

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
ENGENHARIA CIVIL

CRISTIANE RODRIGUES DA SILVA SOUZA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E DA DURABILIDADE DAS
ESTRUTURAS RECORDISTAS BRASILEIRAS, EM CONCRETO PROTENDIDO,
EXECUTADAS EM NATAL/RN.**

NATAL/RN

2019

CRISTIANE RODRIGUES DA SILVA SOUZA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E DA DURABILIDADE DAS
ESTRUTURAS RECORDISTAS BRASILEIRAS, EM CONCRETO PROTENDIDO,
EXECUTADAS EM NATAL/RN.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

NATAL/RN

2019

CRISTIANE RODRIGUES DA SILVA SOUZA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E DA DURABILIDADE DAS
ESTRUTURAS RECORDISTAS BRASILEIRAS, EM CONCRETO PROTENDIDO,
EXECUTADAS EM NATAL/RN.**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado ao Centro
Universitário do Rio Grande do Norte
(UNI-RN) como requisito final para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira
Orientador - UNI-RN

Prof. Msc. Mariana Silva Freitas
Avaliadora interna - UNI-RN

Prof. Especialista Tarcísio Medeiros
Avaliador Externo - UFRN

Dedico este trabalho ao Pai, Filho e Espírito Santo. Também dedico a meu esposo, meus pais, minha família e aos meus professores. Todos vocês foram o alicerce que me sustentou durante a trajetória, árdua e prazerosa, da graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter chegado até aqui. Ele é Fiel.

Ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte, representado por seu corpo docente, direção, administração e equipes de suporte.

Ao meu orientador Fábio Sérgio da Costa Pereira, pelas diretrizes, dedicação e incentivos.

Aos meus colegas de sala, pelas informações socializadas.

Ao meu esposo Fábio Isaac Lima de Souza, pelo companheirismo, proteção, amor e zelo. Você creu juntamente comigo em todo tempo e investiu financeiramente neste projeto.

Aos meus pais, Teodósio Paulo da Silva e Maria da Guia Rodrigues da Silva, minhas irmãs, Cíntia Rodrigues da Silva Pereira, Kaliane Rodrigues da Silva e Kecia Rodrigues da Silva Milagres, pelo amor, incentivo e apoio.

Aos demais familiares e a todos que fizeram parte da minha formação, muito obrigada.

“Se não for o Senhor o construtor da casa, será inútil trabalhar na construção.”

(Salmos 127:1)

RESUMO

Este trabalho aborda conceitos sobre o concreto armado, esclarece sobre o surgimento deste material, sua matéria prima para produção e as composições existentes.

De igual modo ao concreto armado, trata as questões citadas anteriormente para o concreto protendido. O trabalho aborda a definição de protensão, seus tipos, suas vantagens e desvantagens. Relata sobre as perdas das tensões aplicadas aos cabos de aço e apresenta fórmulas para cálculo da pressão da bomba, perda de atrito, alongamento, esforços e tensões aplicadas.

Tem por objetivo detalhar as três construções recordistas em concreto protendido executadas em Natal/RN, premiadas pelo Rank Brasil, uma empresa independente que atua há 17 anos em todo território nacional, registrando exclusivamente recordes brasileiros, sem vínculo com sistemas internacionais. A sequência das obras segue a data de inauguração das edificações, respectivamente: Catedral de Natal/RN, maior vão livre em concreto protendido no Brasil; Ginásio Sesi-Senai, ginásio de esportes com maior vão livre em concreto protendido no Brasil e Pórtico Monumental de Natal/RN, maior balanço em concreto protendido do Brasil.

O concreto protendido é comumente encontrado nos canteiros do Rio Grande do Norte, necessitando de uma divulgação sobre como essas estruturas se comportam durante sua vida útil e sobre a necessidade de manutenções preventivas, pois o concreto protendido não possui aviso prévio em casos de colapso dos elementos estruturais.

Os resultados das avaliações visuais e dos ensaios realizados nas edificações recordistas do Brasil, executadas no Rio Grande do Norte mostram que as patologias se manifestam, predominantemente, nas peças confeccionadas em concreto armado. Esse resultado é esperado, pois os recobrimentos e as resistências características utilizadas para o concreto protendido sempre são maiores do que nas peças em concreto armado, se evidenciando na sua maior durabilidade, com fatores água-cimento menores.

Para a estrutura da Catedral de Natal/RN esta análise observou que a estrutura atende de forma satisfatória o seu objetivo. A maior deficiência da estrutura estava em seu sistema de cobertura no que se refere à estanqueidade deste,

problemática solucionada com a instalação da manta do tipo V com feltro de poliéster no reverso e de cor cinza, sendo necessário apenas complementar a aplicação da manta em áreas pequenas das vigas protendida. Deve-se também realizar serviços de reparo de pilares externos e internos desta estrutura e em partes da laje de fundo da cobertura, além da troca e/ou manutenção dos aparelhos de apoios de Neoprene e Neoflon, e das placas de metal na parte posterior da Catedral.

