



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**  
**PATRICK ELEUTÉRIO DA ROSA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CONSTRUTIVOS DO  
CONCRETO ARMADO E DO CONCRETO PROTENDIDO: ANÁLISE DE UMA  
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR**

**Tubarão**  
**2021**

**PATRICK ELEUTÉRIO DA ROSA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CONSTRUTIVOS DO  
CONCRETO ARMADO E DO CONCRETO PROTENDIDO: ANÁLISE DE UMA  
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial  
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof. Lucimara Aparecida Schambeck Andrade, Ms.

**Tubarão**

**2021**

**PATRICK ELEUTÉRIO DA ROSA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CONSTRUTIVOS DO  
CONCRETO ARMADO E DO CONCRETO PROTENDIDO: ANÁLISE DE UMA  
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 21 de junho de 2021.

*Lucimara a. s. a.*

\_\_\_\_\_  
Professora e orientadora Lucimara Aparecida Schambeck Andrade, Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

*Motta*

\_\_\_\_\_  
Prof. Maurício Alberto Büchele Motta, Esp.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

*Beatriz Anselmo Pereira*

Ao meu pai e a minha mãe, que me possibilitaram tudo o que tenho hoje, ao meu falecido avô por sempre me apoiar em cada passo de cada ano de estudo e pôr fim a todos os que tiveram envolvimento direto e indireto em toda a minha jornada acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

O resultado deste trabalho vem de uma base sólida, com pais, familiares e amigos que auxiliaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste documento, assim como de toda a minha passagem pela graduação em Engenharia Civil.

Em especial aos meus pais, Valda Eleutério da Rosa e Jânio Domício da Rosa que me proporcionaram toda a confiança, educação, respeito e apoio no meu crescimento e na minha jornada acadêmica

Ao meu falecido avô materno, o senhor José Manoel Eleutério ou o “vô Zé” como era chamado, por todo o apoio e admiração em todo momento desde o momento da minha escolha do curso universitário.

A minha namorada Thâmila Motta Ceron, por todo carinho e apoio durante esta fase, pelos fins de semanas estudando e por estar ao meu lado.

Aos amigos que adquiri em todos esses anos de curso, pelas risadas, pelos apoios e pelas conversas que tivemos.

Aos meus professores de minha graduação que me proporcionaram a base acadêmica para me tornar o profissional ao qual pretendo me tornar. Em especial ao professor Maurício Alberto Büchele Motta, pelo auxílio no desenvolvimento dos dados deste documento e por todo o apoio durante a graduação.

A minha atual orientadora a professora Lucimara Aparecida Schambeck Andrade, pelas conversas, correções e todo o auxílio neste desenvolvimento, também a minha primeira orientadora a professora Beatriz Anselmo Pereira por ter me aceitado como orientando na fase inicial deste documento, pelas ideias propostas e pela paciência.

Ao Engenheiro civil Cristian Vitorette Fernandes pelos ensinamentos passados no meio profissional, o qual impactaram diretamente sobre este desenvolvimento.

A construtora responsável pela execução e a empresa responsável pela protensão, pelo carinho, pelo apoio e por todo o profissionalismo.

“Sabe o que é mais caro na engenharia? O desconhecimento.”  
(Luiz Anibal de Oliveira Santos).

## RESUMO

Um comparativo entre os métodos construtivos atuais, procura demonstrar as utilizações de cada um, além de sua aplicabilidade e viabilidade, apontando pontos importantes para uma aplicação real do método escolhido. Em campo para este tipo de escolha, cabe ao engenheiro responsável analisar e assegurar que o método escolhido será o melhor para o empreendimento a ser executado. Este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa de uma laje executada em concreto protendido e a mesma estrutura se executada em concreto armado. Para maior assimilação foram descritos os processos construtivos de cada método, para que na sequência fosse realizada a comparação em si. Para a execução da ideia foi utilizado um empreendimento multifamiliar, que foi executado originalmente com uso do concreto protendido. Foram utilizados dados dos projetos originais fornecidos pela empresa, além de uma série de visitas realizadas durante e após a execução. Ainda foram desenvolvidos os cálculos em software utilizando das mesmas dimensões, viabilizando a comparação dos métodos. Para o projeto em concreto armado foi aplicado o estilo de uma laje nervurada para que fosse possível tornar a estrutura arquitetonicamente mais próxima possível do original. Por fim os resultados foram apresentados e relacionados entre si, demonstrando a relação de quantidade de aço, volume de concreto, materiais e equipamentos utilizados na execução, além das cargas impostas sobre cada estrutura. Os resultados obtidos demonstraram os valores correspondentes ao aumento em relação ao aço e a redução do volume de concreto utilizado quando executada a estrutura em concreto armado, sendo na sequência apresentada a redução de carga a ser imposta sobre a peça. Além disto foram obtidas as diferenças entre a quantidade de mão de obra necessária para a execução dos métodos dentro do mesmo período, sendo vantajoso o uso da protensão neste requisito.

Palavras-chave: Comparação. Protendido. Armado.

## ABSTRACT

A comparison between the current construction methods, seeks to demonstrate the uses of each one, in addition to its applicability and feasibility, pointing out important points for a real application of the chosen method. In the field for this type of choice, it is up to the responsible engineer to analyze and ensure that the chosen method will be the best for the project to be executed. This study aims to carry out a comparative analysis of a slab made of prestressed concrete and the same structure if made of reinforced concrete. For greater assimilation, the construction processes of each method were described, so that the comparison itself could be subsequently performed. To carry out the idea, a multifamily project was used, which was originally carried out using prestressed concrete. Data from the original projects provided by the company were used, in addition to a series of visits carried out during and after execution. The calculations were also developed in software using the same dimensions, enabling the comparison of methods. For the reinforced concrete project, the style of a ribbed slab was applied to make the structure architecturally as close as possible to the original. Finally, the results were presented and related to each other, demonstrating the relationship between the amount of steel, concrete volume, materials and equipment used in the execution, in addition to the loads imposed on each structure. The results obtained showed the values corresponding to the increase in relation to steel and the reduction in the volume of concrete used when the reinforced concrete structure was executed, and the load reduction to be imposed on the piece was presented in the sequence. In addition, differences were obtained between the amount of labor required to carry out the methods within the same period, being advantageous to use prestressing in this requirement.

Keywords: Comparison. Prestressed. Armed.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura. ....	21
Figura 2 – Parte inferior de uma laje nervurada. ....	22
Figura 3 – Deformação em modelo de peça executada em concreto armado. ....	25
Figura 4 – Relação tensão x deformação; a) Aços CA-25 e CA-50 b) Aço CA-60. ....	26
Figura 5 – Relação tensão x deformação simplificada. ....	26
Figura 6 – Modelo utilizado por P.H. Jackson. ....	30
Figura 7 – Viga de concreto: a) sem armadura; b) executada em concreto armado; c) executada em concreto protendido. ....	31
Figura 8 – Vista lateral da ponte Costa e Silva. ....	32
Figura 9 – Esquema simplificado de pista de protensão para fabricação de peças protendidas com pré-tensão. ....	34
Figura 10 – Modelo de cordoalha engraxadas com 7 fios. ....	35
Figura 11 – Modelo de ancoragem do método não aderente utilizando de cordoalha engraxadas. ....	36
Figura 12 – Modelo do método aderente utilizando bainha metálica. ....	38
Figura 13 – Placa de aço para ancoragem de cordoalhas. ....	38
Figura 14 – Cabos de protensão externa em seção de uma ponte. ....	39
Figura 15 – Cabos de protensão externa em seção de ponte, aplicando reforço estrutural. ....	40
Figura 16 – Modelo divisão entre perdas de tração. ....	42
Figura 17 – Corte em bainha metálica demonstrando pontos de atrito entre cabos e a própria bainha. ....	43
Figura 18 – Demonstração do atrito em cabo-bainha devido a ondulação da mesma. ....	44
Figura 19 – Diagrama tensão x deformação dos aços de protensão. ....	47
Figura 20 – Relação custo X vãos em lajes armadas e protendidas. ....	50
Figura 21 – Esquema da divisão da edificação. ....	53
Figura 22 – Fôrma de madeira para assoalhamento da laje. ....	56
Figura 23 – Armadura de protensão da estrutura. ....	57
Figura 24 – Modelo do momento fletor da estrutura. ....	59
Figura 25 – Operário realizando a protensão com uso de macaco hidráulico. ....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Peso do aço em relação ao método construtivo.....	60
Gráfico 2 – Curva de crescimento de concreto 21 MPa com 3 dias.....	62
Gráfico 3 – Volume de concreto em relação ao método construtivo .....	63
Gráfico 4 – Curva de crescimento de concreto 30 MPa com 28 dias.....	64
Gráfico 5 – Peso do concreto em relação ao método construtivo. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cobrimento nominal em relação a classe de agressividade .....	24
Tabela 2 – Valor do coeficiente de aderência.....	25
Tabela 3 – Diâmetros de fios e barras estabelecidas pela norma NBR 7480.....	27
Tabela 4 – Classes e resistências de concretos estruturais .....	28
Tabela 5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto. ....	48
Tabela 6 – Pilares da estrutura.....	55
Tabela 7 – Resumo armadura de punção da laje protendida. ....	57
Tabela 8 – Aço para execução da laje em concreto armado.....	58
Tabela 9 – Resumo aço em concreto armado .....	59
Tabela 10 – Dimensões e quantidades de formas para laje nervurada .....	61

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	41
---	----

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação de resistência de cálculo do concreto.....	63
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
2.1	CONCRETO ARMADO .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>História do concreto armado.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Características relacionadas ao concreto armado.....</b>	<b>22</b>
2.1.2.1	Aço utilizado em estruturas de concreto armado .....	25
2.1.2.2	Especificações dos concretos utilizados.....	27
<b>2.1.3</b>	<b>Vantagens e desvantagens da utilização do concreto armado.....</b>	<b>29</b>
2.2	CONCRETO PROTENDIDO .....	29
<b>2.2.1</b>	<b>História do concreto protendido .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Características relacionadas ao concreto protendido.....</b>	<b>32</b>
2.2.2.1	Métodos de aplicação da protensão .....	33
2.2.2.1.1	<i>Pré-tensão.....</i>	33
2.2.2.1.2	<i>Pós-tensão.....</i>	35
2.2.2.2	Níveis de protensão .....	40
2.2.2.3	Perdas de protensão .....	41
2.2.2.4	Aço utilizado em armaduras ativas.....	45
2.2.2.5	Especificações dos Concretos utilizados.....	47
<b>2.2.3</b>	<b>Vantagens e Desvantagens da utilização do concreto protendido .....</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1	LAJE .....	54
4.2	PILARES .....	54
4.3	ASSOALHAMENTO E ESCORAMENTO DA LAJE .....	55
4.4	AÇO UTILIZADO.....	56
4.5	CUBETAS PARA LAJE NERVURADA .....	60
4.6	CONCRETO .....	61
4.7	MÃO DE OBRA VS. TEMPO .....	65

<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a engenharia vem sendo gradualmente desafiada com os projetos idealizados, sendo constantemente exigido um nível de conhecimento maior para suas execuções, com isso o desenvolvimento de novas tecnologias se torna fundamental para acompanhar tal evolução. Um dos métodos construtivos desenvolvidos para suprir as demandas dos projetos, baseia-se na aplicação de tensões nas armaduras das estruturas em zonas onde haveria tracionamento no concreto.

O concreto protendido como viria a ser patenteado, resume-se em aplicar tensões no concreto em suas primeiras idades através de fios de aço envoltos em um material protetor, assim como afirma Pfeil (1984). “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” (PFEIL,1984, p.15).

Segundo Carvalho (2012), em relação ao concreto armado uma das vantagens do concreto protendido é o número consideravelmente menor e, em alguns casos, a completa eliminação de fissurações, já que por sua vez, tendo sido realizada a protensão de forma adequada, as tenções de tração do concreto são reduzidas e até anuladas. Outro benefício citado por esse autor sobre o uso do concreto protendido, são os ganhos significativos de vãos, possibilitando um posicionamento mais adequado dos pilares da edificação e proporcionando a execução de lajes cada vez com espessuras menores, assim facilitando questões arquitetônicas de projeto. Contudo o uso da protensão no concreto se torna mais viável economicamente em obras de grande porte, como pontes, edificações maiores e pisos industriais.

Devido as características técnicas aplicadas sobre esse tipo de material, Vítório e Barros (2011) recomendam que se faça uso de uma equipe qualificada e treinada para realizar as aplicações corretas da protensão, além de todo o equipamento fundamental para tal. Os procedimentos de execução de protensão devem ser seguidos de forma sistemática e cuidadosa, assim como o uso de uma mão de obra qualificada, diminuindo assim fissurações excessivas e evitando até mesmo o colapso da estrutura.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O sistema construtivo do concreto protendido segundo Almeida Filho (2002) já é uma opção muito difundida e comum no exterior, principalmente na América do Norte e Europa, onde se tem o registro da primeira patente sobre sistemas referentes a tecnologia

utilizada no concreto protendido, pertencente ao engenheiro P.H. Jackson e o desenvolvimento e aplicação das estimativas das perdas de protensão de Eugene Freyssinet.

No Brasil, de acordo com Zilli e Bortoloti (2013), ainda são poucas as pesquisas e até estruturas executadas em concreto protendido, quando comparado com o concreto armado. Ainda, existe um considerável atraso em relação ao seu uso no Brasil em relação aos outros países, por exemplo, na Alemanha após a segunda guerra mundial, teve o seu maior número de utilização dessa tecnologia para a época.

Tendo em mente o retardo na utilização desta tecnologia no Brasil e a escassez de recursos bibliográficos, se faz imprescindível pesquisas e estudos sobre as vantagens e desvantagens, métodos e aplicações, viabilidade financeira para assim ser possível desmistificar e ampliar o uso do concreto protendido em estruturas nacionais. Assim, se estabelece a seguinte questão de pesquisa: **Quais as diferenças entre uma laje executada em concreto protendido e em concreto armado em relação ao projeto estrutural, viabilidade técnica e a relação de produtividade?**

## 1.2 OBJETIVOS

Neste item serão apresentados os objetivos geral e específicos para realização do trabalho.

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo apresentar o método construtivo do concreto protendido em lajes, comparando com o uso do concreto armado.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Portanto os objetivos específicos são:

- Descrever o processo construtivo de cada método;
- Estudar a viabilidade técnica com o uso do concreto protendido em relação ao concreto armado;
- Levantar as diferenças estruturais do uso do concreto protendido em relação ao concreto armado;

- Analisar os motivos que foram levados em consideração para a escolha da aplicação do concreto protendido nas lajes da edificação estudada;
- Comparar as vantagens e ou desvantagens do método adotado na obra se a estrutura estivesse sendo executada em concreto armado.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e especificações do concreto armado, assim como do concreto protendido demonstrando suas histórias, características assim como as vantagens e desvantagens.

### **2.1 CONCRETO ARMADO**

A definição de concreto armado baseia-se em uma estrutura elaborada em concreto com a introdução de barras de aço no interior das peças concretadas. As armaduras têm como principal objetivo resistir aos esforços de tração, compensando a baixa resistência do concreto a esse tipo de esforço.

#### **2.1.1 História do concreto armado**

Segundo Kaefer (1998) um dos primeiros estudos sobre concreto armado dos quais existem registros é datado de 1850, quando o francês Joseph Louis Lambot teria realizado os primeiros testes práticos envolvendo o concreto e o aço. Um fato interessante sobre Lambot, é que em seus trabalhos como pesquisador, mesmo sendo considerado pioneiro no uso do concreto armado, suas ideias acabaram sendo mais utilizadas como orientação do que como modelos para uso.

O autor citado afirma que em 1867 Joseph Monier obtém a patente sobre o conceito do concreto armado, mas somente nos anos seguintes que vieram a ser desenvolvidas as primeiras estruturas executadas com a implementação da ideia, como reservatórios, escadas e até uma ponte medindo cerca de 16,5 metros de vão, esse seria o princípio do que seria conhecido atualmente como concreto armado.

O dimensionamento correto do aço para a utilização no concreto armado era e ainda é uma das grandes preocupações de estudiosos da área. Em 1902 Edward Mörsch professor da Universidade de Stuttgart na Alemanha, publica a primeira hipótese considerada sensata e fundamentada. As primeiras normativas estabelecidas para execução dos cálculos e estruturas relacionadas ao concreto armado foram definidas pelas hipóteses e ensaios experimentais realizadas por Mörsch, (BASTOS, 2019a).

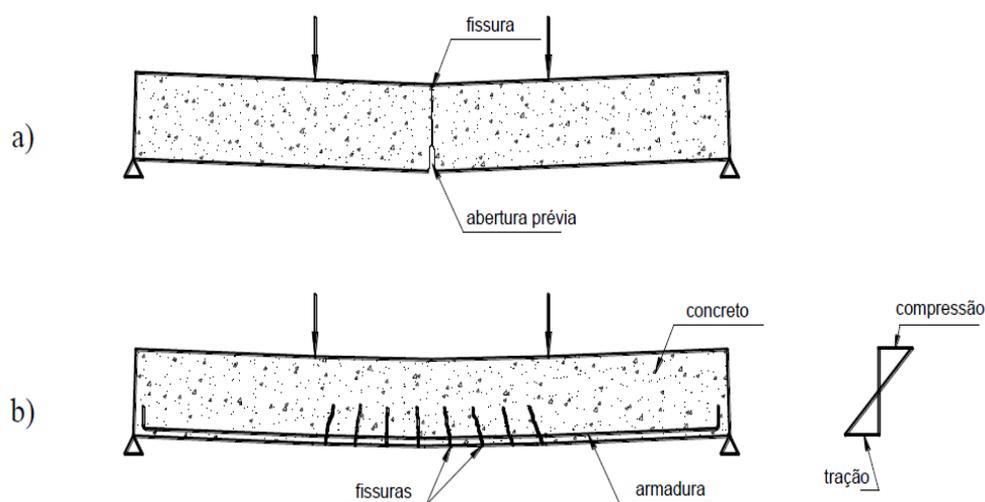
Bastos (2006) afirma que o primeiro a compreender e registrar os reais motivos da introdução das armaduras em meio ao concreto foi François Hennebique, projetista e calculista da primeira laje executada em concreto armado em 1880.

