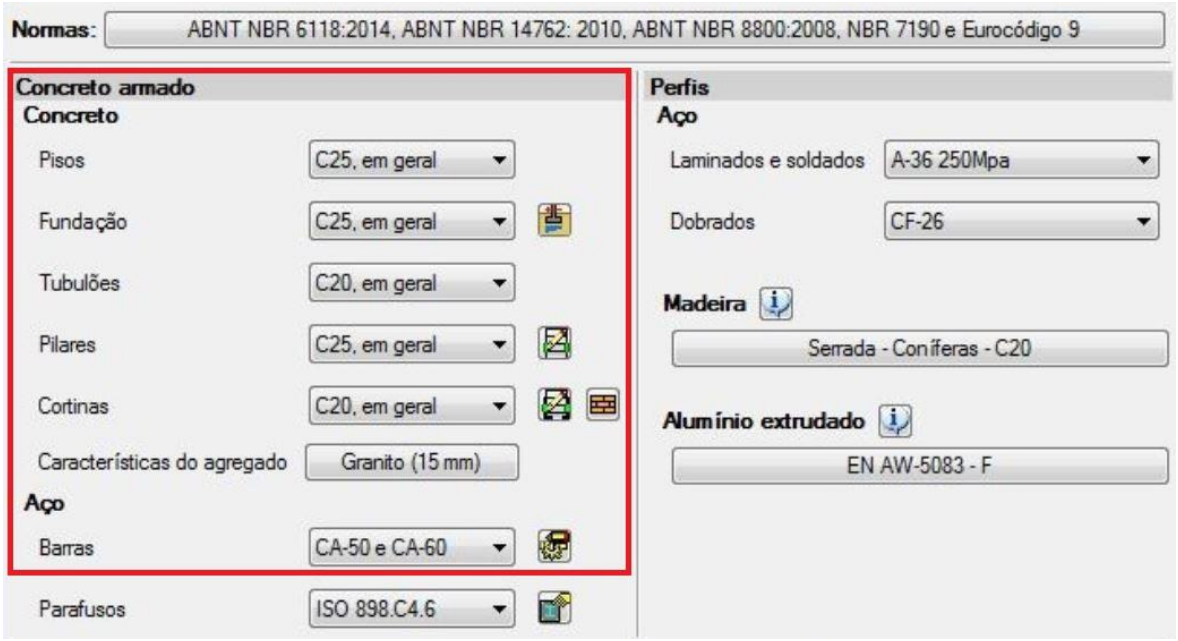
Comparando o lançamento estrutural dos dois sistemas supracitados, observa-se, de antemão, como a protensão pode diminuir a quantidade de pilares, principalmente para lajes de grandes dimensões. Esta observação ratifica uma das vantagens do concreto protendido em relação ao concreto armado, a capacidade de vencer grandes vãos, conforme apresentado no QUADRO 1.

Ressalta-se que, para a construção de uma obra em concreto protendido é necessária a consultoria de um tecnologista de materiais. A execução da estrutura é de responsabilidade da empresa construtora e o engenheiro responsável deve obedecer às recomendações da ABNT NBR 14931:2004 – Execuções de Estruturas de Concreto – Procedimentos.

2.2.3.2 Materiais utilizados

No sistema de concreto armado convencional, utilizou-se na modelagem dos elementos estruturais concreto C25, com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 25 MPa, e aços CA-50 e CA-60, com tensões de escoamentos (f_{yk}) iguais a 500 MPa e 600 MPa, respectivamente. A FIG. 11 apresenta os dados de entrada no programa, na qual se observa que a norma de referência utilizada é a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