Sobre a estrutura do Ginásio SESI SENAI observou-se que a cobertura com vigas (protendidas) poligonais retas e lajes maciças atendeu com sucesso seu objetivo. O ponto desfavorável foi que, em função da sua forma arquitetônica, os pilares por serem de concreto aparente são expostos à chuva e agentes agressivos, sendo sempre necessário vistoriar, reparar e até reforça-los, nos casos de alto estado de corrosão. Em 2009 foi realizada a recuperação de todos os pilares e pórticos. Sugerimos que seja elaborado um planejamento ou cronograma de avaliações.

O Pórtico Monumental de Natal/RN é uma estrutura totalmente ao ar livre. Sujeita a chuva e a emissão de Dióxido de Carbono. Deve-se tratar as fissuras, trincas e corrosão do aço e reforçar o bloco de coroamento. Também é necessário reparar a corrosão das armaduras passivas e aumentar o seu recobrimento, utilizando concreto projetado, em toda a sua extensão.

Palavras-chave: Concreto Protendido, Durabilidade, Patologias.

ABSTRACT

This work approaches concepts about reinforced concrete, clarifies about the appearance of this material, its raw material for production and the existing compositions.

Similarly to reinforced concrete, it addresses the issues cited above for the prestressed concrete. The paper deals with the definition of protension, its types, its advantages and disadvantages. It reports on the losses of stresses applied to steel cables and presents formulas for calculation of pump pressure, loss of friction, elongation, stresses and applied stresses.

Its objective is to detail the three prestressed concrete constructions executed in Natal / RN, awarded by Rank Brasil, an independent company that has been operating for 17 years throughout the national territory, recording exclusively Brazilian records, with no link with international systems. The sequence of the works follows the date of inauguration of the buildings, respectively: Cathedral of Natal, largest open space in prestressed concrete in Brazil; SESI-SENAI gymnasium, sports gymnasium with greater free span in prestressed concrete in Brazil and Monumental Porch of BR 101, Brazil's largest prestressed concrete balance.

The prestressed concrete is commonly found in the beds of Rio Grande do Norte, requiring a disclosure about how these structures behave during their useful life and about the need for preventive maintenance, since concrete prestressed has no prior notice in cases of collapse of the structural elements .

The results of the visual evaluations and the tests carried out in the record buildings in Brazil, executed in Rio Grande do Norte, show that the pathologies are predominantly manifested in the pieces made of reinforced concrete. This result is expected, because the coverings and characteristic strengths used for the prestressed concrete are always larger than in the pieces in reinforced concrete, evidencing in their greater durability, with smaller water-cement factors.

For the structure of the Cathedral of Natal this analysis observed that the structure fulfills in a satisfactory way its objective. The greatest deficiency of the structure was in its coverage system with regard to the watertightness of this, problem solved with the installation of the Evalon blanket, being necessary only to complement the application of the blanket in a small area of the proposed beam. It is

also necessary to perform repair services of external and internal pillars of this structure and in parts of the bottom slab of the roof. Maintain the Neoprene and Neoflon supports, and the metal plates at the back of the Cathedral.

On the structure of SESI SENAI Gymnasium it was observed that the coverage with straight polygonal beams and solid slabs successfully met its objective. The unfavorable point was that, due to its architectural form, the pillars are exposed to rain and aggressive agents, and it is always necessary to inspect, repair and even reinforce them, in cases of high corrosion. In 2009 the recovery of all the pillars and gates was carried out. We suggest that a planning or evaluation schedule be developed.

The Monumental Portico of Natal/RN is a totally outdoor structure. Subject to rain and the emission of Carbon Dioxide. The cracks, cracks and corrosion of the steel must be treated and the crowning block reinforced. It is also necessary to repair the corrosion of the passive reinforcement and to increase its recoating, using projected concrete.

Keywords: Proposed Concrete, Durability, Pathologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Esquema estático dos esforços em viga protendida.....	18
Figura 02 - Disposição de cabos de protensão de uma viga celular contínua de ponte rodoviária, moldada no local, na região de um apoio intermediário.....	19
Figura 03A - Edifício Hermes 880, em Petrópolis, Natal-RN.....	21
Figura 03B - Edifício Hermes 880, em Petrópolis, Natal-RN.....	21
Figura 04 - Residencial Paris.....	22
Figura 05 - Concreto convencional.....	27
Figura 06 - Concreto ciclópico.....	27
Figura 07 - Concreto bombeável.....	28
Figura 08 - Concreto autoadensável.....	28
Figura 09 - Concreto projetado.....	29
Figura 10 - Concreto Aparente.....	29
Figura 11 - Concreto leve.....	30
Figura 12 - Concreto pesado.....	30
Figura 13 - Concreto massa.....	31
Figura 14 - Concreto para pavimento.....	31
Figura 15 - Fábrica de confecção de pré-moldados em CP com pré-tensão.....	35
Figura 16 - Esquema de pista de confecção de pré-moldados em CP com pré- tensão.....	35
Figura 17 - Viga pós-tensionada, cordoalhas de cabos aderentes.....	36
Figura 18 - Viga pós-tensionada, cabos não aderentes.....	36
Figura 19 - Detalhamento da cordoalha não aderente.....	37
Figura 20A - Esquema da armadura e detalhes construtivos das ancoragens...	38
Figura 20B - Esquema da armadura e detalhes construtivos das ancoragens...	38
Figura 21 - Traçado da protensão externa na face lateral da viga principal.....	39
Figura 22 - Protensão Externa.....	39
Figura 23 - Injetor e purgador da calda de cimento em bainha.....	40
Figura 24 - Barras e cordoalhas para concreto protendido.....	41
Figura 25 - Diagrama de tensões e deformações dos aços para concreto armado e protendido.....	42