O concreto, como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais primariamente submetidos à compressão, como por exemplo os pilares, mas, por outro lado, suas características de fragilidade e baixa resistência à tração restringem seu uso isolado em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como tirantes, vigas, lajes e outros elementos fletidos. (BASTOS, 2019a, p. 1).

Bastos (2018) afirma que o concreto em si apresenta uma grande desvantagem técnica quando submetido aos esforços de tração, pois ele resiste apenas cerca de 8% a 15 % se comparado à sua resistência à compressão. Em contrapartida o aço apresenta uma grande resistência tanto tração quanto à compressão. Visando suprir as deficiências do concreto em relação a tração, a inserção do aço é realizada nas peças a serem concretadas. Vale constar que as deficiências do concreto citadas somente serão corrigidas com a adição do aço se dimensionados de forma adequada e executados corretamente.

Considerando a Figura 1 a seguir como modelo estrutural, é possível observar a relação carga-fissuração em peça composta totalmente em concreto sem o acréscimo do reforço do aço e a distinção da relação existindo a adição do aço em meio a estrutura.

Figura 1 – Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura.



Fonte: Bastos (2019a, p. 2).

Durante a primeira década do século XX, se dá início a difusão do conceito do concreto armado no Brasil, através de empresas estrangeiras já estabelecidas no país. Como vinha a ser uma ideia relativamente nova até mesmo em outros países, o concreto armado vem a ser utilizado de forma limitada, tendo maior emprego em estruturas como pontes e viadutos, segundo Santos (2008).

O autor completa que, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os Conselhos de Engenharia e Agronomia CONFEA e CREAs somente normatizaram o sistema construtivo do concreto armado nos anos de 1940, a partir de então o novo sistema começou a ser introduzido nos currículos dos cursos de engenharia e arquitetura nas universidades brasileiras.

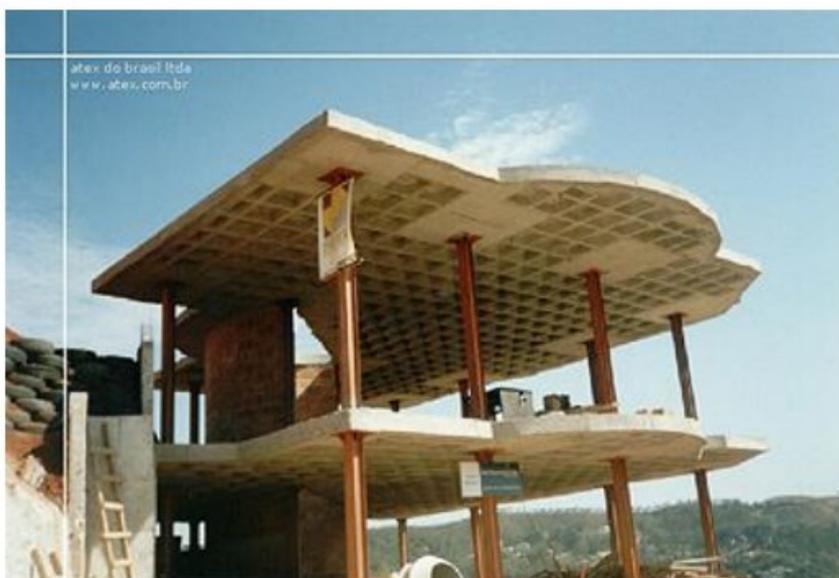
### 2.1.2 Características relacionadas ao concreto armado

Para a execução de uma estrutura ocorrer de forma adequada e segura, os padrões estabelecidos pelas normas devem ser seguidos, requisitos como diâmetro dos aços, resistência característica do concreto, modelo de estrutura entre outros fatores devem ser levados em consideração.

Tendo como exemplo o processo de construção de uma laje executada em concreto armado Silva (2005) afirma que a construção da mesma depende do tipo e das especificações empregadas no projeto da estrutura, variando em modelos, execução, localização, vão livre, entre várias outras particularidades. Ainda, nos dias atuais é possível a execução de lajes *in loco* e também o desenvolvimento dessas estruturas de modo pré-fabricado.

Assim, é possível destacar vários modelos de lajes em concreto armado, tais como, lajes maciças, nervuradas, lisas, pré-moldadas, entre outras. Um exemplo é demonstrado na Figura 2 a seguir onde é possível observar a parte inferior de uma laje nervurada já executada.

Figura 2 – Parte inferior de uma laje nervurada.



Fonte: Schwetz (2011, p. 2).

Além disso, especificações como diâmetro e disposições de armaduras, espessuras, vãos livres, peso, resistência do concreto a ser utilizado e forças cortantes devem ser analisadas com cuidado para uma execução correta. Como meio de padronização das especificações citadas, é aconselhável o acompanhamento da NBR 14931 (ABNT, 2004) e NBR 9062 (ABNT, 2017), nelas estão dispostos todos os procedimentos necessários para uma execução apropriada e segura de lajes sendo *in loco*, ou pré-moldadas.

De acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) é imprescindível o detalhamento adequado em projeto, para que seja assegurado a disposição correta no momento da concretagem, assim evitando manifestações patológicas que possam vir a surgir ao longo do tempo na edificação, onde devem ser averiguadas para que seja possível uma intervenção antes que a mesma venha a ruptura.

Gonçalves (2015) cita algumas manifestações patológicas que podem ser encontradas em estruturas, sendo geralmente encontradas com maior facilidade fissurações e corrosões das armaduras.

O autor supracitado comenta que a fissuração pode ser descrita como aberturas que aceleram o processo de entrada de agentes agressivos à estrutura. A fissuração pode ocorrer por diversos fatores, sendo por tensão à tração ou à compressão excessivas, retração hidráulica, variação de temperatura, flexão, cisalhamento, torção e punção. Vale lembrar que nem todas aplicam perigo imediato de ruptura a estrutura, mas todas devem ser verificadas e analisadas com cautela, para que possa ser assegurado a sua estabilidade.

Ainda sendo adicionado pelo autor, no caso de corrosão das armaduras também é possível determinar diversas causas, entre elas má execução da concretagem e do cobrimento de armaduras, falta de manutenção apropriada, ambiente agressivo entre outros. Quando ocorre a corrosão na armadura o aço ali presente tende a se expandir fazendo com que o concreto tencione e fissure, deixando uma quantidade ainda maior da armação da estrutura exposta, facilitando a entrada a agentes agressivos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina valores mínimos de cobrimento em relação ao método construtivo, a peça a ser executada e a classe de agressividade ambiental, como demonstrado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Cobrimento nominal em relação a classe de agressividade.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
	Laje	20	25	35	45
Concreto armado	Viga/ Pilar	20	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/ Pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 20).

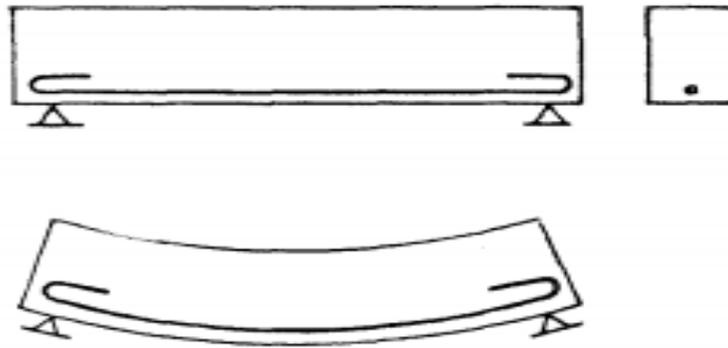
Fato interessante de ser lembrado é que a norma acima mencionada permite que os valores de cobrimento nominais sejam diminuídos em 5 mm em estruturas com utilização de concretos de resistências mais elevadas.

Os autores Pinheiro e Giongo (1986) comentam sobre a retração relacionada ao concreto, ocorrendo tanto em estruturas armadas e protendidas. Assim, “denomina-se retração a redução de volume que ocorre no concreto, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variações de temperatura” (PINHEIRO; GIONGO, 1986, p. 20).

Os autores ainda comentam uma série de fatores que podem levar o concreto a sofrer retração, tais como composição química do cimento afirmando que cimentos que apresentam maiores resistências assim como os de endurecimento rápido apresentam uma maior probabilidade que ocorra retração.

Estruturas executadas em concreto armado, sofrem com tensões aplicadas em sentido vertical, onde com a aplicação do aço de forma correta segundo Bastos (2019a) é possível evitar o fissuramento da estrutura. Entretanto, se torna muito importante a afirmação de Pinheiro e Giongo (1986), onde é dito que mesmo com a aplicação do aço aderente ao concreto na peça, a mesma tende a sofrer deformações a partir do momento de imposição de cargas sobre a estrutura, resultando em um alongamento nas fibras inferiores e um encurtamento nas fibras superiores no sentido de um momento fletor positivo, ou seja, ocorrendo tensões de tração na seção inferior da peça e tensões de compressão na seção superior, como pode ser observado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Deformação em modelo de peça executada em concreto armado.



Fonte: Pinheiro e Giongo (1986, p. 8).

Ainda o autor complementa que o aço presente na estrutura tende a sofrer as mesmas tensões ocorridas no concreto, no entanto a armadura tende a apenas se alongar e se encurtar permitindo a trabalhabilidade necessária para que a estrutura não apresente fissurações excessivas.

#### 2.1.2.1 Aço utilizado em estruturas de concreto armado

Em relação ao aço utilizado em estruturas de concreto armado, as características e definições são estabelecidas no Brasil pela NBR 7480, onde os vergalhões utilizados são classificados como *barras* tendo as categorias CA-25 e CA-50 e em *firos* tendo a categoria CA-60. Segundo o autor Bastos (2019b) o aço deve ter a capacidade de se aderir ao concreto lançado na estrutura. São estabelecidas pela normativa NBR 6118 (ABNT, 2014) três tipos de superfície que dependendo de sua rugosidade apresentam valores de coeficientes diferentes para cálculo, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor do coeficiente de aderência

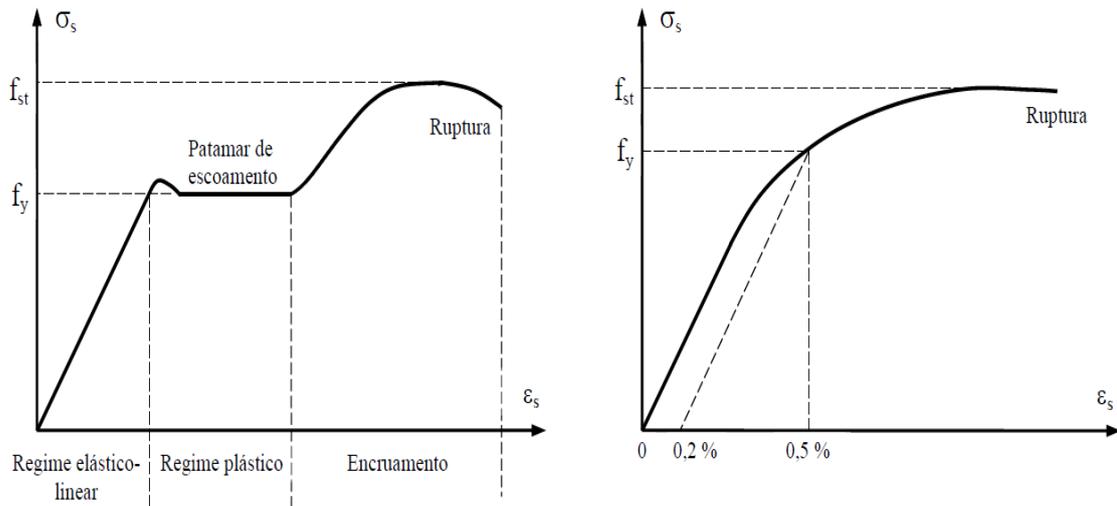
<b>Tipo de superfície</b>	<b><math>\eta</math> 1</b>
<b>Lisa</b>	1,0
<b>Entalhada</b>	1,4
<b>Nervurada</b>	2,25

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 29).

Bastos (2019b) ainda comenta sobre a relação tensão-deformação, onde as categorias comentadas anteriormente possuem patamares de escoamentos diferentes entre si, dando relação ao seu uso.

As características das categorias dos aços são expostas no Figura 4 a seguir, demonstrando o ponto de passagem entre o patamar de escoamento para o regime de ruptura.

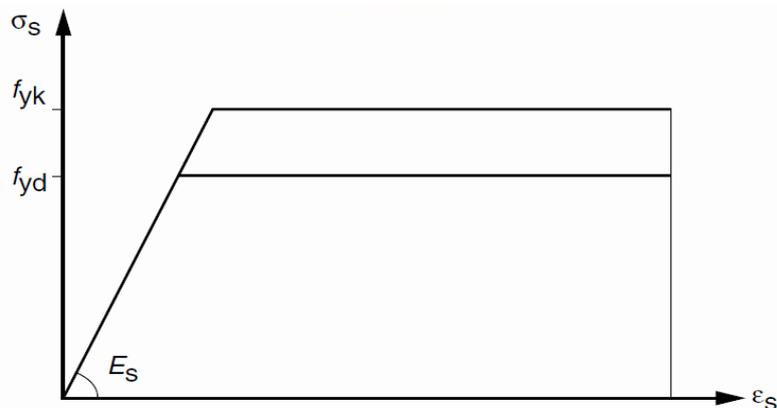
Figura 4 – Relação tensão x deformação; a) Aços CA-25 e CA-50 b) Aço CA-60.



Fonte: Bastos (2019b, p. 77).

Fato interessante a ser comentado é que a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite que para efeitos de cálculo de *Estados-Limites* tanto de *Serviço* como *Último* seja utilizado a relação tensão x deformação apresentada pela Figura 5, onde pode ser observado uma relação simplificada entre as variáveis.

Figura 5 – Relação tensão x deformação simplificada.



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 29).

Em relação aos aços utilizados, Bastos (2019a) ainda alerta que os catálogos dos fabricantes devem ser consultados previamente, ainda que as siderúrgicas atendam as regulamentações estabelecidas pela NBR 7480, peculiaridades da empresa podem estar presentes no aço, como a soldabilidade e diâmetros disponíveis.

Segundo a NBR 7480 (ABNT, 2007) o diâmetro dos aços usados principalmente para execução de obras com o método convencional, estão disponibilizados no mercado nos dias atuais os seguintes diâmetros, expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Diâmetros de fios e barras estabelecidas pela norma NBR 7480.

Diâmetro (mm)		Massa (kg/m)	Área (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)
Fios	Barras			
2,4	-	0,036	4,5	7,5
3,4	-	0,071	9,1	10,7
3,8	-	0,089	11,3	11,9
4,2	-	0,109	13,9	13,2
4,6	-	0,130	16,6	14,5
5	5	0,154	19,6	17,5
5,5	-	0,187	23,8	17,3
6	-	0,222	28,3	18,8
-	6,3	0,245	31,2	19,8
6,4	-	0,253	32,2	20,1
7	-	0,302	38,5	22,0
8	8	0,395	50,3	25,1
9,5	-	0,558	70,9	29,8
10	10	0,617	78,5	31,4
-	12,5	0,963	112,7	39,3
-	16	1,578	201,1	50,3
-	20	2,466	314,2	62,8
-	22	2,984	380,1	69,1
-	25	3,853	490,9	78,5
-	32	6,313	804,2	100,5
-	40	9,865	1256,6	125,7

Fonte: Bastos (2019a, p. 30).

Bastos (2019a) ainda comenta, sobre a utilização de arames para *amarrações* dos aços da estrutura. Normalmente para a armadura são usados os arames com diâmetros de 1,25 mm, 1,65mm e para as amarrações realizadas nas formas da estrutura são geralmente utilizados os de diâmetro de 2,76 mm.

#### 2.1.2.2 Especificações dos concretos utilizados

Giovanaz e Fransozi (2017) afirmam que o concreto consiste substancialmente de cimento Portland, água, agregado miúdo, como areia, e agregado graúdo, como pedrisco e ou

brita. Allen e Iano (2013) acrescentam que principalmente na composição de concretos usinados, onde o controle tecnológico é mantido com maior cuidado e seriedade, visando um padrão de qualidade, o uso de aditivos industrializados é comum para aprimoramento do concreto, redução do consumo de água, aumento de resistência ou a aplicação de uma característica especial além das citadas é recorrente.

A norma NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica os concretos para fins estruturais em dois grupos, de acordo com as NBR 5738 e NBR 5739, como pode ser notado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Classes e resistências de concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015, p. 2).