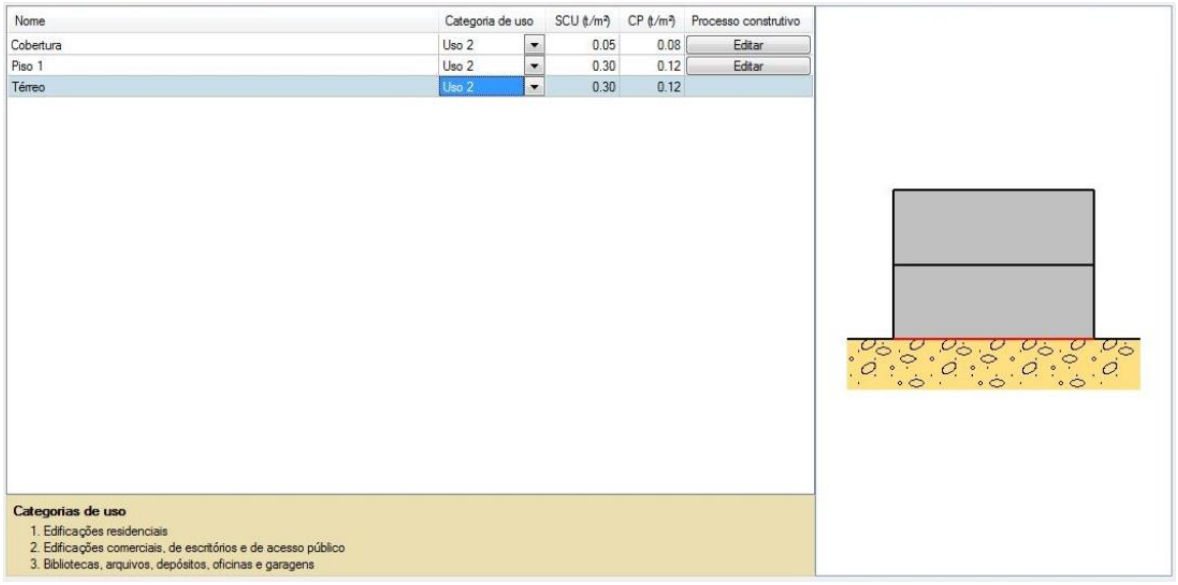
Figura 11 – Materiais utilizados no modelo numérico em concreto armado



Fonte: CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

As ações consideradas no dimensionamento ao Estado Limite Último (ELU) são apresentadas na FIG. 11. Considerou-se no cálculo do peso próprio a massa específica do concreto armado como sendo 2500 kg/m^3. Para a inserção dos dados no programa, foram utilizados os valores das plantas arquitetônicas e as cotas condizentes de pé direito. Conforme se verifica na FIG. 12, os valores das cargas permanentes no campo “CP (t/m²) ” e os valores de sobrecarga no campo “SCU (t/m²) ”. Não foi calculada a fundação.

Figura 12 – Ações consideradas no modelo numérico em concreto armado



Fonte: CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

Para os cálculos da laje no sistema de concreto protendido, foram utilizados em todos os elementos estruturais os materiais apresentados na TAB. 1 e na TAB. 2, referentes ao concreto C30 e ao aço, respectivamente.

Tabela 1 – Propriedades do concreto C30

Propriedade	Valor			Unidade
Resistência característica (f_{ck})	30	30	30	MPa
Módulo de deformação tangente inicial	31	31	31	GPa
Consumo mínimo cimento	320	320	320	kg/m^3
Relação a/c (água/cimento)	0,55	0,55	0,55	-

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 2 – Propriedades do aço

Aço	Tensão de escoamento (f_{yk}) [MPa]
CA-50	500
CA-60	600
CP-190 RB – Cordoalha engraxada	1900

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

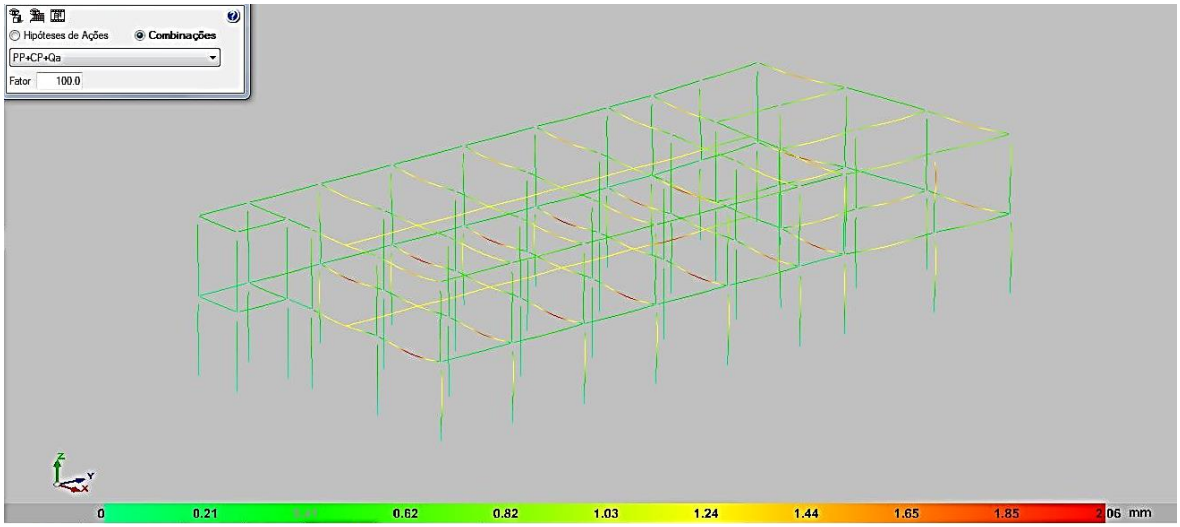
Assumida a Classe de Agressividade Ambiental (CAA) II, em conformidade com a norma ABNT NBR 6118:2014, na edificação construída em concreto protendido foi adotado