Figura 26 - Fachada da Catedral de Natal/RN.....	53
Figura 27 - Vista lateral da Catedral de Natal/RN.....	53
Figura 28 - Esquema dos componentes estruturais da Catedral de Natal/RN....	54
Figura 29 - Diagrama de corpo livre da Catedral de Natal/RN.....	54
Figura 30 - Vista geral da fase final da construção da Catedral de Natal/RN.....	56
Figura 31 - Complexidade da montagem das formas e armações da viga protendida da Catedral de Natal/RN.....	56
Figura 32 - Vigas protendidas e lajes em concreto armado do telhado do ginásio SESI-SENAI.....	57
Figura 33 - Encontro das diagonais dos trapézios da forma da planta baixa.....	58
Figura 34 - Perspectiva externa do ginásio SESI-SENAI mostra viga apoiada no pilar.....	59
Figura 35 - Pórtico Monumental de Natal/RN.....	60
Figura 36 - Vértice inferior do Pórtico Monumental.....	61
Figura 37 - Parte do bloco de fundação e da seção de engastamento.....	61
Figura 38 - Corrosão linear na laje de fundo da parte externa, na fachada principal.....	67
Figura 39 - Ausência de pingadeiras e impermeabilização na viga protendida e na laje.....	68
Figura 40 - Pilares dos pórticos com aparência manchada devido agentes agressivos externos.....	72
Figura 41 - Aplicação do hidrojateamento para remoção das sujeitas e resultado final.....	73
Figura 42 - Viga protendida do Ginásio SESI-SENAI com reparo no cobrimento.....	73
Figura 43A - Corrosão linear das armaduras passivas da estrutura.....	75
Figura 43B - Corrosão linear das armaduras passivas da estrutura.....	75
Figura 44 - Bloco de fundação do Pórtico Monumental de Natal/RN.....	75
Figura 45A - Fissuras e trincas no bloco de coroamento da fundação.....	76
Figura 45B - Fissuras e trincas no bloco de coroamento da fundação.....	76
Figura 46A - Aspersão de nitrato de prata e fenolftaleína.....	77
Figura 46B - Aspersão de nitrato de prata e fenolftaleína.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composições de Cimento Portland.....	25
Tabela 02 - Propriedades físicas do concreto com Cimento Portland.....	26
Tabela 03 - Relação água/cimento, classe de resistência e cobrimento nominal, respectivamente. Comparativo entre CA e CP.....	34
Tabela 04 - Propriedades físicas do aço.....	41
Tabela 05 - Características mecânicas dos aços para concreto protendido.....	42
Tabela 06 - Valores de μ por Raul Lobato.....	48
Tabela 07 - Valores de μ pela NBR 7197:1989.....	48
Tabela 08 - Valores em porcentagem das perdas de relaxação do aço.....	50
Tabela 09 - Porcentagens de perdas por relaxação para aços.....	51
Tabela 10 - Valores finais do cálculo do Pórtico da BR 101.....	62
Tabela 11 - Resultados do ensaio eletrodo de cobre/sulfato de cobre.....	64
Tabela 12 - Resultados do ensaio teor de cloreto – Método de Mohr.....	65
Tabela 13 - Resultados do ensaio porosidade.....	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 - Grau de protensão.....	42
Equação 02 - Força inicial aplicada.....	43
Equação 03 - Esforço médio.....	43
Equação 04 - Alongamento do cabo.....	43
Equação 05 - Pressão Manométrica da bomba.....	44
Equação 06 - Inclinação do cabo.....	44
Equação 07 - Comprimento do cabo.....	44
Equação 08 - Esforço de protensão no meio do vão em cabo parabólico.....	45
Equação 09 - Tensão de protensão inicial na pré-tração para aço de relaxação normal.....	45
Equação 10 - Tensão de protensão inicial na pré-tração para aço de relaxação baixa.....	45
Equação 11 - Tensão de protensão inicial na pós-tração para aço de relaxação normal.....	45
Equação 12 - Tensão de protensão inicial na pós-tração para aço de relaxação baixa.....	45
Equação 13 - Tensão de protensão inicial para cordoalhas engraxadas.....	45
Equação 14 - Tensão de protensão inicial para aço CP-85/105 fornecido em barra.....	45
Equação 15 - Tensão de protensão no término das operações na pré-tração e pós-tração para aço de relaxação normal.....	46
Equação 16 - Tensão de protensão no término das operações na pré-tração e pós-tração para aço de relaxação baixa.....	46
Equação 17 - Força de protensão no término da operação.....	46
Equação 18 - Tensão máxima ancorada.....	46
Equação 19 - Determinação do esforço de protensão.....	46
Equação 20 - Encurtamento imediato do concreto.....	47
Equação 21 - Perda média de encurtamento para n cabos.....	47
Equação 22 - Perda de protensão imediata na região central por encurtamento do concreto.....	48
Equação 23 - Perda de protensão imediata devido ao atrito.....	48