O valor de resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) do concreto deve sempre ser levado em consideração para uma execução adequada de qualquer estrutura. Bastos (2019a) afirma que o engenheiro estrutural deve especificar em projeto a resistência a compressão de cada peça, necessária para suportar as tensões aplicadas no concreto do momento de desforma e até o fim da vida estrutural da edificação. O método de comprovação da resistência especificada em projeto é definido pelas normas NBR 5738 (ABNT, 2016) e NBR 5739 (ABNT, 2018). Assim, baseia-se na moldagem de corpos de provas cilíndricos e com a cura adequada de 28 dias, que após a conclusão do processo os mesmos devem ter as superfícies retificadas para no momento seguinte serem impostos ao ensaio de compressão de corpos de prova. O valor obtido pelo ensaio deve se manter no mínimo igual ou acima da resistência estabelecida para peça, em caso de falha o engenheiro estrutural deve ser contatado imediatamente para ser discutida a solução a ser tomada.

### **2.1.3 Vantagens e desvantagens da utilização do concreto armado**

O uso de armaduras introduzidas em meio ao concreto já é algo extremamente difundido na construção civil, abrangendo mundialmente inúmeras estruturas executadas com a tecnologia. O concreto como já descrito acima possui grandes resistências a compressão e com o auxílio do aço, os esforços a tração são combatidos, entretanto vale lembrar que como citado por Brandão (1998) a fissuração se apresenta em praticamente todas as estruturas de forma persistente, contudo a armadura não será afetada se as espessuras das aberturas procederem como consideradas em projeto.

Bastos (2006) afirma que se elaborado e aplicado de forma correta, o uso do concreto em si apresenta diversas vantagens, entre elas, fácil aplicabilidade beneficiando a arquitetura da estrutura, uma considerável taxa de durabilidade mesmo exposto a intempéries, um alto grau de impermeabilidade se executado adequadamente, além de com a alta procura para execução desse modelo de construção, o aço utilizado acabou por se tornar extremamente acessível.

Além disso Pacheco e Ribeiro (2018) complementam que o uso do concreto armado ainda apresenta outras vantagens como, resistência ao fogo, resistência à fadiga estrutural – levando em conta que seja realizada uma execução conforme proposta em projeto e agilidade no processo construtivo. Entretanto, os autores supracitados ainda colocam em evidência algumas desvantagens do uso do concreto armado em estruturas. O concreto apresenta um peso específico de  $24 \text{ kN/m}^3$ , onde variando do volume utilizado é possível apresentar cargas elevadas na estrutura. Outras desvantagens mencionadas pelos autores são as fissurações por esforços e as dificuldades com reformas e modificações nas estruturas.

## **2.2 CONCRETO PROTENDIDO**

De forma superficial o ato de protender baseia-se na prática da aplicação de tensões no concreto através de aços específicos para o uso. As tensões são previamente calculadas e administradas, tornando possível que a estrutura apresente características especiais que de modo geral facilitam questões de usabilidade, arquitetônicas e até econômicas.

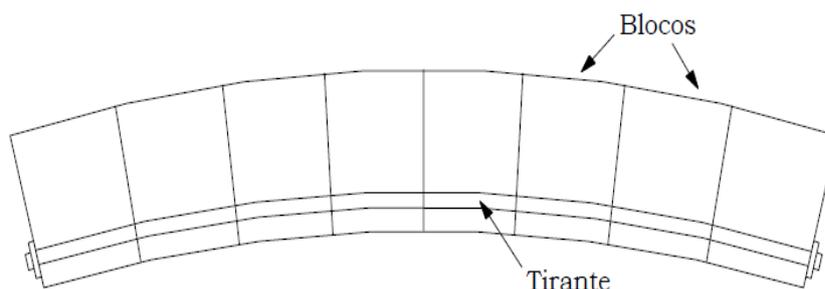
## 2.2.1 História do concreto protendido

A patente requerida sobre o primeiro sistema relacionado ao concreto protendido tem sua data divergida entre autores, segundo Almeida Filho (2002), o conceito é datado em 1872, entretanto segundo Veríssimo e César Jr. (1998a) a ideia só veio a ser apresentada no ano de 1886.

De um modo geral a patente está situada entre os anos de 1800 a 1900, sendo esta pertencente ao engenheiro norte-americano P.H. Jackson, responsável pelo método da inserção de tirantes de aço para junção de blocos individuais, entretanto é importante ressaltar que este início no conceito de protensão não obteve bons resultados, (ALMEIDA FILHO, 2002).

A introdução dos tirantes de aço realizada por P.H. Jackson em meio aos blocos, com o objetivo de obter arcos através de junção das peças, pode ser demonstrada em modelo como na Figura 6 a seguir.

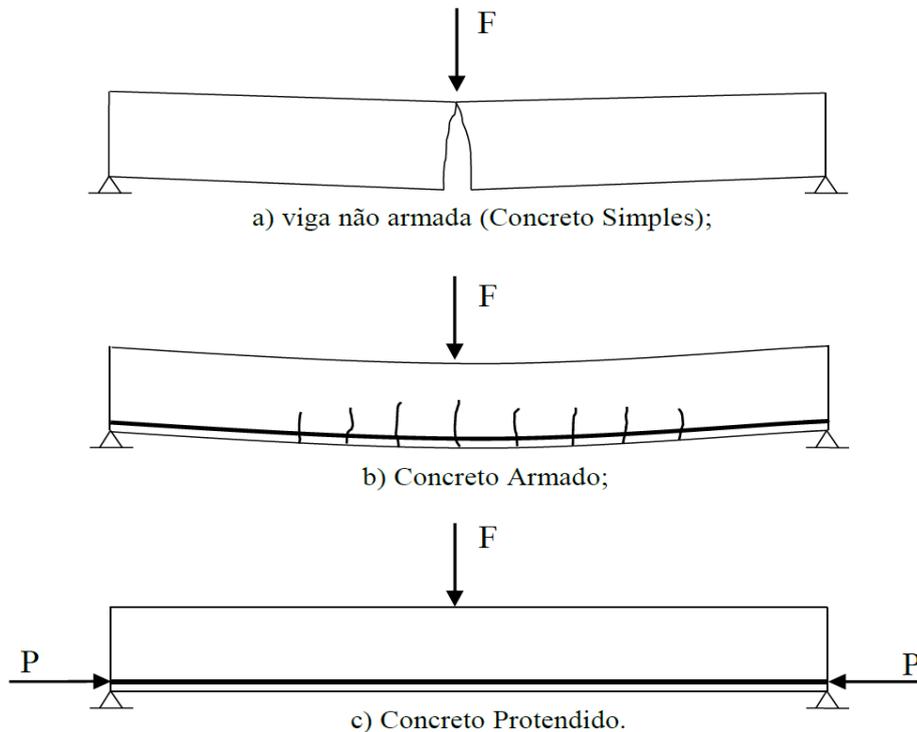
Figura 6 – Modelo utilizado por P.H. Jackson.



Fonte: Almeida Filho (2002, p. 5).

O desenvolvimento do conceito de concreto protendido como comentado não obteve resultados que podem ser considerados completamente positivos, Castro (2011) ainda afirma que várias foram as tentativas fracassadas antes de ser obtidas conclusões definitivas, as falhas derivavam principalmente devido as perdas de protensão ao longo do tempo. Veríssimo e César Jr. (1998a) citam o desenvolvimento da primeira ideia consolidável em 1928 pelo engenheiro francês Eugene Freyssinet, responsável pelos cálculos utilizados para a determinação dos valores de perda de protensão e também pela elaboração de métodos construtivos, equipamentos, uso de aços especiais e concretos com maiores resistências. A Figura 7 mostra uma relação entre três tipos de vigas, sendo elas sem armadura, executada em concreto armado e uma viga executada em concreto protendido, demonstrando a fissuração ocorrida em cada uma ao longo do tempo.

Figura 7 – Viga de concreto: a) sem armadura; b) executada em concreto armado; c) executada em concreto protendido.



Fonte: Bastos (2019b, p. 3).

Durante o período da Segunda Guerra Mundial, era necessário a construção rápida e eficiente de pontes e outras estruturas que haviam sido destruídas ou afetadas. Com isso o concreto protendido ganha espaço entre os métodos construtivos da época, tendo grandes investimentos no desenvolvimento na produção do aço a ser utilizado para protensão (BASTOS, 2019b).

Castro (2011) afirma que o uso do novo conceito tecnológico nos anos seguintes teve suas maiores aplicações na região europeia, entretendo o maior desenvolvimento tanto em questão tecnológica como em seus empregos se dá nos Estados Unidos e na Austrália, levando indústrias locais a fabricação de equipamentos para a utilização mais apropriada do recente método. Na década de 50 o concreto protendido foi extremamente utilizado na execução de lajes nos Estados Unidos, possibilitando ser obtido maiores controles sobre as deformações e a construção de edificações em menor tempo.

No Brasil um marco histórico relacionado ao uso do concreto protendido é referente a construção da ponte Galeão em 1948 com 380 metros de extensão, considerada a maior estrutura executada para a época, este projeto teve a participação de Eugene Freyssinet dando assistência ao projeto. Outro ponto para ser levado em consideração é referente ao projeto e aos materiais, que foram totalmente importados da França já que na época o Brasil não possuía os materiais necessários para elaboração de estruturas protendidas. Somente em 1952 a companhia

siderúrgica Belgo-Mineira iniciou a produção de aços específicos para uso em protensão e a partir de então o uso do concreto protendido em estruturas vem sendo realizado com uso de materiais de origem brasileira, como mencionam Veríssimo e César Jr., (1998a).

Lima e Silva (2019) afirmam que Oscar Niemeyer também deve ser lembrado pelo uso deste sistema construtivo no Brasil na estrutura da ponte Costa e Silva, como pode ser visto na Figura 8 a seguir.

Figura 8 – Vista lateral da ponte Costa e Silva.



Fonte: Fonseca (2007, p. 15).

Executada em 1976 em balanços consecutivos visando vencer vãos de 200 metros e não expor os pilares de fundação por motivos de estética, a estrutura foi executada utilizando o concreto protendido transformando-se em um salto gigantesco em direção ao progresso para o novo método.

Outras estruturas possíveis de destacar, tendo relação com o uso do concreto protendido entre as décadas de 50 e 80 são o Museu de Arte de São Paulo – MASP e o Viaduto Beneficência Portuguesa também em São Paulo (ALMEIDA FILHO, 2002).

### **2.2.2 Características relacionadas ao concreto protendido**

O uso do concreto protendido apresenta diversos tópicos significativos que devem ser considerados em projeto, para assegurar uma elaboração adequada e segura da estrutura. Características como métodos de aplicação da protensão, níveis de protensão, especificações de aços e dos concretos utilizados, perdas de protensão, estados limites e ainda ações ocasionadas na estrutura, entre outros, devem ser planejadas e verificados antes mesmo da execução, promovendo um bom comportamento da peça.

Tendo como um exemplo é possível citar segundo Bastos (2018), alguns modelos de lajes que podem ser elaboradas com uso do conceito do concreto protendido, tais como lajes alveolar, lajes nervuradas, maciças além de vigotas pré-moldadas.

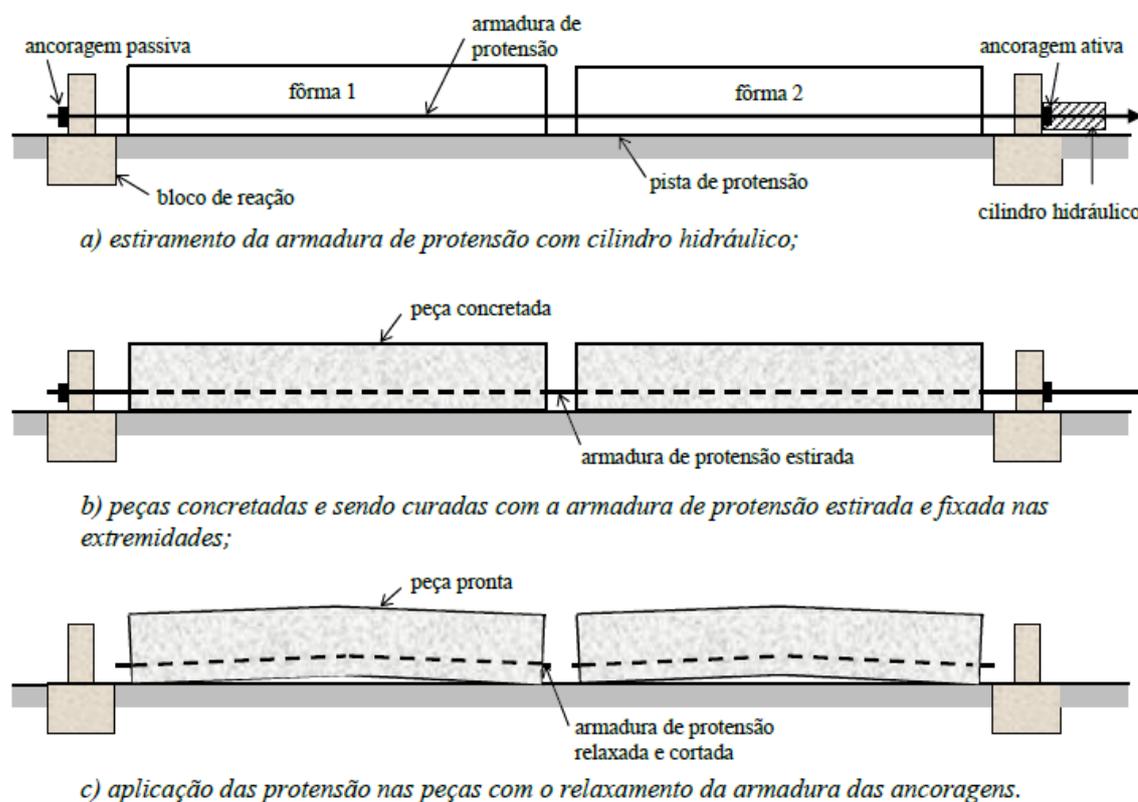
#### 2.2.2.1 Métodos de aplicação da protensão

A execução do concreto protendido utiliza aços diferentes além dos utilizados em estruturas de concreto armado. A chamada *armadura passiva* empregada no concreto protendido é a mesma utilizada no concreto armado, entretanto seu uso não é aplicado com a mesma finalidade, já a *armadura ativa* como se tornou conhecida tem a função de suportar o tensionamento nela aplicado, fazendo com que o concreto em contato com ela fique em estado de compressão. A aplicação da protensão é dividida em dois grupos principais, quando aplicado o tensionamento no aço antes da concretagem é denominado *pré-tensão* e quando a peça é concretada e posteriormente é aplicada a tensão no aço denomina-se *pós-tensão*, como descrito por Bastos (2019b).

##### 2.2.2.1.1 Pré-tensão

Segundo Bastos (2019b) o método de pré-tensionamento tem seu maior uso em estruturas pré-moldadas, de forma que para o estiramento do aço utilizado na peça se é empregado as chamadas pistas de protensão, onde o aço é acomodado para ser tensionado, conforme figura 9.

Figura 9 – Esquema simplificado de pista de protensão para fabricação de peças protendidas com pré-tensão.



Fonte: Bastos (2019b, p. 14).

Assim, de acordo com a figura apresentada, as cabeceiras de ancoragem estão localizadas nas extremidades da pista de protensão, para que após serem dispostos os cabos de aço, seja realizada a fixação em uma das cabeceiras, assegurando a imobilização, sendo chamada de *ancoragem passiva*. Em seguida na extremidade oposta após o posicionamento adequado, com o auxílio de um macaco hidráulico o aço é então estirado, ou seja, as forças de tensionamento de tração são aplicadas, sendo esta chamada de *ancoragem ativa*.

Após o estiramento completo do aço, são introduzidas na peça as formas para moldagem da estrutura e as armaduras passivas que farão um papel complementar em conjunto com a armadura ativa, em seguida a peça é então concretada, ocorrendo então a aderência com o aço ali disposto. Para dar continuidade ao processo de pré-tensionamento da peça é necessária uma resistência mínima do concreto de 21 MPa, como descrito pela norma NBR 9062 (ABNT, 2017). Assim, a ancoragem ativa é então liberada e levando em consideração que no pré-tensionamento não são utilizadas placas de ancoragem (somente para o alongamento do aço), o aço estirado tende a voltar a sua posição inicial, fazendo com que o contato com o concreto gere atrito e protenda a peça, por meio deste processo o método recebe o nome de pré-tensão

com aderência inicial. O método pode ser observado com maior detalhamento na Figura 9 abaixo.

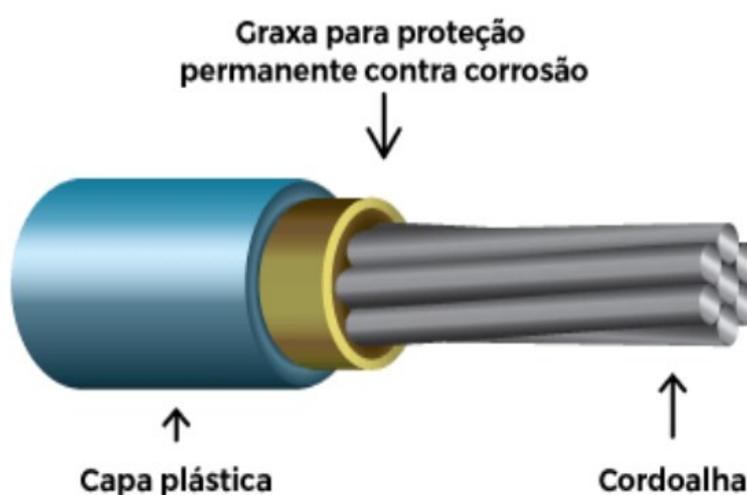
#### 2.2.2.1.2 Pós-tensão

Conforme citado, existe também o método de pós-tensionamento, este pode ser realizado de forma aderente e não aderente ao concreto. Para este sistema, os métodos utilizados variam entre o uso de *cordoalhas engraxadas* (não aderentes), *bainhas metálicas* (aderente) e ainda se torna possível a protensão realizada de forma externa a estrutura com o uso de *cordoalhas* (não aderente).