cobrimento das armaduras igual a 3 cm para pilares e vigas e igual a 2 cm para as lajes. Além disso, considerou-se uma ação de sobrecarga igual a 600 kgf/m^2 por pavimento.

2.2.3.3 Resultados

Diversos resultados podem ser extraídos da análise numérica no programa CypeCad v.2016. Por simplificação, a avaliação dos resultados neste trabalho será baseada na configuração deformada dos principais elementos estruturais da edificação. Na FIG. 13, apresenta-se a deformada dos elementos de pórtico da estrutura, em uma vista tridimensional.

Figura 13 – Configuração deformada dos elementos estruturais em concreto armado



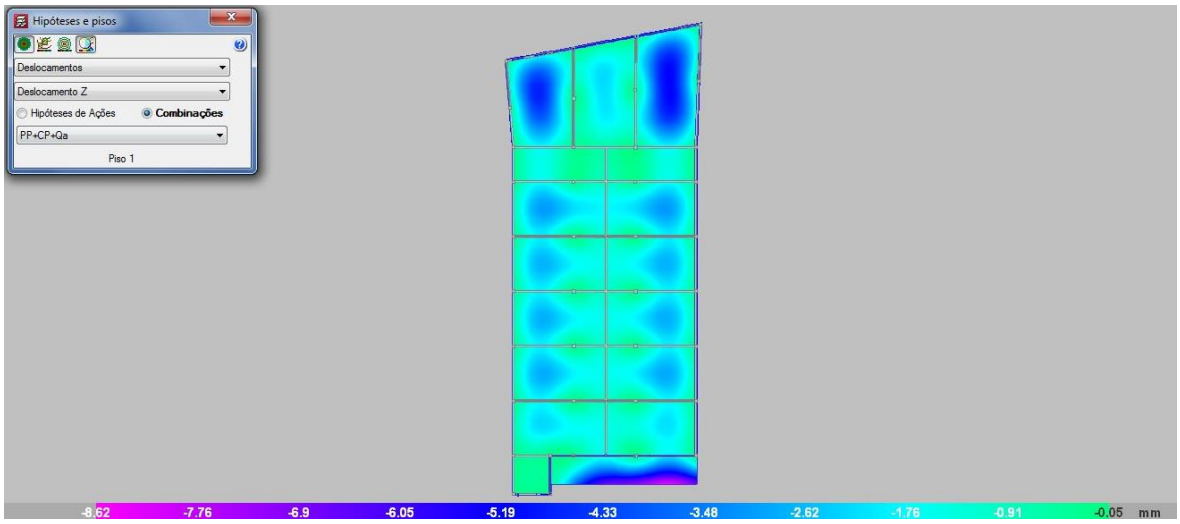
Fonte: CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

Na FIG. 13 observar-se que os menores valores de deformidade ficam entre 0 e 0,82 mm, que são representados pela cor verde; já as deformações intermediárias ficam entre 0,82 e 1,44 mm, que são retratadas pelas cores amarela até a laranja; e, por fim, as deformações mais críticas, que necessitam de uma análise mais cautelosa, estão entre 1,44 a 2,06 mm e são representados pelo tom de vermelho. Percebe-se que há maiores deslocamentos no meio dos vãos das vigas, justamente onde os momentos fletores assumem valores mais elevados. Nos apoios dos pilares, também existem momentos negativos significativos, entretanto as deformações são praticamente nulas devido à elevada rigidez entre as ligações.