Equação 24 - Perda imediata devido à acomodação da ancoragem em cabo parabólico.....	49
Equação 25 - Perda imediata devido à acomodação da ancoragem em cabo retilíneo.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a - Distância do apoio da viga até a posição do cabo externamente.
- A_C - Área da seção, homogeneizada.
- A_{CIL} - Área do cilindro, geralmente 20 cm².
- A_{PO} - Área do cabo de aço.
- α_e - Relação E_P/E_C . Entre os módulos de deformação do aço e do concreto na idade da protensão.
- c - Área da seção transversal do cabo.
- D - Diâmetro do cabo.
- E_C - Módulo de elasticidade do concreto.
- E_P - Módulo de elasticidade do aço.
- e_p - Excentricidade.
- f_{pt} - Resistência de ruptura a tração do aço de protensão.
- f_{ptk} - Valor característico da resistência de ruptura a tração do aço de protensão.
- f_{pyk} - Valor característico da resistência limite de escoamento do aço de protensão.
- σ_{po} - tensão da armadura ativa correspondente a P_o .
- G_1 - Peso próprio.
- I_C - Inércia da seção, homogeneizada.
- K - Coeficiente de perda por metro.
- l - Distância entre os apoios.
- l_C - Comprimento do cabo parabólico.
- l_{bp} - Comprimento de ancoragem para armadura ativa.
- $M_{MÁX}$ - Momento característico máximo.
- M_O - Momento fletor de descompressão.
- n - Numero de cabos protendidos sucessivamente.
- N_p - Esforço de protensão.
- P - Pressão manométrica da bomba.
- P_i - Força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração.
- $P_{MÁX}$ - Esforço efetivo máximo no cabo de protensão junto à ancoragem.
- $P_{MÉD}$ - Esforço médio.
- P_o - Força aplicada de protensão.
- P_x - Esforço de protensão no meio do vão.

$\Delta\sigma_p$ - Encurtamento imediato do concreto.

θ - Inclinação do cabo.

μ - Coeficiente de atrito.

σ_c - Tensão no concreto.

σ_p - Tensão no aço.

σ_{pi} - Tensão de protensão inicial.

σ_{po} - Tensão da armadura de protensão.

σ_{PMAX} - Tensão no cabo de protensão junto à ancoragem.

σ_{cg} - Tensão de concreto ao nível do centro de gravidade da variação da força na ação das cargas permanentes.

σ_{cp} - Tensão do concreto ao nível do centro de gravidade de A_p .

$\Sigma\alpha$ - Soma dos ângulos de desvio entre ancoragem e o ponto de abscissa x .

x - Abscissa medida a partir da ancoragem (até o meio do vão). Ponto onde se calcula Δ_p .

ω_{cp} - Perda de protensão devido à acomodação da ancoragem em cabo parabólico.

ω_{cr} - Perda de protensão devido à acomodação da ancoragem em cabo retilíneo.