Entre os métodos comentados os procedimentos progridem de forma semelhante, como já comentado, a aplicação da protensão da armadura somente será realizado após a cura do concreto lançado na estrutura, em outras palavras todas as formas, ancoragens e armaduras passivas e ativas serão posicionadas respectivamente conforme projeto, em seguida a peça é então concretada para que após atingida a resistência necessária, as forças de tensionamento de tração exercidas pelo macaco hidráulico sejam finalmente aplicadas ao aço.

A denominação cordoalhas engraxadas, segundo ArcelorMittal (2020) baseia-se na utilização de uma cordoalha de aço lubrificada com graxa e envolvida por uma capa plástica protetora. A Figura 10 a seguir mostra em corte o interior das cordoalhas de aço engraxadas.

Figura 10 – Modelo de cordoalha engraxadas com 7 fios.



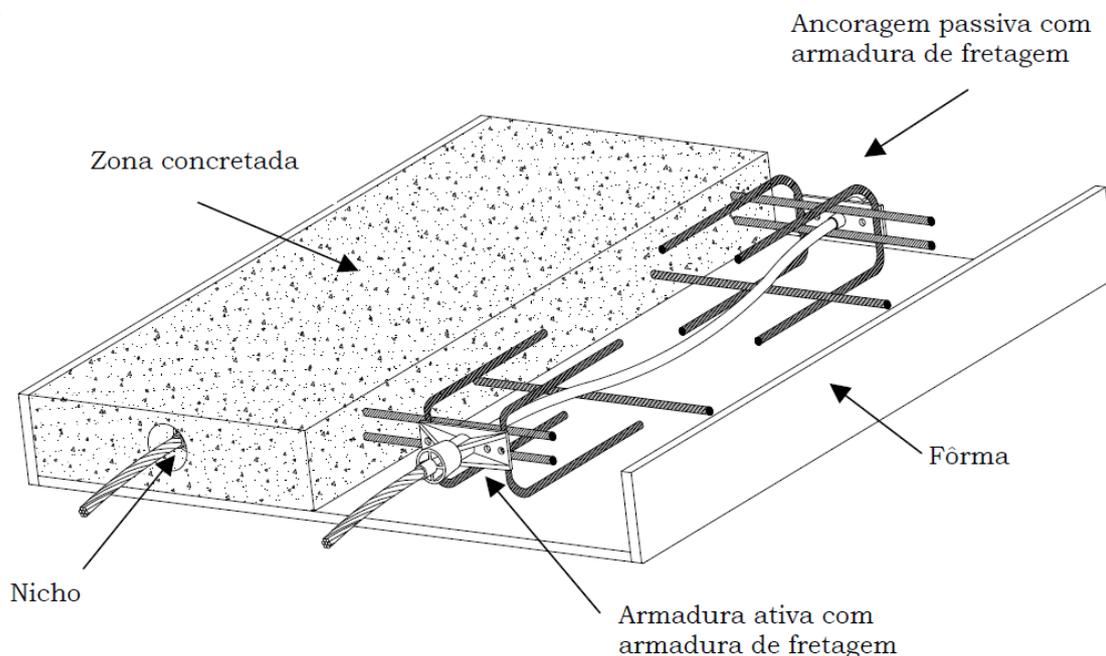
Fonte: Almeida Filho (2002, p. 8).

Devido a esse envolvimento da cordoalha em meio a graxa, a mesma não possui contato com o concreto em si, ou seja, a aderência entre os fios de aço e a peça concretada não

existe, a protensão se dá através de equipamentos dispostos nas extremidades da estrutura. Vale lembrar que como os fios estão envoltos de graxa, uma proteção durável contra corrosão ainda é aplicada de forma indireta, complementa Almeida Filho (2002). Bastos (2019b) ainda acrescenta que para a execução correta da protensão as cordoalhas, com o auxílio de equipamentos apropriados, são primeiramente fixadas em uma das extremidades da peça (ancoragem passiva), para então haver o lançamento do concreto envolvendo as armaduras, para posteriormente as cordoalhas serem estiradas e ancoradas na extremidade oposta (ancoragem ativa) fazendo com que assim que seja retirado o macaco hidráulico, a ancoragem aplique o tensionamento de compressão na peça concretada através das cordoalhas estiradas. A figura 11 traz o processo construtivo deste método.

*“Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência (protensão sem aderência) concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizadas, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, mas não sendo criada aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados” (NBR 6118, ABNT, 2014, p. 4)*

Figura 11 – Modelo de ancoragem do método não aderente utilizando de cordoalha engraxadas.



Fonte: Almeida Filho (2002, p. 56).

Para o método de pós-tensionamento aderente, o processo segue parcialmente os mesmos procedimentos como comentado anteriormente, entretanto difere do uso das cordoalhas engraxadas, neste método são aplicadas bainhas metálicas afirma Bastos (2019b).

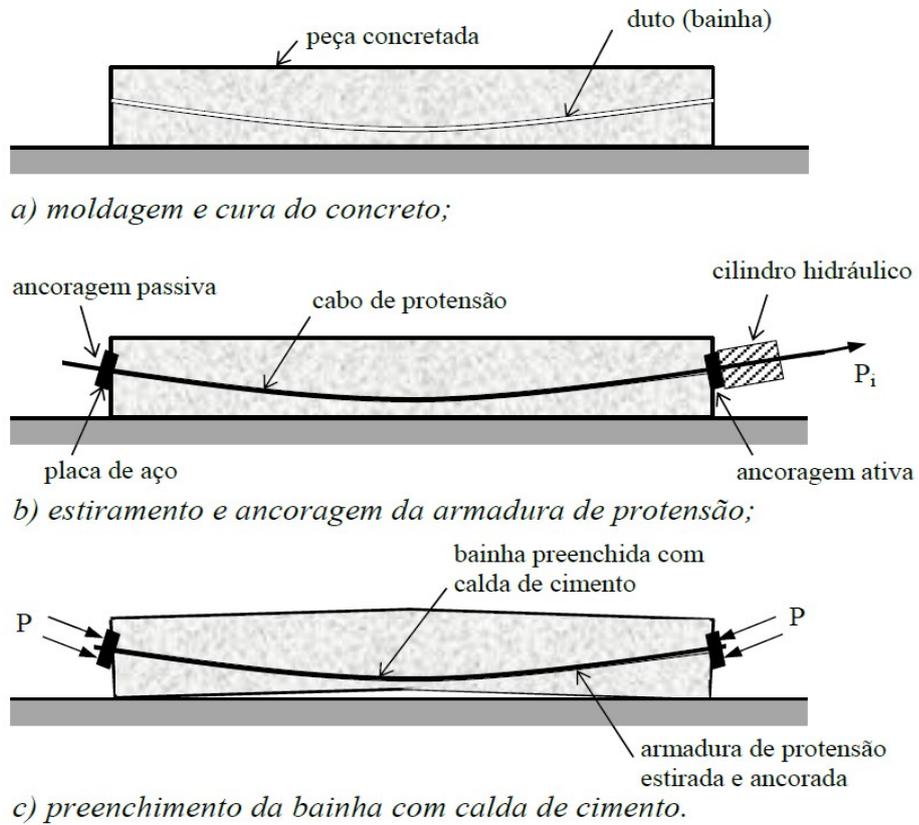
A estrutura é montada sendo que em meio as armaduras passivas são dispostas bainhas metálicas sendo elas lisas ou onduladas, para que assim que o concreto se apresentar visivelmente enrijecido seja possível a introdução das cordoalhas de aço através das bainhas, complementa o autor.

Diferente do método de pré-tração, neste caso não ocorre a aderência inicial entre as cordoalhas introduzidas nas bainhas e a peça já concretada, contudo, a aderência é exercida posteriormente, através da aplicação de nata de cimento nas bainhas metálicas.

Bastos (2019b) ainda comenta que após ser atingido a resistência prescrita em norma, as ancoragens passivas e ativas são realizadas sequencialmente para que então as cordoalhas sejam estiradas, em seguida a força de tensionamento de tração exercida pelo macaco hidráulico é anulada, com isso as cordoalhas tensionadas tendem a voltar a sua posição inicial, a partir deste ponto os encurtamentos do aço são determinados e então analisados, para que em seguida as tensões sejam novamente aplicadas normalmente por poucos milímetros e depois as cordoalhas são então fixadas através de cunhas nas placas de ancoragem, para que assim seja atingindo e mantido o estiramento dimensionado em projeto. Após realizado todo o processo descrito é então injeto no interior das bainhas a nata de cimento dando a relação de aderência entre o cabo estirado e a peça concretada.

Em modelo é demonstrado na Figura 12 o processo de execução do método de protensão com a escolha da bainha metálica, exemplificando a sequência do momento de concretagem até o preenchimento com a nata de cimento para aderência.

Figura 12 – Modelo do método aderente utilizando bainha metálica.



Fonte: Bastos (2019b, p. 21).

Para demonstração de estrutura de fixação a Figura 13 apresenta uma placa de ancoragem das cordoalhas, sendo esta para um número de doze cabos de protensão e não possuindo abertura para introdução da nata de cimento.

Figura 13 – Placa de aço para ancoragem de cordoalhas.



Fonte: Bastos (2019b, p. 22).

Ainda em casos especiais o uso de métodos que utilizam de armadura ativa introduzida em meio a peça concretada muitas vezes são substituídos pela opção de protensão externa da estrutura. Sendo esta opção mais empregada em execução de pontes e ainda mais em reforços de estruturas já executadas, como é possível observar em seção na Figura 14 e Figura 15 tendo em benefício um considerável aumento da resistência de carga máxima na mesma, tornando esta opção muito atraente para ser utilizada, afirma Bastos (2019b).

Figura 14 – Cabos de protensão externa em seção de uma ponte.



Fonte: Bastos (2019b, p. 28).

Fato interessante comentando por Bastos (2019b) é que para execução desse modelo de protensão, não necessariamente nem toda a armadura ativa deve estar localizada externamente a peça concretada, sendo possível haver armaduras ativas, passivas ou até mesmo ambas em meio ao concreto, sendo que apenas as posicionadas externamente podem ser completamente revisadas e ou até mesmo substituídas após tempo de uso ou por falha ou perca de protensão.

Figura 15 – Cabos de protensão externa em seção de ponte, aplicando reforço estrutural.



Fonte: Bastos (2019b, p. 28).

O uso da protensão externa no Brasil segundo Pinheiro (2018) se torna algo extremamente vantajoso, partindo do princípio que a malha rodoviária é a principal via para transporte de mercadorias em todo o país, possuindo em diversos pontos pontes com necessidades de melhorias em sua capacidade de carga.

#### 2.2.2.2 Níveis de protensão

O uso do concreto protendido segundo Veríssimo e César Jr. (1998a) além de dividido em métodos de aplicação da protensão, também se é caracterizado pelos seus níveis, tipos ou graus de protensão, sendo eles parciais, limitados ou completos.

Os níveis estão dispostos de acordo com as classes de agressividades dos ambientes e as exigências relativas a fissuração, como descrito na NBR 6118 (ABNT, 2014) e demonstrado na Quadro 1, a intenção é evitar fissuramentos excessivos por considerações erradas em projeto, além de que tirando como exemplo o uso de uma *protensão completa* em um meio considerado *não agressivo*, se tornaria economicamente superior de modo que se analisada apenas essa característica não haveria necessidade para tal.

Quadro 1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Nível de protensão	Tipo de protensão	CAA	Verificações (ELS)	Combinações de ações
1 (parcial)	Pré-tração	I	ELS-W	CF
	Pós-tensão	I e II		
2 (limitado)	Pré-tração	III	ELS-F	CF
	Pós-tensão	III e IV	ELS-D	CQP
3 (completo)	Pré-tração	III e IV	ELS-F	CR
			ELS-D	CF

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 80).

O nível protensão *parcial* segundo Zilli e Bortoloti (2013) admite tensões de tração mais elevadas ocasionando fissurações no concreto. Normalmente esse nível de protensão deve ser utilizado apenas para ambientes considerados com baixo grau de agressividade, e respeitando o estado limite de serviço de abertura de fissuras – ELS-W, como imposto pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

A norma supracitada também determina o nível de protensão *limitado*, este normalmente é utilizado em sistemas de pré-tração para meios com agressividades moderadas e considerando seu estado limite de serviço de fissuração (ELS-F) e de pós-tração, para meios com o nível de agressividade alto, onde também é especificado o estado limite de serviço de descompressão (ELS-D).

Para ambientes classificados com um grau agressividade alto e ou muito alto a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda o uso protensão *completa*. Neste caso faz-se uso do sistema de pré-tração onde se aplica os mesmos estados-limites estabelecidos para o nível limitado, entretanto se torna importante salientar que não se deve ultrapassar o estado limite de descompressão (ELS-D), mantendo a tensão em um ou mais pontos de seção transversal nula e não se admitindo tensões de tração na seção.

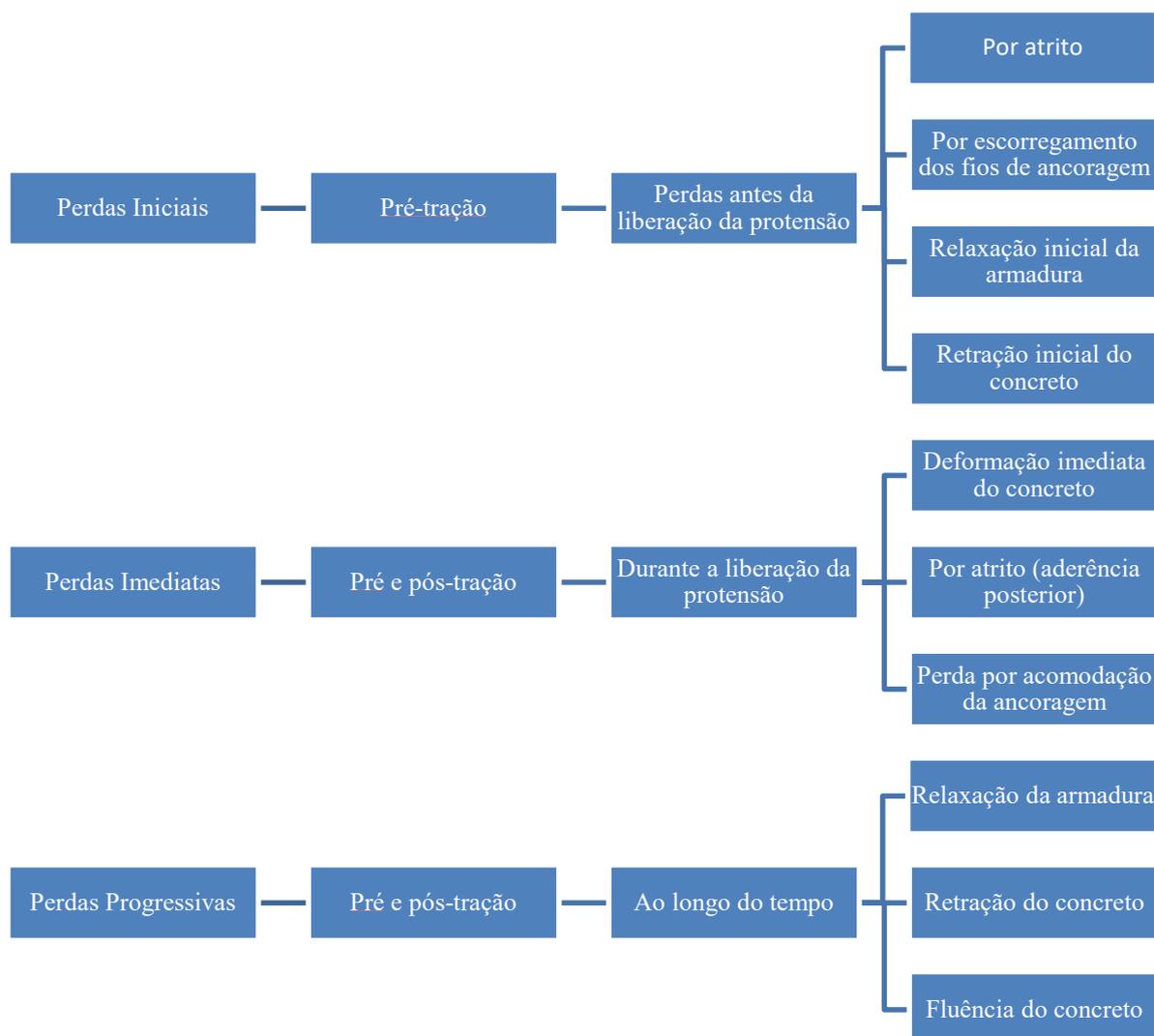
### 2.2.2.3 Perdas de protensão

A NBR 6118 (ABNT, 2014) alerta sobre as perdas de protensão que podem e ocorrem antes, durante e após a execução do método de protensão.

Todas as perdas devem ser antecipadas no momento de desenvolvimento do cálculo de protensão, fazendo com que seja segura a aplicação do método escolhido. Como pode ser

observado na Figura 16, as perdas de protensão estão divididas em *perdas iniciais* sendo elas sofridas apenas na pré-tração, *perdas instantâneas* ocorridas durante o processo de protensão e também imediatamente após o término do processo de protensão e em *perdas progressivas* que decorrem do esforço do aço ao longo do tempo.