O projeto arquitetônico da edificação apresenta lajes com maiores vãos nos fundos do lote, ou seja, mais afastados da fachada frontal. Estes planos de laje são maiores quando comparados aos demais, então espera-se que eles possuam maiores flechas. Consequentemente,

as vigas sobre as quais essas lajes se apoiam e também os pilares em que apoiam as vigas devem ter maiores deformações ao se dimensionar a estrutura ao Estado Limite Último (ELU). A FIG. 14 apresenta uma vista em planta da configuração deformada das lajes ao se considerar a combinação das cargas permanentes e variáveis.

Figura 14 – Configuração deformada das lajes de concreto armado



Fonte: CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

Ao analisar os deslocamentos dos planos de laje, percebe-se que as flechas mais favoráveis (menores) possuem valores entre 0,05 e 2,62 mm, já as mais desaforáveis (maiores) ficam entre 2,62 e 8,62 mm. Portanto, pode-se afirmar que as flechas são maiores no meio dos vãos em lajes apoiadas nas bordas, e maiores na extremidade em laje em balanço. Contudo, destaca-se que neste tipo de sistema estrutural, não houve possibilidade de se ter uma laje em balanço com os mesmos 12 cm de altura do restante da edificação, pois em sua verificação se obteve um coeficiente parcial de segurança muito desfavorável. Além disso, não foram feitas as verificações dos limites das flechas obtidas conforme a norma ABNT NBR 6118:2014, uma vez que os valores obtidos tiveram ordem de grandeza muito pequena, em função da elevada rigidez do sistema global.

De modo geral, o sistema estrutural de concreto armado teve uma problemática aparente ao tentar manter o projeto arquitetônico, que foi a laje em balanço na frente da edificação, devido à sua grande dimensão. Para que essa laje fosse mantida, deveriam ser locados pilares de apoio para sustentá-la, o que a tornaria não mais em balanço. Essa possibilidade provocaria alterações na fachada frontal da edificação proposta inicialmente na concepção do projeto. Conforme se verifica na FIG. 14, o deslocamento é bastante desfavorável nesta laje, anulando

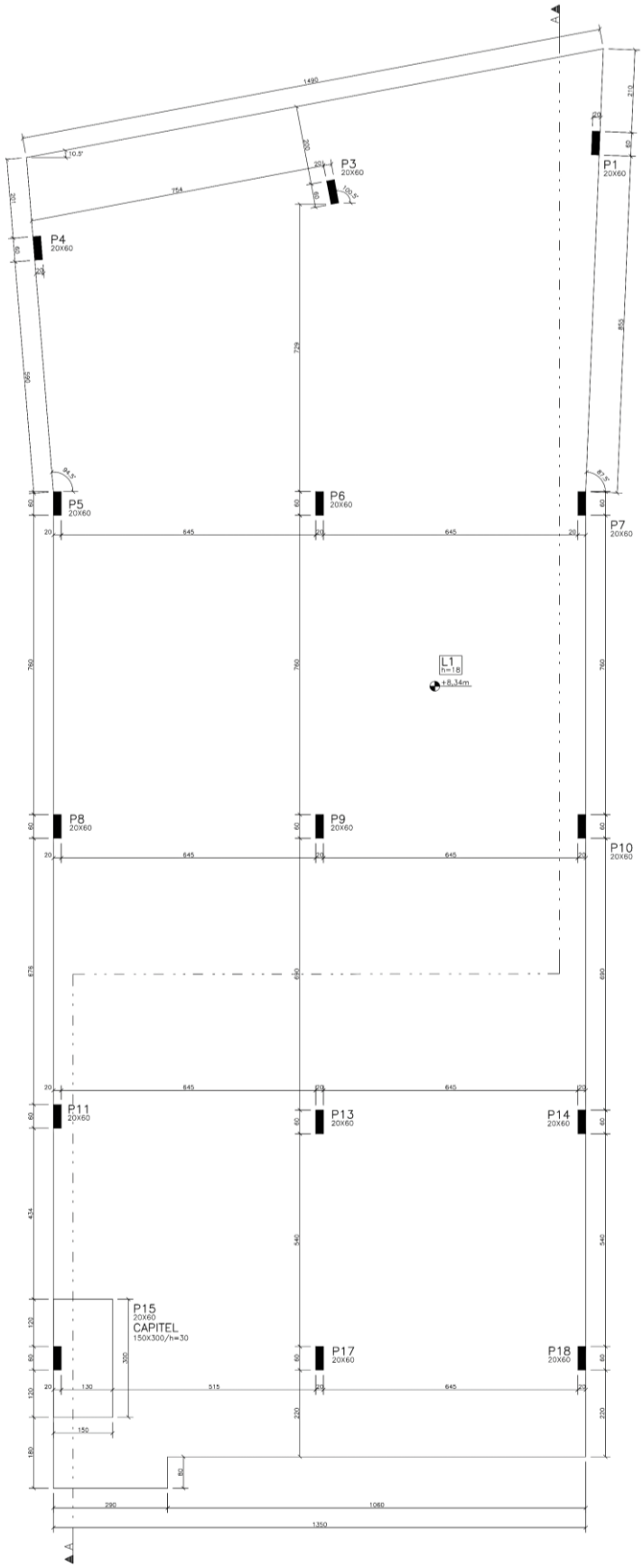
assim a possibilidade de manter esta estrutura, conforme mencionado anteriormente, sendo um indicativo de que esse sistema estrutural pode não ser tão eficaz quando se trata de grandes vãos, sobretudo em balanço.