SUMÁRIO

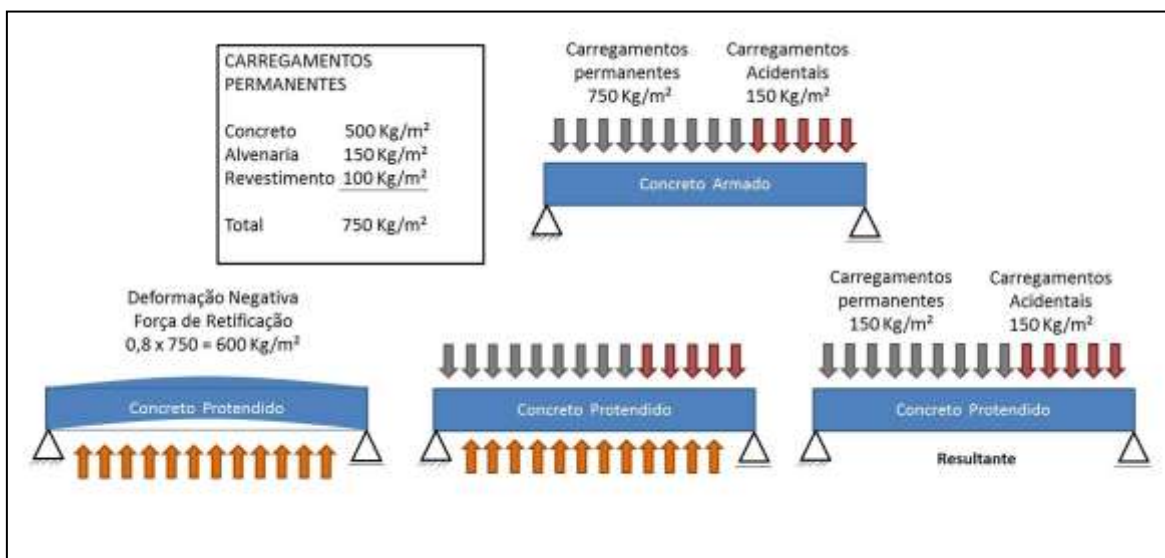
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL.....	22
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	23
3 JUSTIFICATIVA.....	23
4 METODOLOGIA.....	24
5 DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	24
6 CONCRETO E SUAS PATOLOGIAS.....	25
7 CONCEITOS SOBRE CONCRETO PROTENDIDO - ASPECTOS TÉCNICOS E CONSTRUTIVOS.....	33
8 DESCRIÇÃO EXECUTIVA E ESTRUTURAL DAS OBRAS RECORDISTAS BRASILEIRAS EM CONCRETO PROTENDIDO EXECUTADAS EM NATAL.....	52
8.1 CATEDRAL DE NATAL/RN.....	52
8.2 GINÁSIO SESI-SENAI.....	57
8.3 PÓRTICO MONUMENTAL DE NATAL/RN.....	59
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS.....	64
9.1 CATEDRAL DE NATAL/RN.....	64
9.2 GINÁSIO SESI-SENAI.....	70
9.3 PÓRTICO MONUMENTAL DE NATAL/RN.....	73
10 CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os métodos construtivos primitivos eram totalmente empíricos, baseados nas obras semelhantes executadas anteriormente. O surgimento do cimento Portland se deu em 1824 pelo senhor Joseph Aspdin. No ano de 1849, Joseph Louis Lambot desenvolve o concreto armado. Monier foi o que primeiro estabeleceu dimensões de pontes (1873) e peças estruturais (1878) (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 14), iniciando o estudo do concreto armado, que foi largamente desenvolvido por Emil Morsch.

As estruturas de concreto devem ser consideradas como produtos extremamente complexos que apresentam uma enorme variedade de características (BEBER, 2003, p.5) e diferentes causas de patologia. A estrutura porosa do concreto armado permite que agentes agressivos penetrem em sua estrutura (através de poros e fissuras) e acelerem seu desgaste. Na tentativa de se aumentar a durabilidade e a resistência das peças em concreto armado foi introduzido o estado prévio de tensões, que consiste em introduzir na viga esforços prévios que reduzam ou anulem as tensões de tração no concreto sob ação das solicitações em serviço (PFEIL, 1984, p.2). Uma força de sentido oposto ao carregamento (força de retificação) surge no elemento protendido e reduz o efeito da carga que a peça está submetida, como mostrado no esquema estático de uma viga (Figura 1).

Figura 1 – Esquema estático dos esforços em viga protendida.