Figura 16 – Modelo divisão entre perdas de tração.



Fonte: Autor (2020).

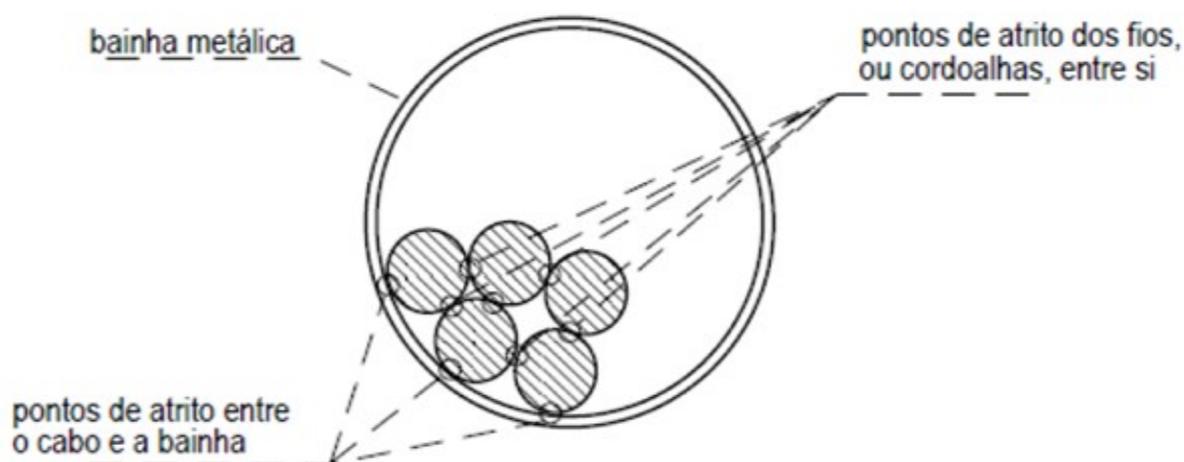
As perdas iniciais ocorrem apenas no sistema de pré-tração, e estas acontecem antes da liberação da força de protensão. Tais perdas podem ser devido ao atrito gerado nos desvios da armadura, pelo escorregamento que a armadura que está sendo protendida pode sofrer – neste caso o método de avaliação deve ocorrer de modo experimental de acordo com o tipo de aparelho utilizado e ou pelos valores recomendados pelo fabricante – tem-se também as perdas ocasionadas pela relaxação inicial do aço e pela retração inicial do concreto, sendo estas decorrentes do tempo decorrido entre o alongamento do aço e concretagem da peça até o momento de liberação do equipamento utilizado para protensão, como comentado pela NBR

6118 (ABNT, 2014). Ainda, Cholfe e Bonilha (2018) comentam que estas perdas são comumente compensadas pelos fabricantes de peças pré-moldadas através do aumento da força de protensão inicial.

Já as perdas imediatas, ou seja, aquelas que ocorrem durante a transferência de protensão ao concreto, podem ser divididas em três tipos, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, tem-se as perdas relacionadas ao atrito – para estruturas em pós-tração com aderência posterior - à acomodação da ancoragem e também à deformação imediata do concreto.

Em relação a perda por atrito, esta ocorre devido à fricção entre o cabo e a bainha, como apresentado na Figura 17. Veríssimo e César Jr. (1998b) comentam que esse tipo de perda de protensão se torna mais comum no momento exato do ato da protensão realizada pelo macaco hidráulico.

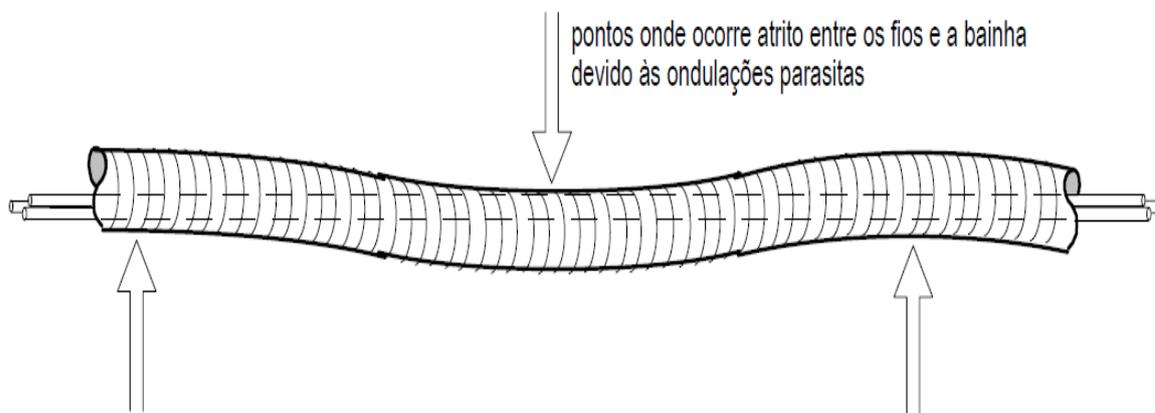
Figura 17 – Corte em bainha metálica demonstrando pontos de atrito entre cabos e a própria bainha.



Fonte: Veríssimo e César Jr. (1998b, p. 9).

O ato de protender o aço em meio às bainhas metálicas, além de provocar o atrito cabo-bainha devido a ondulação que é encontrada na trajetória da bainha, como mostrado na Figura 18, também é provocado o atrito entre os próprios cabos, causando uma redução da protensão ao aço em todos os pontos de contato.

Figura 18 – Demonstração do atrito em cabo-bainha devido a ondulação da mesma.



Fonte: Veríssimo e César Jr. (1998b, p. 10).

Outra perda imediata é a relacionada com o deslizamento do aço e a ancoragem da armadura, são de forma breve comentadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), onde é descrito que de forma experimental as perdas devem ser estabelecidas ou então adotados os valores indicados pelos fabricantes das placas de ancoragem, entretanto de forma mais aprofundada Pfeil (1984), descreve que essa perda se dá no momento de transferência das forças de tração aplicadas pelo macaco hidráulico para as placas de ancoragem, fazendo com que ao longo do cabo de aço, seja ocasionado uma diminuição do tensionamento de tração.

Por fim, tem-se a perda imediata devido à deformação imediata do concreto. Pfeil (1984) comenta que o encurtamento elástico do concreto ocorre de forma diferenciada em estruturas pré e pós-tensionadas. Para casos de pré-tensão o concreto sofre certa deformação devido a força aplicada nos cabos protendidos no exato momento da transferência de tensão a peça após a concretagem. Em casos de pós-tensão o encurtamento é ocasionado devido a existência de  $n$  grupos de cabos a serem estirados, de forma simplificada Almeida filho (2002) descreve que protendendo um cabo de aço ligado a estrutura já concretada é provocado o relaxamento nos outros cabos já estirados anteriormente.

Ao longo do tempo a armadura ativa tende de forma natural a sofrer com perdas de protensão, nomeando este processo como perdas progressivas, como afirmado por Almeida Filho (2002). Segundo o autor e também baseado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) é possível subdividir as perdas progressivas em perdas por retração e fluência do concreto, além de perdas por relaxação da armadura ativa.

A retração do concreto consiste no encurtamento da peça concretada, sendo ocasionado por fatores como traço do concreto, tipo de agregado utilizado, classificação do cimento entre outros. Pfeil (1984) ainda complementa fatores relevantes como umidade e temperatura do meio ambiente, além da espessura da peça executada. Bastos (2019b) afirma que para hidratar 100 Kg de cimento se faz necessário 26 litros de água, assim, o excesso de água adicionado acaba sendo evaporado da peça concretada, gerando a *retração hidráulica*. Fato importante que deve ser considerado é que não se faz necessário a aplicação de cargas para que ocorra a retração do concreto, o autor a classifica como um fenômeno natural decorrente do uso do concreto ao longo do tempo.

A protensão da armadura ocasiona um tensionamento de compressão sob a peça concretada, entretanto esse ato segundo Veríssimo e César Jr. (1998b) e Bastos (2019b) é uma das causas resultantes da fluência do concreto ao longo do tempo, devido ao fator de redução do alongamento da armadura ativa. Ainda complementando Bastos (2019b) afirma que a fluência é causada por além da existência de um carregamento externo, fatores como umidade relativa do ar, traço do concreto e os tipos dos agregados também a ocasionam.

Veríssimo e César Jr. (1998b) comentam que basicamente a relaxação do aço ocorre simplesmente devido a permanência do estiramento e a contínua tensão de tração aplicada, sendo ocasionado conforme o passar do tempo em relação ao momento inicial da protensão, vale constar que a relaxação medida em laboratório difere da constatada em obra, devido as variáveis em relação às intempéries ocasionadas, tendo como exemplo a temperatura ao longo da vida da estrutura, fazendo com que o aço trabalhe de forma distinta. “A armadura de protensão estirada e mantida com comprimento constante sofre um alívio de tensão ao longo do tempo. Este fenômeno é chamado de relaxação do aço. ” (VERÍSSIMO E CÉSAR JR., 1998b, p. 23)

#### 2.2.2.4 Aço utilizado em armaduras ativas

Segundo Hanai (2005) os aços utilizados em armaduras ativas se destacam pelas elevadas resistências suportadas, possuindo diversas características como espessura e formato.

No Brasil é possível especificar duas normativas que regem sobre o uso do aço específico para concreto protendido sendo elas as NBR 7482 e a NBR 7483, que normatizam o as especificações e uso dos fios de aço e para cordoalhas de aço respectivamente (VERÍSSIMO E CÉSAR JR., 1998a).

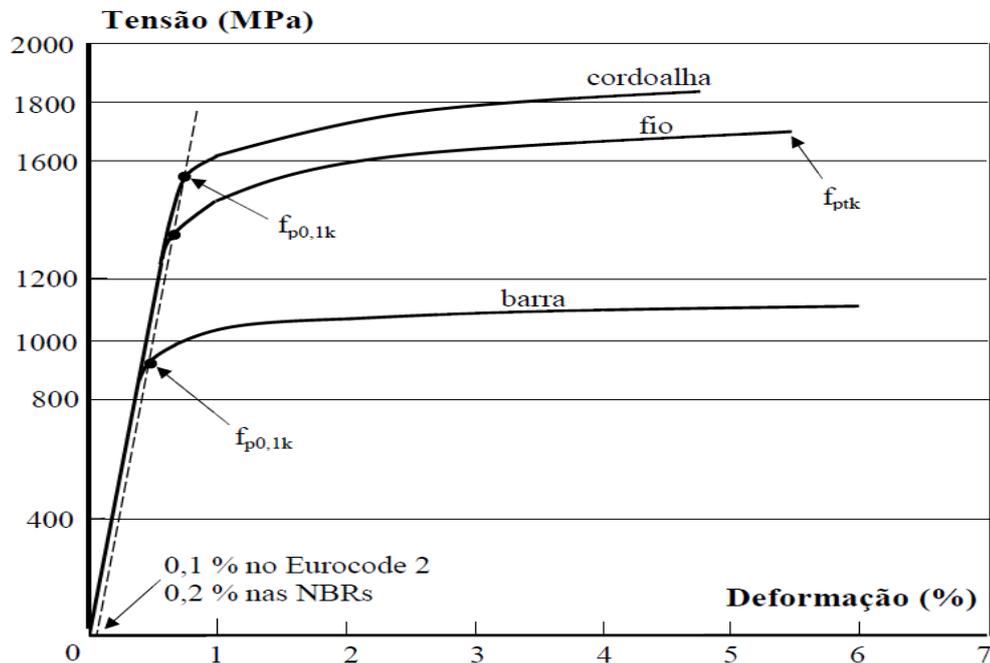
Os aços utilizados para a execução de estruturas protendidas são aços RN (relaxação normal) e RB (relaxação baixa), sendo estes a escolha do projetista responsável pela estrutura.

“A) aços aliviados ou de relaxação normal (RN). São aços retificados por um tratamento térmico que alivia as tensões internas de trefilação; B) aços estabilizados ou de relaxação baixa (RB). São aços que recebem um tratamento termomecânico que melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação (Veríssimo e César Jr., 1998a, p. 26).”

Uma característica relevante sobre os aços indicados para protensão são em relação ao seu valor financeiro, sendo consideravelmente mais caro, entretanto possuindo resistência elevada o seu uso em conjunto ao aço normalmente utilizado para a execução em concreto armado aplica uma considerável diferença na quantidade de armadura passiva (VERÍSSIMO E CÉSAR JR., 1998a). Os cabos possuem a possibilidade de serem entregues em obra com o comprimento necessário para vencer grandes distancias, resolvendo situações de emendas, comumente utilizadas em obras com estrutura convencional, além de que como seu fornecimento é disponibilizado em rolos, devido a ser um aço maleável, agilizando questões de estoque do material ocupando espaços menores e facilitando questões de organização no canteiro de obras.

Segundo o mesmo autor o aço para uso em protensão é disponibilizado em três modelos distintos, sendo eles em fios trefilados de aço carbono, tendo a variação nos diâmetros de 3 a 8 mm, fornecidos em rolos ou bobinas, também é possível a disponibilização em cordoalhas, sendo de modo geral fios de aço enrolados, podendo conter dois, três ou até sete fios e também em barras de aço-liga possuindo este uma resistência elevada e com diâmetros superiores a 12 mm e tendo seu comprimento moderado. Cada modelo de aço possui uma resistência a tensão diferente em relação a sua deformação, como pode ser demonstrado no Figura 19.

Figura 19 – Diagrama tensão x deformação dos aços de protensão.



Fonte: Bastos (2019b, p. 61).

Por apresentar diâmetros pequenos e estar sob tensão continuamente a preocupação do aço sofrer corrosão é algo sempre levado em consideração, visando que uma pequena corrosão poderia ser fatal para a estrutura que utilizou deste aço. Segundo Veríssimo e César Jr. (1998a) pelo fato que o aço de protensão possui esta fragilidade, a empresa responsável pela produção deverá assegurar a proteção do mesmo contra corrosão. Em obra eles devem ser armazenados em locais cobertos, para serem mantidos secos e afastados do nível do solo para não serem afetados pela água da chuva.

Se torna interessante segundo Zilli e Bortoloti (2013), a nomenclatura utilizada para identificação dos aços utilizados em estruturas protendidas. Em exemplo é possível observar (CP 190 RB), sendo o (CP) a indicação do uso do concreto protendido, tendo em sequência o valor de (190) representando o valor a resistência mínima de ruptura por tração referente ao aço utilizado e por último (RB), sendo exposto a modalidade também relacionada ao aço empregado.

#### 2.2.2.5 Especificações dos Concretos utilizados

De forma geral os concretos utilizados para execução de peças protendidas devem possuir um controle de qualidade mais rigoroso e dispor de resistências elevadas, sendo normalmente empregados resistências superiores aos utilizados na execução de uma peça em concreto armado, como comentado por Hanai (2005). As tensões aplicadas no concreto, fazem

com que se torne necessário um traço que possua baixa permeabilidade, boas propriedades mecânicas e também uma durabilidade considerável.

Os concretos para uso em protensão segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) devem possuir uma relação água/cimento baixa, mantendo-se de acordo com a classe de agressividade, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014 p. 18).

Bastos (2019b) afirma que a resistência característica à compressão do concreto, em relação ao uso em casos de protensão, normalmente variam entre 35 e 70 MPa. O emprego de concretos que possuem altas resistências se torna uma opção recorrida, visto que são impostas à peça tensões de compressão consideravelmente elevadas, além de que com o seu uso é possível se obter reduções nas dimensões da estrutura. Outra vantagem do seu uso são sua baixa permeabilidade, protegendo a armadura ativa e passiva contra corrosão e vale lembrar que concretos de altas resistências apresentam módulos de elasticidade ( $E_c$ ) maiores, diminuindo deformações e proporcionando perdas de protensão consideravelmente menores.

Hanai (2005) comenta sobre o uso de cimentos e concretos especiais, tais como o cimento de alta resistência inicial (ARI) e o concreto de alta resistência (CAR), possuindo resistências superiores a 50 MPa.

Como já comentado neste desenvolvimento, a normativa NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que a protensão somente seja realizada quando o concreto utilizado atingir no mínimo 21 MPa de resistência a compressão, sendo este valor obtido através do ensaio de compressão de corpos de prova.

### 2.2.3 Vantagens e Desvantagens da utilização do concreto protendido

O uso do concreto protendido apresenta de um modo geral vantagens técnicas que influenciam no momento da escolha para sua execução. Castro (2011) comenta que um ponto positivo sobre o uso do concreto protendido em comparação ao concreto armado é a

possibilidade de vãos com seções maiores serem vencidos com a uma redução considerável na quantidade de pilares necessária para tal, gerando liberdade para as questões relacionadas com a arquitetura da edificação. Estruturas em concreto armado apresentam uma necessidade de um maior tempo de execução, sendo este necessário para a elaboração da armadura, preparo de formas além do tempo necessário para que seja atingida a resistência para o concreto utilizado, fazendo com que seja necessária uma espera de 28 dias, para aplicação de carga sobre a peça.

O autor supracitado ainda comenta em relação a execução em concreto armado, onde no concreto protendido é possível se obter uma considerável redução em quantidades de aço, sendo esta diferença suprida pelas armaduras protendidas. Em lajes protendidas pode-se ser obtido espessuras menores e a redução ou até mesmo a eliminação de vigas, onde se somadas todas as reduções citadas a estrutura se torna relativamente mais leve em relação a mesma estrutura se executada em concreto armado, onde uma considerável diminuição nas cargas impostas sobre as fundações é aplicada.