Para uma melhor visualização da concepção estrutural executada em concreto protendido e em concreto armado, adotada no modelo numérico, apresentam-se suas plantas de fôrmas na FIG. 15 e na FIG.16, respectivamente.

A comparação entre as duas plantas permite fazer algumas observações importantes. A locação de pilares e vigas garante a concepção estrutural e a segurança, considerando que o arranjo estrutural desses elementos se torna o esqueleto da edificação em concreto armado e garante a sua estabilidade global. Para isso, deve-se notar que no projeto arquitetônico a maior dimensão do pilar deve ser perpendicular à maior dimensão do edifício. Em relação às vigas, dificilmente elas terão vãos maiores que cinco metros, pois, grandes lances dependem de seções relativamente maiores e consequentemente mais altas.

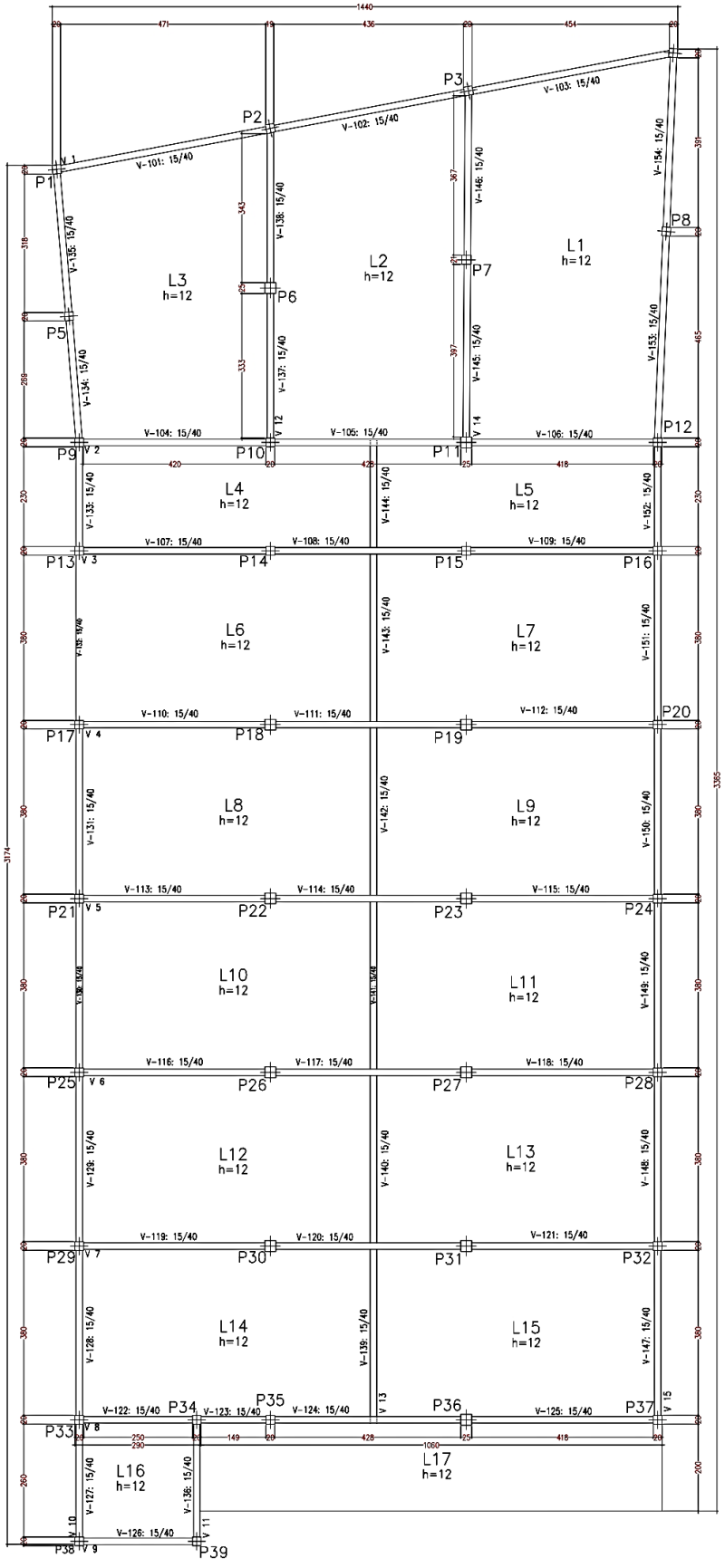
Portanto, como mencionado anteriormente, por segurança estrutural e também pela verificação dos Estados Limites de Serviço (ELS), utilizando-se concreto armado convencional não se permite o lançamento de uma laje em balanço com vão tão extenso, conforme proposto no projeto arquitetônico. Já no concreto protendido, devido a sua propriedade de vencer grandes vãos, é possível considerar a laje em balanço, conforme representado na FIG. 15.