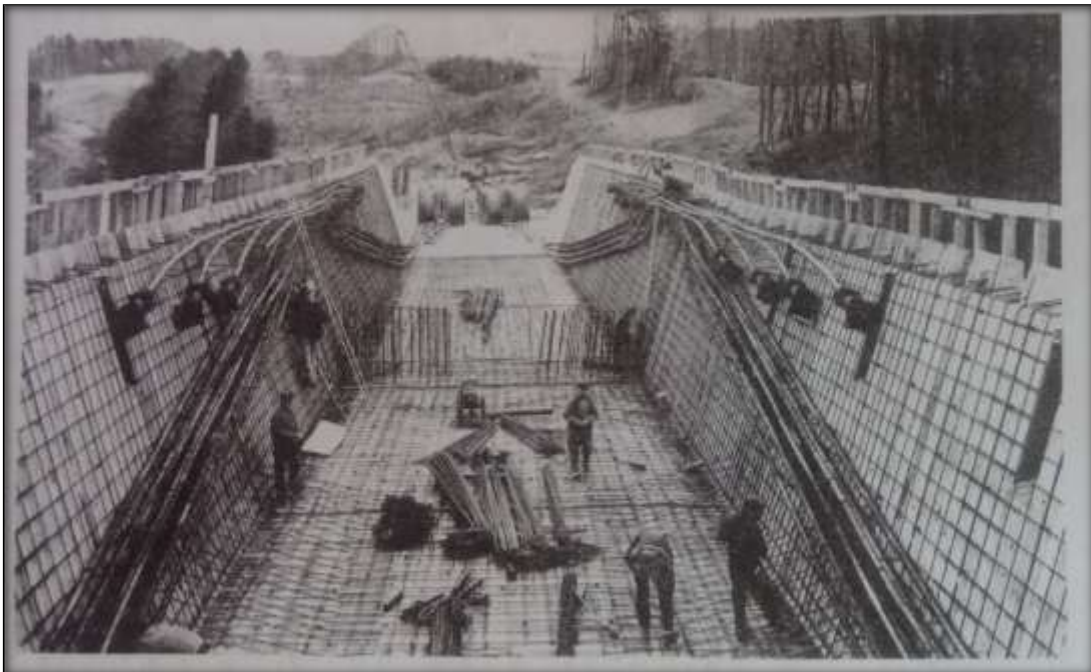


Fonte: CARACAS, Joaquim. Palestra Impacto e Protensão, 2017. ADAPTADO.

Esta técnica aumentou a capacidade de suporte de esforços do conjunto aço e concreto. Observou-se que a protensão total pode eliminar e a protensão parcial pode reduzir as fissuras da microestrutura do concreto, melhorando a proteção mecânica do recobrimento da peça e diminuindo o ataque dos agentes agressivos que fazem o concreto armado ter sua vida útil reduzida.

Chama-se de protensão, a técnica que consiste basicamente em dar tensão aos cabos de aço de alta resistência, tracionados e ancorados no próprio concreto. Estes cabos atravessam toda a estrutura – viga ou laje – passando hora na parte superior, hora na parte inferior, que são definidas a partir da solicitação do momento fletor, (positivo ou negativo). O posicionamento de cabos dentro da estrutura de uma viga pode ser visto na (Figura 2). O tensionamento dos cabos se dá através de macacos hidráulicos, antes de moldar a peça, no tipo pré-tensão ou após o concreto ter atingido uma resistência mínima, que é dimensionada pelo calculista do projeto, no tipo pós-tensão.

Figura 2 – Disposição de cabos de protensão de uma viga celular contínua de ponte rodoviária, moldada no local, na região de um apoio intermediário.



Fonte: PFEIL, Walter. Concreto Protendido, 2ª edição, PG 34.

A utilização do concreto protendido permite a execução de grandes vãos livres, o controle e redução de deformações, execução de projetos arquitetônicos ousados, estruturas que se deseje menor peso próprio, bem como mobilidade de

executar mudanças na posição das alvenarias. Um exemplo atual de edificação executada em concreto protendido e projeto arquitetônico de grandes vãos, com as características citadas é o Edifício Hermes 880, situado no bairro Petrópolis em Natal-RN, (Figuras 3A e 3B).

A primeira obra de edificação em concreto protendido da cidade de Natal/RN foi a Sede da Administração da CAERN (1987). A primeira edificação pública com elementos estruturais de grandes seções em concreto protendido executada no Rio Grande do Norte foi a Catedral de Natal/RN (1988). Os aspectos peculiares do projeto (mostrados no item 8.1) convergiram para a escolha do concreto protendido. No mesmo ano da construção da Catedral, o prédio da Capitania das Artes recebeu revitalização da fachada, construída em 1873, e a construção de um novo prédio, projetado estruturalmente com lajes planas em concreto protendido apoiadas diretamente sobre pilares de seção circular bastante reduzida. Seguindo em ordem cronológica foram edificadas o Hotel Maine (1990), o residencial Paris (1994), conjunto de cinco torres, 12 pavimentos, localizado no bairro de Lagoa Nova, em Natal-RN (Figura 4), o Ginásio SESI SENAI (1995) e o Pórtico Monumental de Natal-RN(1999). As edificações Catedral de Natal/RN, Ginásio SESI SENAI e Pórtico Monumental de Natal/RN estão no Rank Brasil - O livro dos recordes brasileiros como, respectivamente, maior vão livre em concreto protendido, ginásio de esportes com maior vão livre em concreto protendido e maior balanço em concreto protendido, portanto, escolhidas para pesquisa sobre seus aspectos estruturais e processos construtivos, como também para saber as condições estruturais atuais destas edificações, sendo este o objetivo principal do trabalho.

Figura 3A e 3B – Edifício Hermes 880, em Petrópolis, Natal-RN, estrutura em concreto protendido. Dois pavimentos em sub solo, sete pavimentos superiores com duas unidades por pavimento, com até 243 m² de layout personalizado. Arquiteto Felipe Bezerra.