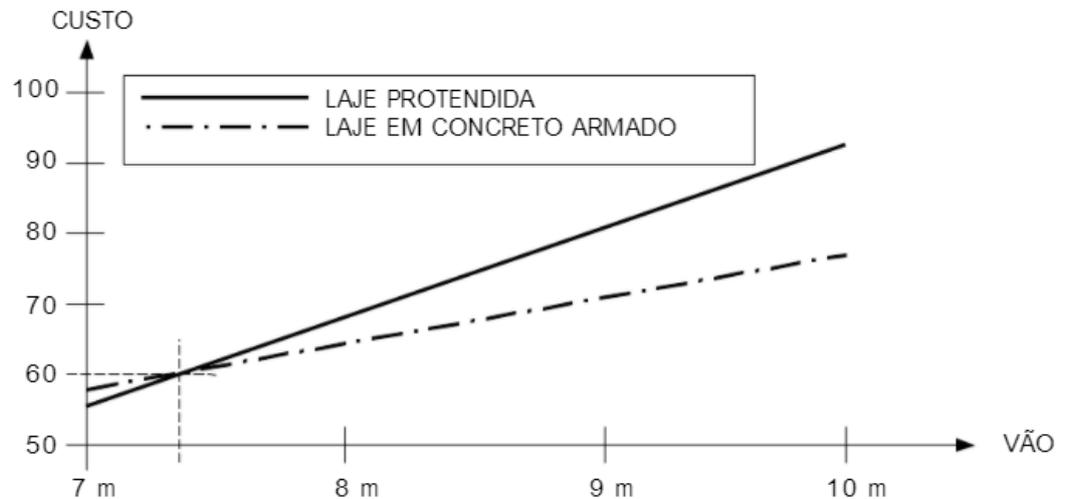
Como já comentado, a corrosão é um fator preocupante em estruturas protendidas, entretanto, peças protendidas apresentam uma quantidade de fissuras consideravelmente menor quando relacionadas ao número em estruturas convencionais, sendo agregado uma proteção a corrosão em relação ao aço utilizado e possibilitando a estrutura a suportar maiores cargas. (GIOVANAZ E FRANZOZI, 2017).

O aumento a resistência à flexão e ao esforço cortante, sem que seja aumentado drasticamente o peso próprio das vigas, se torna outra vantagem a ser levada em consideração (LIMA E SILVA, 2019).

Ainda, o uso do concreto protendido acarreta diversas vantagens estruturais além de tempo de obra, entretanto, segundo Castro (2011), algumas desvantagens também devem ser examinadas antes de se optar pela escolha de uma estrutura protendida.

Segundo Emerick (2002) a escolha pela execução em lajes elaboradas em concreto protendido, ainda que existente a redução de aço já comentada, a relação custo-benefício quando relacionada ao concreto armado, torna-se atraente a partir da presença de vãos maiores que 7 metros como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Relação custo X vãos em lajes armadas e protendidas.



Fonte: Emerick (2002 p. 1).

Ainda em relação a economia gerada Giovanaz e Fransozi (2017) afirmam que a execução de peças protendidas necessitam de equipamentos e mão de obra especializada, entretanto o valor apropriado a execução e a carência em mão de obra, podem tornar economicamente, em alguns casos, inviável a aplicação de estruturas deste seguimento. Uma outra dificuldade comentada pelos autores é que em caso de reforma da estrutura, a mesma se torna mais dificultosa e encarecida, devido à complexidade da estrutura.

### 3 METODOLOGIA

Os autores Silva e Menezes (2005) afirmam que é possível classificar uma pesquisa de acordo com sua natureza, assim, este trabalho se enquadra em uma pesquisa aplicada. Uma vez que tem como objetivo a geração de conhecimentos para aplicação em problemas específicos em casos reais, já que como descrito anteriormente no Brasil poucos são os conteúdos existentes sobre o tema e o modelo de execução do concreto protendido, sendo assim determinada como uma pesquisa aplicada.

Ainda, conforme Gil (2002), de acordo com os objetivos deste trabalho essa pesquisa se enquadra em um trabalho exploratório, descritivo e explicativo. Isto pois o estudo irá trazer maior conhecimento acerca dos métodos estudados, trazendo a descrição das características de cada sistema. Além disso, com o estudo será possível identificar quais os fatores que influenciam nos resultados, uma vez que serão comparados os métodos construtivos em concreto armado e protendido.

De acordo com os procedimentos técnicos utilizados, está se enquadra em uma pesquisa bibliográfica, pois, segundo o autor citado, este tipo de pesquisa é “[...] desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos” (GIL, 2002, p. 44)

O presente trabalho tratasse de um modelo comparativo entre o processo construtivo de lajes em concreto armado e lajes em concreto protendido, tendo como ponto de análise questões estruturais, arquitetônicas, econômicas e de duração da edificação. O estudo foi aplicado em uma edificação multifamiliar, localizado no município de Imbituba, Santa Catarina, levando em consideração os respectivos levantamentos necessários. A edificação consiste de 11 pavimentos, sendo 2 pavimentos de garagem, 8 pavimentos tipo além da cobertura, sendo todas as lajes executadas em concreto protendido. Para efeitos de cálculo foram levados em consideração apenas o primeiro pavimento tipo garagem, onde foram verificadas as questões já mencionadas, em relação a uma opção de projeto e execução da mesma estrutura em concreto armado.

O trabalho pode ser dividido em três etapas distintas. Inicialmente foi realizado um levantamento de dados da edificação em relação ao uso do concreto protendido, vale lembrar que estes somente tiveram seu início após o recebimento da autorização da empresa, viabilizando acesso a obra, a projetos e a própria execução. Após a autorização ter sido declarada foram escalados os dados gerais da obra, além do modelo de protensão utilizada,

concreto empregado, tempo ganho com o uso, motivo pelo qual foi levada a escolha do método construtivo e vantagens e desvantagens ao ponto de vista do engenheiro responsável pela edificação.

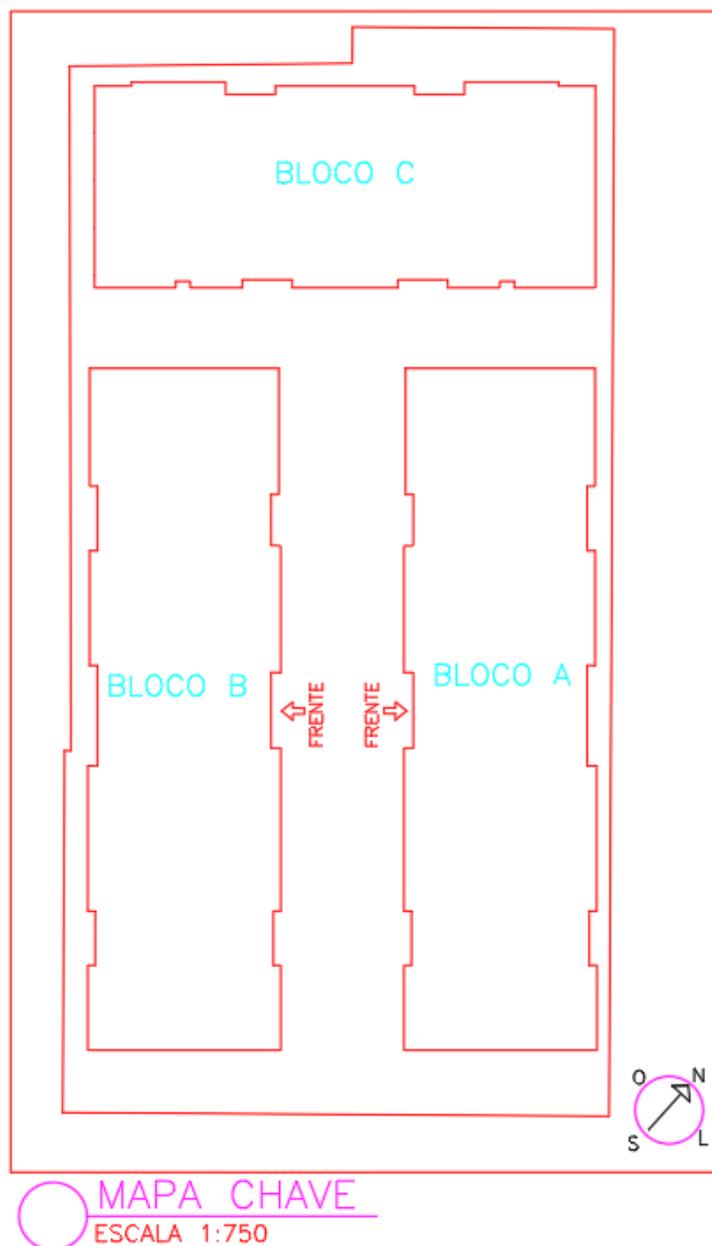
Na etapa seguinte foram realizados os cálculos estruturais referentes a mesma estrutura se executada em concreto armado, sendo apresentados resultados em comparação com os disponibilizados pela empresa no uso da protensão, além disso ainda foram comparadas questões de duração da estrutura e viabilidade técnica.

Na terceira etapa foram apresentadas as verificações da aplicação do modelo comparativo, onde foram tomados como base os cálculos desenvolvidos para o concreto armado e os valores obtidos com a empresa responsável para o concreto protendido. Os métodos construtivos foram dispostos em comparação sendo realizada a análise relacionando pontos estruturais e arquitetônicos além dos pontos já comentados anteriormente.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A edificação multifamiliar como já comentado, situa-se no município de Imbituba em Santa Catarina, possuindo onze pavimentos, sendo dois pavimentos de garagem, oito pavimentos tipo e a cobertura. A estrutura quando finalizada, estará dividida em três blocos como pode ser visto na Figura 21 a seguir.

Figura 21 – Esquema da divisão da edificação.



Fonte: Empresa A (2021).

Atualmente a estrutura encontra-se sendo executada a montagem das armaduras dos pilares do quarto pavimento tipo do bloco C.

Como comentado anteriormente neste desenvolvimento será analisado a relação de comparação entre os métodos construtivos, apenas da laje do pavimento garagem 01 do bloco C, portanto, desconsideradas as diferenças entre os demais pavimentos. Os detalhes analisados partiram do conceito que a laje em questão, será comparada com a possível execução em concreto armado, retirando detalhes como a rampa e as escadas existentes no projeto original. Para a execução dos cálculos, foi de suma importância o amparo do Engenheiro civil Maurício Alberto Büchele Motta, o qual utilizou o software Eberick juntamente com todos os dados estruturais presentes no projeto original. É válido complementar que o autor dos cálculos citado, após o término dos mesmos, esclareceu todas as dúvidas geradas e autorizou o uso dos resultados para fins de estudo e apresentação neste documento.

#### 4.1 LAJE

A execução da laje analisada foi realizada como já comentado anteriormente com uso do método relacionado ao concreto protendido. De acordo com os projetos estudados, disponibilizados pela empresa A, a laje em questão possui uma área estrutural total de 1771 m<sup>2</sup>, com uma espessura de 20 cm em toda sua extensão. Para o estudo em concreto armado a estrutura foi calculada sendo aplicado o método de lajes nervuras, entretanto para manter os vãos existentes foi necessário um aumento em relação a espessura da laje em 10 cm a deixando com 30 cm no total, com as fôrmas de nervura inclusas. O cobrimento existente de 3 cm foi mantido para efeitos de cálculos, assim como a relação de cargas permanentes e acidentais.

#### 4.2 PILARES

Para a elaboração dos cálculos deste documento, o lançamento da estrutura foi realizado de forma que fossem mantidas as características relacionadas aos pilares. Sendo os métodos construtivos diferentes é possível que houvesse alterações a estas características, entretanto visando manter o foco neste desenvolvimento, apenas foram utilizadas as características como dimensão e quantidade não sendo verificada a armadura relacionada aos pilares, ou seja, mantida a relação de aço para o mesmo, nos dois métodos apresentados. Para informação, abaixo pode ser observada na Tabela 6 as dimensões relacionadas as quantidades de cada pilar.

Tabela 6 – Pilares da estrutura.

Pilares	Dimensão (cm)
414 – 415 – 416 – 418 – 419 - 420	140 x 20
312 – 313 – 315 – 321- 322 – 323 - 326 - 328 – 334 - 340	120 x 30
316 – 331 - 412	120 x 25
301 – 302 – 303 – 304 – 307 – 308 – 309 - 310	100 x 30
311	60 x 60
406 – 407 – 408 – 409 – 410 – 411 - 417	60 x 20
314	50 x 60
324 – 325 – 327 – 329- 330 – 335 - 336 - 337 – 338 - 339	30 x 120
317 – 318 – 319 - 320	25 x 217
305 - 306	25 x 120
401 – 402 – 403 – 404 – 405 – 413 - 421	20 x 60

Fonte: Empresa A (2021).

O projeto conta 59 pilares com dimensões variadas, mantendo no sentido sudoeste – nordeste com maior vão de 6,60 metros de comprimento e no sentido noroeste – sudeste com o maior vão tendo o comprimento de 6,22 metros, sendo mantidos os vãos para os cálculos em concreto armado com a laje nervurada.

#### 4.3 ASSOALHAMENTO E ESCORAMENTO DA LAJE

Sendo a estrutura executada em concreto protendido ou em concreto armado, alguns fatores são indispensáveis para a execução da estrutura. Em relação aos dois sistemas construtivos na estrutura analisada é possível afirmar que o assoalhamento de laje será idêntico para ambos, visto que para o desenvolvimento desse documento foi-se analisado a estrutura de forma igualitária, sendo aplicadas as diferenças em relação ao projeto original. A estrutura dispôs de um total de 880 chapas de madeirite plastificado com medidas de 220 cm de comprimento, 110 cm de largura e 1,8 mm de espessura posicionados em todo o pavimento analisado, como pode ser observado na Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Fôrma de madeira para assoalhamento da laje.



Fonte: Empresa A (2021).

Em relação ao escoramento da laje na execução do projeto original foram utilizadas de escoras metálicas alugadas de uma empresa terceirizada. Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), quando for feito uso de escoramento metálico, as instruções do fornecedor do equipamento devem ser seguidas para o emprego adequado.

Para a estrutura foram utilizadas um total de 4000 escoras metálicas, com distanciamento inicial de 70 cm, sendo realizado os alívios conforme previsto no projeto, seguindo as recomendações presentes na NBR 14931 (ABNT, 2004).

#### 4.4 AÇO UTILIZADO

Sendo utilizado o método de protensão de cordoalhas engraxadas não aderentes, já fundamentado neste documento, foram empregados um número de 271 (duzentos e setenta e um) cordoalhas de aço CP – 190 RB, com diâmetro de 12,7 mm e peso de 0,886 kg/m, com um comprimento total de 8364 m resultando em 7410 kg de aço dispersos na estrutura. Além das cordoalhas, para a armação da estrutura foi utilizado de 1700 m quadrados de malha de aço com diâmetro de 5 mm, sendo adicionada a estrutura o peso de 6022 kg de aço, a distribuição pode ser observada na Figura 23 abaixo.

Figura 23 – Armadura de protensão da estrutura.



Fonte: Autor (2021)

Ainda em relação ao aço da estrutura, envolta aos pilares foram acomodadas as armaduras de punção. Esta armação utiliza aço CA-50 e CA-60, como pode ser observado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Resumo armadura de punção da laje protendida.

Aço	Diâmetro (mm)	Peso (kg) + 10%
60B	5	311
50 <sup>a</sup>	6,3	84
50 <sup>a</sup>	8	1357
50 <sup>a</sup>	10	23
50 <sup>a</sup>	12,5	130
50 <sup>a</sup>	16	148
50 <sup>a</sup>	20	301
Peso total 60B		311
Peso total 50B		2042
Peso total		2353

Fonte: Empresa A (2021).

Portanto segundo o projeto analisado é possível afirmar que em relação ao aço utilizado, imposto a laje tipo garagem 01 da estrutura um peso total de 15785 kg de aço, sendo estes relacionados aos aços CA 50, CA 60 e CP – 190 RB.

Em relação ao aço, sendo feito uso do software para execução dos cálculos em concreto armado da laje analisada, os resultados diferem como já esperado, para um valor

superior em referência a quantidade de aço utilizada para a execução em protendido. A estrutura em concreto armado não conta com o uso das cordoalhas para sua execução, entretanto o uso de barras de aço teve seu aumento considerado. O resumo de aço apresentado pelo software, somente sendo considerada a laje pode ser observada na Tabela 8 abaixo.