Figura 15 – Planta de fôrma do concreto protendido



Fonte: as autoras (2020).

Figura 16 – Planta de fôrma do concreto armado



Fonte: as autoras (2020).

Para elucidar quantitativamente as diferenças da utilização dos dois sistemas estruturais, levantou-se a quantidade de materiais gastos nos elementos estruturais do primeiro piso e na cobertura. Especificamente, calculou-se para cada pavimento o volume de concreto, em metros cúbicos (m^3), e de aço, em quilogramas (kg), bem como o consumo de fôrmas, em metros quadrados (m^2), conforme apresentado na TAB. 3 e na TAB. 4. O resultado total, por sua vez, é mostrado na TAB. 5.

Tabela 3 – Quantitativo de materiais do primeiro piso no sistema em concreto armado

Elemento	Formas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)	Barras (kg)
Lajes	408,11	48,97	2613,00
Vigas	30,44	12,95	799,00
Fôrmas laterais	123,79	0,00	0,00
Pilares	109,58	5,96	594,00
Total	671,92	68,5	4006,00

Fonte: Relatório do CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

Tabela 4 – Quantitativo de materiais da cobertura no sistema em concreto armado

Elemento	Formas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)	Barras (kg)
Lajes	408,28	48,99	2050,00
Vigas	30,52	12,95	649,00
Fôrmas laterais	124,11	0,00	0,00
Pilares	102,32	5,08	562,00
Total	665,23	67,02	3261,00

Fonte: Relatório do CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

Tabela 5 – Quantitativo total de materiais no sistema em concreto armado

Elemento	Formas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)	Barras (kg)
Lajes	816,39	97,96	4663,00
Vigas	60,96	25,90	1448,00
Fôrmas laterais	247,90	0,00	0,00
Pilares	211,90	11,04	1156,00
Total	1337,15	134,90	7267,00

Fonte: Relatório do CypeCad v.2016[2]. Adaptada pelas autoras.

A TAB. 6 e a TAB. 7 mostram os resultados do levantamento quantitativo dos elementos na concepção estrutural em concreto protendido do primeiro piso, e a TAB. 8 e a TAB. 9 da cobertura. De maneira similar à apresentação dos quantitativos no sistema em concreto armado,

a TAB. 10 e a TAB. 11 apresentam o resultado global, referente ao somatório dos elementos. Como se trata de concreto protendido, observa-se a presença dos cabos protendidos (CP 190-RB).