A)



B)



Fonte: FINOTTI, Leonardo. Disponível em:< <http://www.leonardofinotti.com/projects/hermes-880-building> >. Acesso em: 21.set.2018. JUNIOR, Demétrius. Disponível em <<http://www.clitenescarlos.com.br/2013/05/coluna-formas-por-demetrius-junior.html>>. Acesso em 22.set.2017

Figura 4 – Residencial Paris, cinco torres: Arc de Triomphe, Tour Eiffel, Champs Elysees, Louvre, Quartier Latin.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2017.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Discorrer sobre os conceitos, tipos, características e sobre a utilização de concreto protendido nos elementos estruturais no Brasil, fazendo uma pesquisa bibliográfica em livros, tccs, artigos e dissertações, além da descrição da aplicação histórica da técnica no Brasil. Conhecer o Know-how recordista em concreto protendido na cidade de Natal- RN.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar vistorias visuais e analisar ensaios realizados nas edificações recordistas, em concreto protendido, na cidade de Natal/RN, trazendo informações técnicas sobre as suas construções, seus projetos estruturais, conhecer os estados atuais de manutenção e concluir sobre a necessidade ou não de intervenções de recuperação e reforço estrutural das seguintes obras de engenharia: Catedral de Natal/RN, Ginásio SESI SENAI, Pórtico Monumental de Natal/RN.

3 JUSTIFICATIVA

Durante período de estágio no setor de personalização de unidades residenciais, em certa construtora brasileira, em obra composta por três torres, cada torre com cinquenta apartamentos, os responsáveis em aprovar as modificações e orçar serviços, o fazem consultando projeto estrutural, para que todas as mudanças de layout (pontos elétricos, hidráulicos, sanitários, de telecomunicações e gás) sugeridas pelos arquitetos dos proprietários das unidades a serem modificadas, não necessitem atravessar ou furar elementos estruturais após a sua confecção. A frase que sempre se ouvia no setor responsável era: - A “viga faixa” é concreto protendido, portanto não podemos passar as tubulações neste local. A curiosidade foi despertada para entender o que é uma “viga faixa”, ou seja, uma viga protendida, como é a sua construção, seu funcionamento e a justificativa da sua utilização.

Para compreender estas questões buscou-se ler livros sobre o tema. A temática em questão se ampliou e se transformou em estudo de caso quando conhecido que obras importantes, recordistas do Brasil, executadas na nossa cidade, foram construídas com a técnica da protensão e não se conhecia sobre o estado das manutenções preventivas periódicas nestas obras. Estruturas protendidas não possuem aviso prévio em casos de colapso, portanto a análise da durabilidade e das manifestações patológicas das estruturas escolhidas é instrumento para difundir como estão se comportando estas estruturas hoje e que tipo de manutenção lhes foram e podem ser dadas a estas e outras edificações em concreto protendido.

4 METODOLOGIA

Este trabalho será desenvolvido com o auxílio de revisões bibliográficas relacionadas ao tema; análise de ensaios realizados e das patologias encontradas na avaliação das obras e descrição da necessidade ou não de serviços de recuperação e/ou reforço estrutural.

5 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em dez capítulos:

O Capítulo 1 traz, uma introdução compreensiva sobre o surgimento do material concreto e uma derivação deste: concreto protendido.

O Capítulo 2, é composto pelo objetivo geral e objetivo específico. Mostra que serão abordados conceitos, princípios, tipos e sobre a utilização, de concreto protendido no Brasil e em construções da cidade Natal- RN.

O Capítulo 3, apresenta a justificativa do trabalho. Relata como a temática é presente no cotidiano da construção civil e o porquê da escolha do tema.

O Capítulo 4, mostra que a metodologia utilizada para elaboração desta pesquisa inclui consulta a livros, tccs, artigos e documentos, como também em vistorias as edificações.

O capítulo 5, descreve os capítulos deste trabalho.

O Capítulo 6, apresenta a revisão bibliográfica do trabalho, uma breve história do concreto, seguida de alguns conceitos importantes sobre o mesmo tema.

O capítulo 7, discorre sobre concreto protendido, seus aspectos técnicos e construtivos, apresenta os tipos de protensão existentes.

O Capítulo 8, apresenta a análise das principais estruturas em concreto protendido, recordistas, executadas em Natal, sendo dividido em 3 itens: Catedral de Natal/RN, Ginásio Sesi SENAI, Pórtico Monumental de Natal/RN.

O capítulo 9, traz os resultados observados nas vistorias e possíveis serviços de manutenção e/ou recuperação estrutural.

O capítulo 10, mostra a conclusão da observação do estado atual destas edificações.

6 CONCRETO E SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

O concreto é constituído pela mistura de materiais cerâmicos, ativos, o aglomerante (cimento) e inertes: agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e da água, necessária no processo das reações químicas.