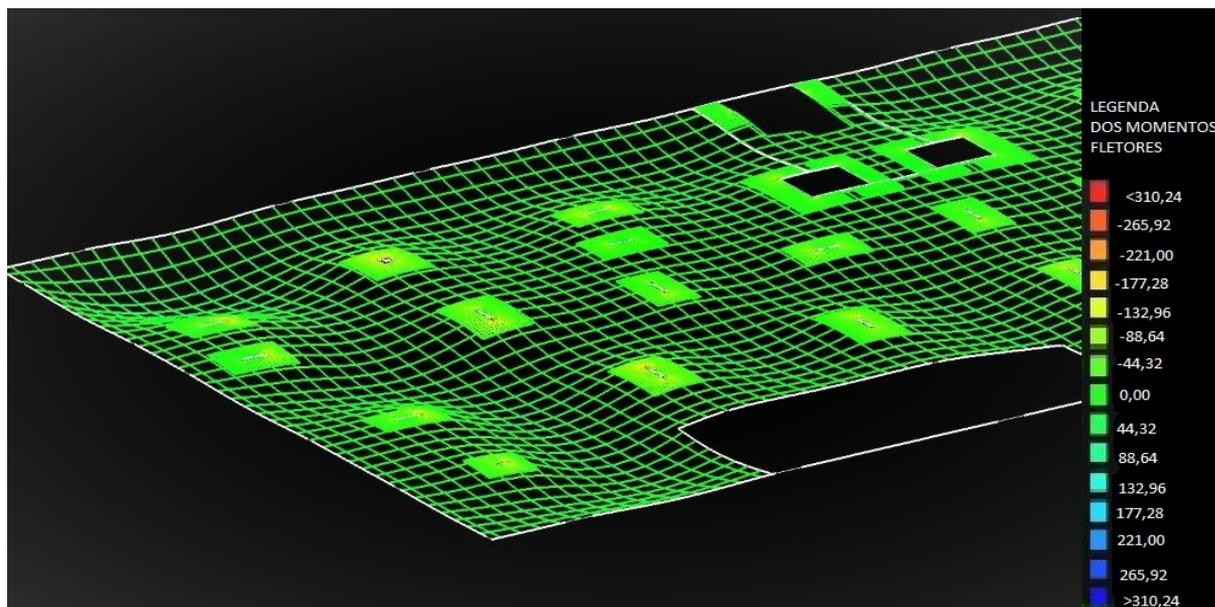
Tabela 8 – Aço para execução da laje em concreto armado.

Aço	Diâmetro (mm)	Peso (kg) +10 %
CA – 50	6,3	235,5
CA – 50	8,0	10141,3
CA – 50	10,0	1859,3
CA – 50	12,5	8332,2
CA – 50	16,0	3041,7
CA – 60	5,0	3555,1
Peso total CA – 50		23610,0
Peso total CA – 60		3555,1
Peso total de aço		27165,1

Fonte: Autor (2021).

Ainda sendo feito uso do software, foi possível obter um modelo verificando o momento fletor da estrutura, onde é possível verificar através da escala lateral os pontos de maior concentração de tensão a laje, como pode ser observado na Figura 24 abaixo.

Figura 24 – Modelo do momento fletor da estrutura.



Fonte: Autor (2021).

Portanto sendo feita a análise da execução do projeto em concreto armado, se tornou necessário a adição de 22 vigas em toda a estrutura, exigindo uma quantidade de aço considerável para a sua execução, como pode ser visto na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Resumo aço em concreto armado

Aço	Diâmetro (mm)	Peso +10 % (kg)
CA – 50	6,3	433,2
CA – 50	8,0	116,4
CA – 50	10,0	515,6
CA – 50	12,5	225,5
CA – 50	16,0	249,2
CA – 60	5,0	251,2
Peso total CA – 50		1539,9
Peso total CA – 60		251,2
Peso total de aço		1791,1

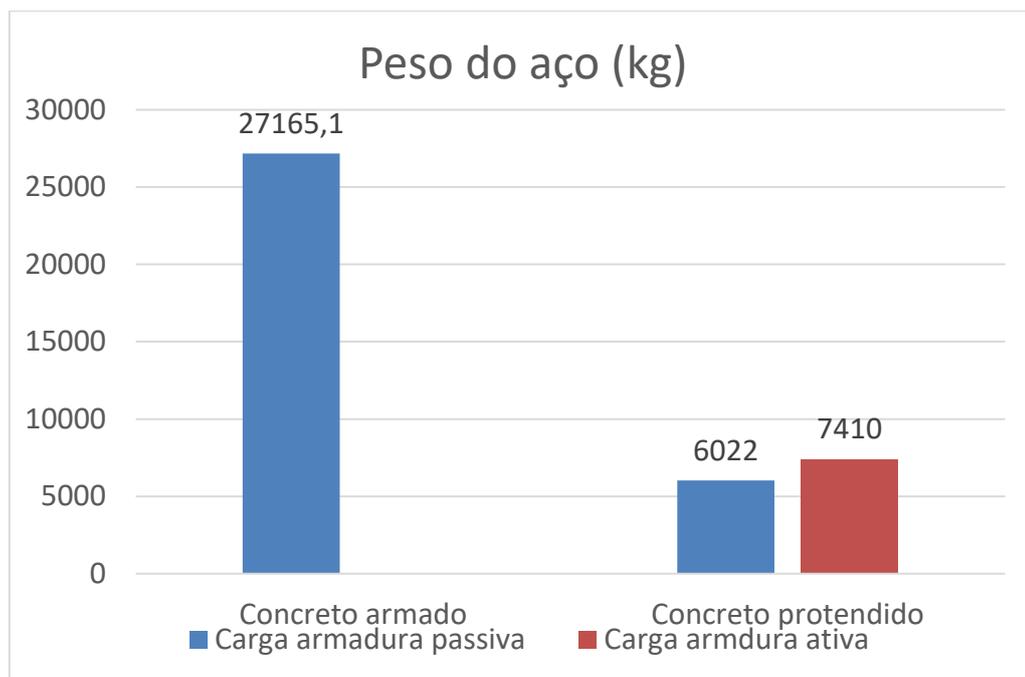
Fonte: Autor (2021).

Mantendo em mente o modelo colocado para contraponto ao executado originalmente, a opção de uma laje nervurada se tornou atrativa para realização dos estudos, visto que segundo os cálculos realizados, a possível escolha de uma laje maciça em concreto armado, faria com que fosse necessário um aumento ainda maior de sua espessura, aumentando o volume final de concreto além da quantidade de aço, culminando assim no aumento do peso da estrutura, sendo possível ser necessário a alteração na armadura e nas dimensões dos pilares

e até mesmo da própria fundação, enquanto sendo realizada a estrutura de modo nervurada, o peso da estrutura seria reduzido, influenciando diretamente na resistência da laje e na quantidade de armaduras.

Realizando os somatórios de acordo com os aços descritos em cada método construtivo, os resultados obtidos podem ser observados no Gráfico 1 a seguir.

Gráfico 1 – Peso do aço em relação ao método construtivo.



Fonte: Autor (2021).

Devido ao uso do modelo de laje nervurada para estudo da estrutura analisada, o uso de uma armação dos capiteis se torna desnecessário, visto que atende aos pré-requisitos presentes na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), na qual está descrito o processo correspondente a verificação, frisando que somente é possível ser feita esta afirmação por ser analisada a estrutura de apenas um pavimento, visto que a norma acima citada, comenta o uso obrigatório da armadura, no caso da estabilidade da edificação depender da resistência da laje a punção.

#### 4.5 CUBETAS PARA LAJE NERVURADA

Sendo optado pelo uso de uma laje em concreto armado no tipo nervurada, os empregos das cubetas para a nervura são essenciais. Visto a área da estrutura já mencionada, os cálculos mostraram a necessidade da aplicação de 2400 unidades com dimensões diferentes como pode ser observada na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Dimensões e quantidades de formas para laje nervurada

Hb	Dimensões (cm)		Quantidade
	bx	by	
25	80	80	2035
25	40	80	240
25	80	40	125

Fonte: Autor (2021).

O processo de projeto da estrutura em concreto armado, foi feito de modo que as formas fossem posicionadas sobre toda a estrutura analisada, com exceção dos capiteis como já mencionado.

Segundo Spohr (2008) o uso deste modelo de estrutura apresenta vantagens como o aumento na agilidade do processo construtivo, favorecendo a execução, além de que apresenta uma inércia mais elevada, viabilizando um ganho nos comprimentos dos vãos, favorecendo por exemplo questões arquitetônicas.

#### 4.6 CONCRETO

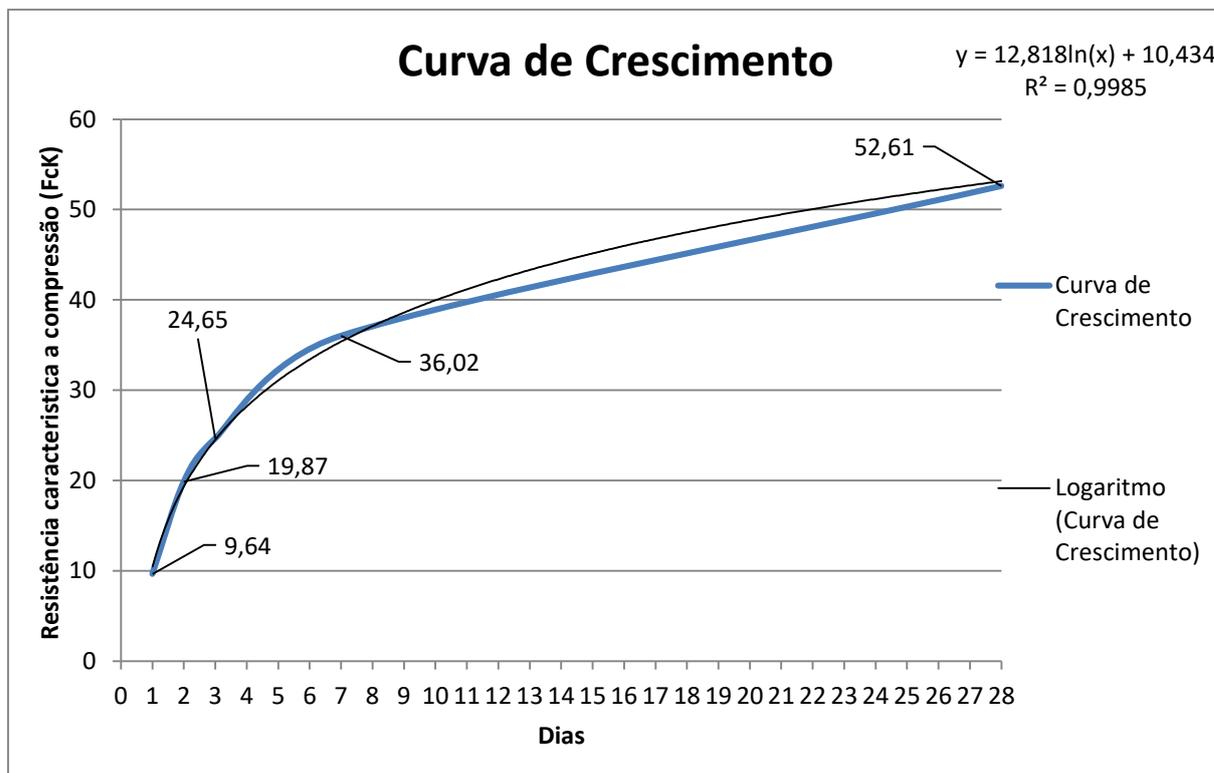
O projeto original da estrutura foi mantido dentro dos parâmetros da NBR 6118 (ABNT, 2014) e requisita uma série de especificações necessárias para a execução da estrutura em concreto protendido, sendo elas:

- Fator água/cimento:  $(a/c) \leq 0,55$ .
- Consumo mínimo de cimento:  $\geq 350\text{kg/m}^3$ .
- Resistencia característica à compressão com 28 dias:  $F_{ck} = 35\text{MPa}$ .
- Resistencia característica à compressão com 3 dias:  $f_{ck} = 21\text{ MPa}$ .
- Diâmetro máximo agregado graúdo:  $\leq 19\text{mm}$ .
- Cobrimento: 2,5 cm em lajes e 3,0 cm em vigas e pilares.

A empresa contratada para fornecimento do concreto usinado de toda a edificação foi a Traço Forte Concretos, possuindo sua matriz em São Ludgero/ SC e uma filial em Imbituba/ SC. Para fins de cumprimento das especificações citadas, o responsável técnico pela usina de concreto, o Engenheiro civil Cristian Vitoreti Fernandes desenvolveu a dosificação do traço, utilizando de aditivos do tipo mid-range, tornando possível uma redução na quantidade de água e ainda a obtenção de um abatimento de 210 mm no concreto, facilitando a trabalhabilidade em obra. Com a dosagem de água por metro cúbico sendo reduzida, foi utilizado de  $350\text{ kg/m}^3$  de CP IV Z -32, atendendo as especificações da contratante.

Para atender os requisitos de resistência à compressão, os ensaios de compressão foram realizados com 24, 48 e 72 horas, assim como 7 e 28 dias tornando possível obter a curva de crescimento das resistências características do concreto, como pode ser observado no Gráfico 2 abaixo.

Gráfico 2 – Curva de crescimento de concreto 21 MPa com 3 dias.



Fonte: Traço Forte Concretos (2021).

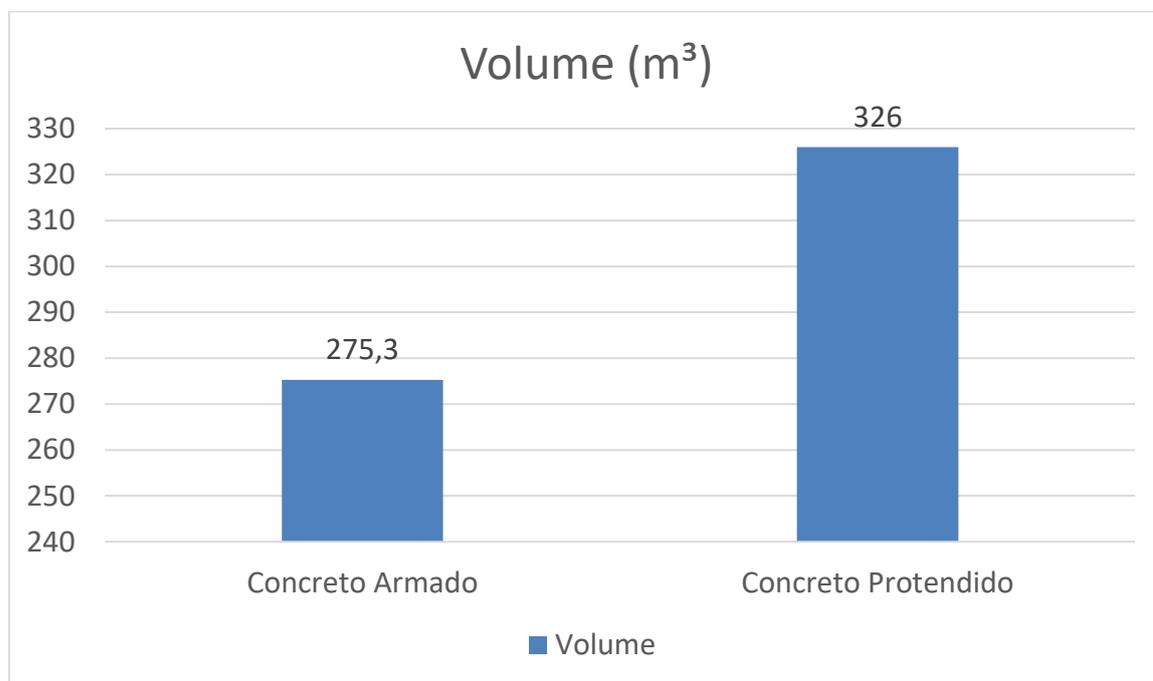
Devido à baixa quantidade de água utilizada no traço, as resistências à compressão nos ensaios satisfizeram todas as especificações, sendo obtida uma resistência de 24,65 MPa com 3 dias de cura e 36,02 MPa com 7 dias já sendo atendida à solicitação da resistência final em projeto.

Para a execução da concretagem a laje analisada em concreto protendido, segundo o projeto original seriam necessários 349,50 m<sup>3</sup> de concreto para a laje e 6,80 m<sup>3</sup> para as vigas, entretanto segundo a usina de concreto, o volume total carregado foi de 326 m<sup>3</sup>.

Analisando a laje sob a perspectiva relacionada a execução em concreto armado, o volume total utilizado para concretagem da estrutura, lembrado a adição das cubetas para a laje nervurada, foi de 251,9 m<sup>3</sup> para a laje e 23,4 m<sup>3</sup> para as vigas, totalizando em 275,3 m<sup>3</sup> de concreto, portando considerando o volume utilizado originalmente obteve-se uma redução de 50,7 m<sup>3</sup> de concreto para a execução da laje do tipo garagem 01. Esta redução no volume parte da aplicação das cubetas, onde o espaço que originalmente seria preenchido com concreto,

estará ocupado com as cubetas para a nervura da laje. A redução no volume do concreto pode ser observada do Gráfico 3 a seguir.

Gráfico 3 – Volume de concreto em relação ao método construtivo



Fonte: Autor (2011).

Mantendo as cargas originalmente utilizadas no projeto, assim como a classe de agressividade ambiental, para estrutura em concreto armado segundo os cálculos desenvolvidos, uma resistência à compressão no concreto de 25 MPa já seria suficiente para suportar as tensões da estrutura, vale lembrar que para o cálculo foi utilizada apenas a laje da garagem 01. Mesmo com o  $f_{ck}$  obtido pelo software, o engenheiro responsável pelo desenvolvimento do traço original sugere que devido à localização da estrutura e para efeitos de durabilidade, o ideal seria o uso de uma resistência mínima à compressão de 30 MPa, para evitar problemas futuros.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) é possível determinar a curva de crescimento de resistência dos concretos a serem analisados, através da Equação 1 abaixo.

Equação 1 – Equação de resistência de cálculo do concreto.

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

Fonte: ABNT (2014).