Tabela 6 – Quantitativo de materiais (concreto e fôrmas) do primeiro piso no sistema em concreto protendido

Elemento	Fôrmas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)
Lajes	459,00	83,00
Vigas	29,50	2,50
Pilares	118,50	9,00
Total	607,00	94,50

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 7 – Quantitativo de materiais (aços e cabos) do primeiro piso no sistema em concreto protendido

Barras	Peso total (kg)
CA-50	2688,00
CA-60	1050,00
CP 190-RB	1872,00

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 8 – Quantitativo de materiais (concreto e fôrmas) da cobertura no sistema em concreto protendido

Elemento	Fôrmas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)
Lajes	470,00	85,00
Vigas	0,00	0,00
Pilares	99,00	8,00
Total	569,00	93,00

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 9 – Quantitativo de materiais (aços e cabos) da cobertura no sistema em concreto protendido

Barras	Peso total (kg)
CA-50	1424,00
CA-60	1076,00
CP 190-RB	1990,00

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 10 – Quantitativo de materiais total (concreto e fôrmas) no sistema em concreto protendido

Elemento	Fôrmas (m^2)	Volume de Concreto (m^3)
Lajes	929,00	168,00
Vigas	29,00	2,50
Pilares	217,50	17,00
Total	1175,50	187,50

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

Tabela 11 – Resultado quantitativo total da obra de resumo de aços CA 50-60 e CP 190-RB (cabos) no sistema estrutural de concreto protendido

Barras	Peso total (kg)
CA-50	4112,00
CA-60	2126,00
CP 190-RB	3862,00

Fonte: ICM Engenharia e Projetos (2019). Adaptada pelas autoras.

2.2.4 Estudo comparativo de custos

A TAB. 12 e a TAB. 13 apresentam os custos totais estimados para os sistemas em concreto armado e protendido, respectivamente. Os preços unitários foram os mesmos utilizados por Silva (2015, p.58). A TAB. 14, por fim, apresenta a comparação entre os valores finais, por meio das diferenças absolutas e relativas.

Tabela 12 – Estimativa de custo total da laje em concreto armado

Item	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Preço total
Concreto estrutural (f_{ck} = 25 MPa)	134,90	m^3	R$ 250,00	R$ 33.725,00
Aço CA-50 e CA-60	7267,00	kg	R$ 4,06	R$ 29.504,02
Aluguel de formas plásticas	556	unidade/mês	R$ 8,00	R$ 4.448,00
Mão-de-obra para aço comum	7418,00	kg	R$ 2,96	R$ 21.957,28
Mão-de-obra para colocação das formas	1343,99	m^2	R$ 27,00	R$ 36.287,73
			Total	R$ 125.922,03

Fonte: as autoras (2020).

Tabela 13 – Estimativa de custo total da laje em concreto protendido

Item	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Preço total
Concreto estrutural (f_{ck} = 30 MPa)	187.50	m^3	R$ 330,00	R$ 61.875,00
Aço CA-50	4112.00	kg	R$ 4,06	R$ 16.694,72
Aço CA-60	2126.00	kg	R$ 4,06	R$ 8.631,56
Aço CP 190-RB	3862.00	kg	R$ 5,76	R$ 22.245,12
Aluguel de formas plásticas	486	unidade/mês	R$ 8,00	R$ 3.888,00
Mão-de-obra aço comum	6238.00	kg	R$ 2,96	R$ 18.464,48
Mão-de-obra de aço de protensão	3862.00	kg	R$ 3,20	R$ 12.358,40
Mão-de-obra para colocação das formas	1175.50	m^2	R$ 27,00	R$ 31.738,50
			Total	R$ 175.894,78

Fonte: as autoras (2020).

Tabela 14 – Comparação entre os preços finais adotados para ambas as lajes

Concreto armado	Concreto protendido	Diferença absoluta	Diferença relativa
R$ 125.922,03	R$ 175.894,78	R$ 49.972,75	28,41%

Fonte: as autoras (2020).

É importante destacar que a estimativa do volume de material no sistema em concreto armado não considerou a laje em balanço.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi comparar os processos de sistemas estruturais em concreto armado convencional e de uma laje de concreto protendido já em execução. Foi elaborada uma revisão bibliográfica baseada nos históricos e definições correlatados aos sistemas estruturais, as diretrizes normativas e as vantagens e desvantagens dos sistemas.

O processo construtivo em concreto protendido experimenta uma utilização crescente no mercado brasileiro de engenharia civil. Tanto na revisão bibliográfica quanto no estudo de caso deste trabalho, observou-se que o concreto protendido possui um diferencial em resistência e qualidade, e quando comparado à estrutura de concreto armado convencional, este modelo tem como característica vencer grandes vãos como consequência da sua superestrutura em cordoalhas de aço. Porém essa técnica fica mais limitada às obras de grande porte, em função do seu custo e necessidade de mão de obra especializada.