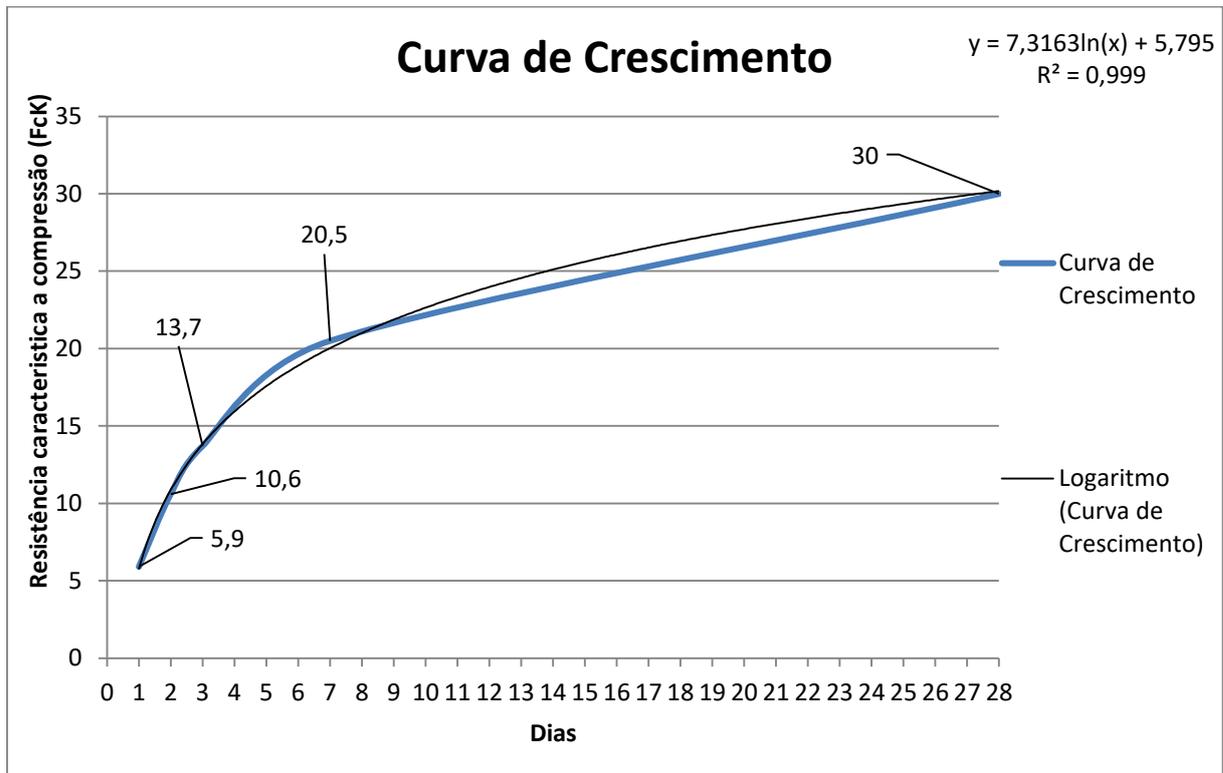
Onde,

- $\beta_1$  = Relação  $f_{ckj}/f_{ck}$ ;
- $s = 0,38$  para concreto com cimento CPIII e IV;

- $s = 0,25$  para concreto com cimento CPI e II;
- $s = 0,20$  para concreto com cimento CPV – ARI;
- $t =$  Idade efetiva do concreto, expressa em dias;

Sendo considerado o uso do CP IV Z -32, para maior facilidade na análise devido ao seu uso no traço original, é possível determinar o crescimento da resistência à compressão de um traço com 30 MPa, como recomendado. Abaixo no Gráfico 4 é possível observar o exemplo de crescimento do traço especificado.

Gráfico 4 – Curva de crescimento de concreto 30 MPa com 28 dias.



Fonte: Autor (2021).

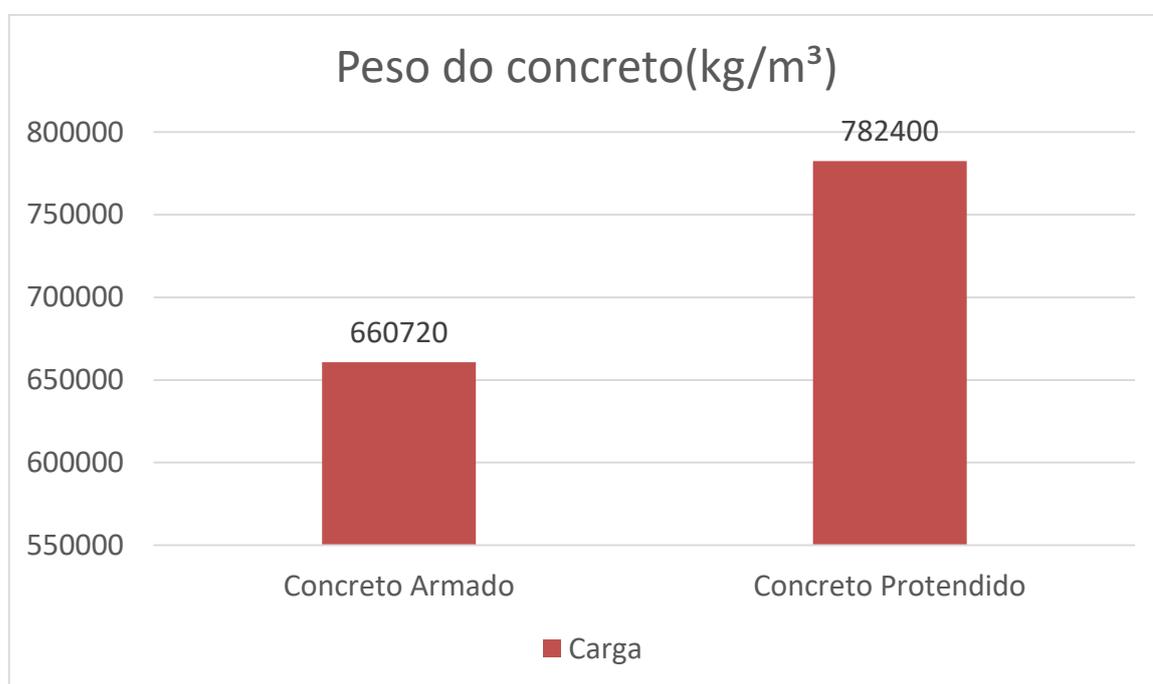
A curva de um traço não desenvolvido para possuir uma alta resistência inicial, apresenta um crescimento completamente diferente, tendo o seu desenvolvimento mais lento em relação ao traço apresentado anteriormente. Tendo em mente a ideia de comparação apresentada, o uso de um concreto específico com características especiais, como a resistência inicial elevada, não se faz necessário visto que não será feito o uso de protensão para a estrutura analisada.

O concreto apresentado para esta análise apresenta uma resistência de 13,7 MPa com 3 dias visto que se para o uso de protensão no projeto original era necessário o mínimo de 21 MPa para que fosse realizada a protensão. Com o uso deste traço, com 7 dias de cura a resistência à compressão aproximasse da resistência inicial necessária apresentada na estrutura

original. Uma relação que pode ser apresentada apenas observando estes dados é o atraso de 4 dias no mínimo em cada concretagem, isto sem relacionar com o atraso na desforma da estrutura e na montagem das armaduras e formas dos pilares subsequentes. É visível a agilidade no uso do concreto protendido em relação ao uso do concreto armado, considerando apenas a relação comentada anteriormente.

Considerando os métodos construtivos, os volumes dos concretos utilizados altera diretamente a relação do peso do mesmo, ocasionando uma estrutura com maior peso estrutural, como pode ser verificado no Gráfico 5 abaixo.

Gráfico 5 – Peso do concreto em relação ao método construtivo.



Fonte: Autor (2021).

Como já mencionado o uso das cubetas no concreto armado para esta estrutura ocasiona a redução do volume do concreto utilizado, logo tornando a estrutura mais leve, entretanto para a estrutura em concreto protendido, devido a laje ser maciça a situação é inversa, o volume do concreto utilizado é maior, onde ocorre o aumento no peso imposto pelo concreto.

#### 4.7 MÃO DE OBRA VS. TEMPO

Como comentado anteriormente para uma execução de uma estrutura em concreto protendido se faz necessário o emprego de uma mão de obra especializada, devido ao uso de equipamentos que requerem um maior conhecimento para o seu manuseio e toda a técnica a ser aplicada.

O custo inserido sobre toda mão de obra qualificada, frequentemente é encontrado no mercado com custos mais elevados quando comparados a uma não qualificada, a mesma premissa se aplica as equipes responsáveis pela protensão das cordoalhas da estrutura.

A execução original da estrutura como montagem das formas, manuseio, corte e emprego do aço utilizado, além da concretagem foram realizados com os funcionários da própria construtora, entretanto em relação a protensão uma empresa terceirizada foi contratada para ser realizado o estiramento com o uso de um macaco hidráulico como pode ser observada na Figura 25 abaixo.

Figura 25 – Operário realizando a protensão com uso de macaco hidráulico.



Fonte: Autor (2021).

É válido informar para conhecimento que a execução da estrutura contou com 24 funcionários no total, sendo 12 carpinteiros, 1 meio oficial de carpinteiro, 1 encarregado de carpintaria, 7 serventes e 3 armadores, além de 2 técnicos para a execução da protensão. Segundo o próprio Engenheiro civil responsável pela edificação afirma que o principal motivo para a escolha do uso do concreto protendido foi a possibilidade de poder contar com um número consideravelmente menor de funcionários e desempenhar o mesmo progresso em um período equivalente.

Segundo o diretor comercial da empresa responsável pela protensão da estrutura, uma laje do porte que foi projetado se executado em concreto armado com o estilo de uma laje nervurada, onde se mantido uma mentalidade conservadora, seria necessário um aumento de cerca de 25% do percentual da mão de obra utilizada na execução original, para que a estrutura fosse executada parcialmente dentro do mesmo período. O mesmo salienta que devido a

estrutura contar apenas com as vigas de bordo, otimiza o tempo da execução, facilitando recortes em formas e até no próprio aço.

Entretanto segundo o diretor administrativo da construtora, nesta estrutura em concreto protendido em específico foi possível trabalhar com apenas 40% da mão de obra necessária, quando relacionada a mesma obra se projetada em concreto armado. Esse número foi possibilitado devido a experiência da construtora nesse tipo de empreendimento.

## 5 CONCLUSÃO

Realizada toda a análise prevista, os resultados apresentaram valores variáveis em relação a cada insumo utilizado na estrutura.

Analisando os dados calculados é possível observar que mantendo as dimensões estabelecidas no projeto original, é possível importar diversas características do projeto original. O uso desses dados originais, visou o foco no estudo apenas das possíveis diferenças que poderiam vir a surgir conforme fossem sendo realizadas as correlações.

Em relação a desigualdade vista foi possível observar a causadora de maior impacto sobre o peso a estrutura. Devido ao uso de uma laje em concreto armado o quantitativo de aço teve um aumento consideravelmente alto em relação a laje original, uma diferença de 13182,2 kg de aço, 83,6% a mais em relação ao peso da estrutura original, sendo neste valor consideradas as cordoalhas de aço para protensão juntamente com todo o restante da armadura da estrutura.

Se retiradas as armaduras ativas do cálculo e fazendo uma comparação somente da armadura passiva a diferença se apresenta ainda maior, sendo distribuído sobre a estrutura 20592,2 kg de aço a mais, correspondendo a um peso de 246,2% maior que a original.

Em relação ao volume de concreto, onde mesmo que necessário o aumento da espessura da laje em 10 cm, uma diferença de aproximadamente 50,7 m<sup>3</sup> foi o resultado dos cálculos realizados, representando uma diferença de 15,55% quando comparado ao volume de concreto utilizado na estrutura original. Esta redução no volume do concreto foi devido a aplicação do modelo de laje nervurada em concreto armado, onde mesmo com o aumento da espessura o volume ocupado pelas cubetas ocasiona a diminuição no volume final do concreto.

Ainda para os cálculos realizados para o uso em concreto armado para uma laje nervura, se tornou necessário o emprego de 2400 unidades de formas na estrutura, sendo o principal motivo para a redução do volume do concreto.

As vantagens ou desvantagens em relação a mão de obra nos dois métodos foram observadas correlacionando com o tempo de execução. Segundo os dados apresentados observou-se uma redução na mão de obra para a execução em concreto protendido mantendo o prazo requerido pela empresa. Conforme os dados fornecidos pelas empresas responsáveis, não foi possível mensurar a quantidade específica de mão de obra que seria necessária para execução da estrutura em concreto armado, entretanto, foi possível estimar a quantidade de mão de obra, conforme comentado no capítulo 4.

Sendo considerados as cargas impostas pelos insumos do elemento estrutural analisado e relacionando as mesmas com as cargas da estrutura original, ainda foram realizados

os cálculos visando obter o carregamento permanente da estrutura estudada. Os resultados apresentaram um peso estrutural de 689676 kg quando realizada a estrutura em concreto armado, entretanto a estrutura original, conta com 795832 kg. Portanto a estrutura desenvolvida para o estudo, analisada dentro dos parâmetros já estabelecidos no desenvolvimento apresentou uma redução de 8,66% em relação ao carregamento original, porém este dado não deve ser considerado como principal no momento de escolha de um projetista, visto o aumento do percentual do aço o que ocasionaria por exemplo, um aumento considerável no custo final da estrutura.

A aplicação dos métodos varia de acordo com o que se espera da edificação, assim como os detalhes de projetos. Quando optado por o uso de um método em específico, será requerida uma série de detalhamentos e cálculos relacionado ao mesmo, alterando a edificação.

Visto os dados obtidos deve sempre ser lembrado que os cálculos foram realizados considerando apenas a estrutura da laje do tipo garagem 01, desconsiderando totalmente o restante da edificação. Em uma situação que fosse utilizada da estrutura em sua totalidade, os quantitativos de aço, as relações de volume de concreto e o próprio peso da estrutura poderia resultar em uma conclusão diferente.

Tendo esta ideia em mente, seria significativo que este estudo possa servir como base no futuro para um aprofundamento mais detalhado, demonstrando em sua totalidade a essência sob o qual este documento foi redigido.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, Edward; IANO, Joseph. **Fundamentos da Engenharia de Edificações: materiais e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 989 p.
- ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes. **Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas**. 2002. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- ARCELORMITTAL. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido**. Brasil: Arcelormittal, 2020
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 59 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017. 86 p.
- BASTOS, P. S. S. **Concreto protendido**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2018.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos de concreto armado**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2019a.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos de concreto protendido**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2019b
- .
- BASTOS, P. S. S. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2006.
- BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1998. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estruturas em concreto protendido: Cálculo e detalhamento**. São Paulo: Pini, 2012. 369 p.

CASTRO, Sérgio Vannucci de. **Concreto Protendido: vantagens e desvantagens dos diferentes processos de protensão do concreto nas estruturas**. 2011. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto Protendido: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

EMERICK, A. A.. Projeto e Execução de Lajes Protendidas. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005. v. 1. 191p

FONSECA, Roger Pamponet da. **A ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: construção, forma e função estrutural**. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília - Unb, Brasília, 2007.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2002. 158 p.

GIOVANAZ, Alfredo Henrique; FRANZOZI, Carolina Becker Porto. **ESTRUTURAS DE CONCRETO PROTENDIDO: estudo de caso no contexto da disciplina de estágio supervisionado i**. **Revista Destaques Acadêmicos**, Lajeado, v. 9, n. 4, p. 309-319, 28 dez. 2017. Editora Univates. <http://dx.doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v9i4a2017.1672>.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 151 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HANAI, João Bento de. **Fundamentos do concreto protendido**. São Carlos: Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, 2005. 110 p

KAEFER, Luís Fernando. **A evolução do concreto armado** (PEF 5707 - Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998.3). São Paulo. 1998.

LIMA, Emanuel Carlos Borges de; SILVA, Yuri Justino da. **As vantagens e desvantagens da utilização de concreto protendido na construção de viadutos**. 2019. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Goiás Uni-Anhanguera, Goiânia, 2019.

PACHECO, Artemio Luiz Lessa; RIBEIRO, Bruna Rishelle dos Santos. **Estudo comparativo entre laje maciça simples de concreto armado e concreto protendido não aderente**. 2018. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2018.

PFEIL, Walter. **Concreto Protendido: introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1984. 204 p.

PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S.. **Concreto Armado: propriedades dos materiais**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1986.

PINHEIRO, Luís Henrique Bueno. **Reforço de pontes em concreto armado por protensão externa**. 2018. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

SANTOS, Roberto Eustaáquio dos. **A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Educação: “Conhecimento e Inclusão Social”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SCHWETZ, Paulete Fridman. **Análise numérico-experimental de lajes nervuradas sujeitas a cargas estáticas de serviço**. 2011. 2014 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2005. 129 p.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SPOHR, Valdi Henrique. **Análise comparativa: Sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M Lenz. **Concreto Protendido: fundamentos básicos**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998a. 72 p.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M Lenz. **Concreto Protendido: perdas de protensão**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998b. 34 p.

VITÓRIO, J. A. P.; BARROS, R. M. M. E. C. . **Reforço e alargamento de pontes rodoviárias com a utilização de protensão externa**. In: 7º Congresso Internacional sobre patologias e reabilitação de estruturas, 2011, Fortaleza. 7º CINPAR. Fortaleza: CINPAR, 2011. v. 01.

ZILLI, Elizandro; BORTOLOTTI, Franchubert. **Estudo comparativo entre estrutura com laje convencional em concreto armado e uma estrutura com laje plana lisa protendida: estudo de caso de um edifício residencial multifamiliar na cidade de Pato Branco**. 2013. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.