Ao comparar os custos dos dois sistemas construtivos, há uma indagação quanto ao preço elevado do concreto protendido. Neste ponto, não se pode levar em consideração apenas a parte orçamentária, sendo necessário ponderar seus diferenciais qualitativos, como o menor tempo de execução em relação ao sistema convencional de concreto armado. Outros fatores cruciais a serem analisados são o empoderamento arquitetônico compatibilizado com a estrutura, o menor número de trabalhadores no canteiro de obra, a qualidade na gestão do canteiro de obra, ou seja, organização e limpeza por não gerarem tantos resíduos e desperdícios. Além disso, no sistema estrutural de concreto protendido há um melhoramento na gestão administrativa no canteiro de obras, e um melhor fluxo de produção quando comparado diretamente ao concreto armado convencional.

Com o estudo comparativo realizado neste trabalho foi possível identificar alguns fatores importantes, sendo estes quantitativos e qualitativos. O concreto protendido exige um conhecimento prévio de execução e de projeto e a necessidade de mão de obra qualificada pode torná-lo oneroso em comparação com o concreto armado, comumente utilizado. Porém, utilizar este sistema estrutural também pode significar economia, quando se consideram aspectos de manutenção futura da estrutura. Portanto, a presente pesquisa revelou alguns parâmetros a serem observados pelo projetista e pelo financiador do projeto, podendo-se dizer que o concreto armado é mais econômico quando aplicado em lajes com pequenos vãos, em comparação com o concreto protendido. Todavia, dependendo da arquitetura da obra e considerando a necessidade de manutenção futura, este custo pode ser equivalente ao uso do concreto armado convencional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR. 6118.** Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de janeiro, 2014.

CAIXETA, P. E. B.; MORAIS, W. R. de. **Lajes lisas em concreto protendido** – Análise e Relatório de Inspeção de Execução. Anápolis, 2018.

CAUDURO, E. L. **Recomendações para a boa execução de construções em concreto protendido com cordoalhas engraxadas e plastificadas (protensão não aderente)**. Revista Ibracon nº. 28, 2002.

DICIO. **Significado de concreto protendido**. Dicionário Online de Português,2020. Disponível em: < www.dicio.com.br/concreto-protendido/>. Acesso em: outubro de 2020.

GIFFHORN, G. C.; LAZZARI, P. M. **Estudo comparativo entre viga de concreto armado e concreto protendido.** Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, n. 7, p. 2-14, 2018.

ICM Engenharia e Projetos. **Relatório da superestrutura** – Plotagem estrutural do Edifício Comercial em Santos Dumont – MG. Barbacena, 2019.

NAAMAN, A. E. **Prestressed concrete analysis and design: fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1982.

OLIVEIRA, Douglas *et al.* **Viabilidade da aplicação de concreto protendido para lajes de edifícios: comparação com o concreto armado.** Semana de Pesquisa do Centro Universitário Tiradentes-SEMPESq-Alagoas, n. 6, 2018.

PACHECO, A. L. L.; RIBEIRO, B. R. D. S. **Estudo comparativo entre laje maciça simples de concreto armado e concreto protendido não aderente**: uma abordagem bibliográfica. 2018.

PEREIRA, C. **O que é concreto armado?** Escola de Engenharia, 2020. Acesso em: outubro de 2020. Disponível em: <www.escolaengenharia.com.br/concreto-armado/>.

PFEIL, Walter. **Concreto protendido** – Introdução. LTCE, Rio de Janeiro, v. 5, 1984.

SANTOS, R. E. dos. **A armação do concreto no brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia.** 2008.

SCHELEIDER, A. A.; SILVA, M. di C. **Análise comparativa do comportamento estrutural e desempenho construtivo de lajes lisas maciças em concreto armado versus concreto protendido–estudo de caso aplicado em TQS**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, F. N. **Análise comparativa entre lajes em concreto armado e concreto protendido**. Recife, 2015.

SILVA, J. B. da; SILVA, J. L. I. F. da; GARCIA, R. S. **Análise comparativa do dimensionamento de vigas de concreto armado e protendido**. Anais do fórum de iniciação científica do UNIFUNEC, v. 8, n. 8, 2017.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; JUNIOR, Kléos M. Lenz César. **Concreto protendido** – Fundamentos básicos. Universidade Federal de Viçosa, 1998.