Existem dois tipos de aglomerantes. A cal hidratada, aglomerante obtido do beneficiamento da cal virgem - pulveriza-se água a cal virgem - resultado da calcinação do calcário. E o cimento artificial, é o aglomerante resultado da queima conjunta de duas matérias-primas bem dosadas e fragmentadas à uma temperatura de 1450°C. “Uma das matérias-primas é a rocha calcária com elevado teor de carbonato de cálcio e a outra matéria-prima é a argila com proporções bem definidas de sílica, alumina e ferro.”(LARA, 2013). Misturando gipsita e outros componentes minerais (adições), obtém-se cimentos Portland de diferentes tipos e comportamentos. A (Tabela 1), mostra os diversos tipos de cimento Portland, classificados em uma das três classes de resistência mecânica (25/32/40), correspondentes às tensões (em MPa) que os corpos de prova são rompidos aos 28 dias de idade. O cimento artificial é o aglomerante utilizado na confecção dos concretos de peças estruturais.

Tabela 1 – Composições de Cimento Portland.

Nome Cimento Portland	Sigla	Classe	Clinker + gipsita	% Escória	% Pozolana	% Calcário
Comum	CP I	25/32/40	100	-	-	-
Comum com adições	CP I-S	25/32/40	95 – 99	1 - 5		
Composto com escória	CP II-E	25/32/40	56 – 94	6 – 34	-	0 – 10
Composto com pozolana	CP II-Z	25/32/40	76 – 94	-	6 – 14	0 – 10
Composto com filler calcário	CP II-F	25/32/40	90 – 94	-	-	6 – 10
Alto-forno	CP III	25/32/40	25 – 65	35 – 70	-	0 – 5
Pozolânico	CP IV	25/32	45 – 85	-	15 – 50	0 – 5
Alta resistência inicial	CP V	-	95 – 100	-	-	0 – 5

Fonte: LARA, Luiz Alcides Mesquita. Materiais de Construção. ADAPTADO das normas ABNT.

Na mistura que produz os concretos também podem ser acrescentados aditivos, produtos químicos, líquidos ou em pó, que destacam as propriedades especiais do concreto, tais como: aumento rápido da resistência, diminuição do calor de hidratação, aumento da plasticidade e retardo ou agilização da pega.

O concreto é um material isotrópico, suas propriedades não variam em função da direção, no estado endurecido apresenta boa resistência à compressão, sendo classificado pela resistência em dois grupos, classe I e II. A classe I é a mais utilizada. A classe II é composta por concretos de alto desempenho (CAD). O concreto também apresenta pequena resistência à tração (entre 8% e 12% da resistência a compressão).

Para concretos confeccionados com Cimento Portland temos as propriedades físicas apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Propriedades físicas do concreto com Cimento Portland.

Massa Específica - μ (Kg/dm ³)	2,00 a 2,20
Coeficiente de dilatação linear – α (°C ⁻¹)	12×10^{-6}
Condutividade térmica - (W/m.K)	1,2
Condutividade elétrica - σ (1/Ω.m)	Varia com o traço
Módulo de Elasticidade – (MPa)	15.000 a 30.000

Fonte: LARA, Luiz Alcides Mesquita. Materiais de Construção. ADAPTADO.

Novos tipos de concretos surgiram em função das aplicações, funções, economia de mão de obra e materiais, estética e condições de resistência mecânica, de segurança e de durabilidade das obras. Vejamos outros tipos de concretos:

- Concreto convencional: Concreto comum confeccionado na própria obra cujo lançamento ocorre de modo tradicional. Sua plasticidade, medida pelo abatimento do tronco de cone, varia de 50 a 150 mm (Figura 5).

Figura 5 – Concreto convencional.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2018.

- **Concreto Ciclópico:** É um concreto convencional onde, por motivos econômicos, é adicionado cerca de 30% do volume a ser concretado, pedra de mão (agregado de dimensão máxima característica - DMC $\geq$ 152 mm) durante o lançamento (Figura 6).

Figura 6 – Concreto ciclópico.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

- **Concreto Bombeável:** Concreto cujo transporte e lançamento são efetuados por intermédio de bombas hidráulicas, que o impulsionam

através de tubos metálicos até o interior da forma ou próximo dela; plasticidade de 120 a 200 mm (Figura 7).

Figura 7 – Concreto bombeável.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

- **Concreto Autoadensável:** Concreto com slump acima de 250 mm. É dimensionado com britas de menor DMC, alto teor de argamassa, alto teor de finos (material passante na peneira nº 200), areia de granulometria contínua (para evitar a segregação) e aditivo superfluidificante. Indicado para concretagens de peças densamente armadas (Figura 8).

Figura 8 – Concreto autoadensável.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

- **Concreto projetado:** Concreto de pega ultrarrápida lançado também por bombas. Apresenta características de ser bem argamassado, brita

de reduzida DMC, consumo de cimento cima de 400 kg/m³, baixo fator a/c, alta aderência e pega quase instantânea devido ao uso de aditivo acelerador (Figura 9).

Figura 9 – Concreto projetado.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

- Concreto aparente: A superfície não recebe recobrimento com argamassa, cerâmica ou tinta pigmentada, ficando à vista logo após a sua desforma (Figura 10).

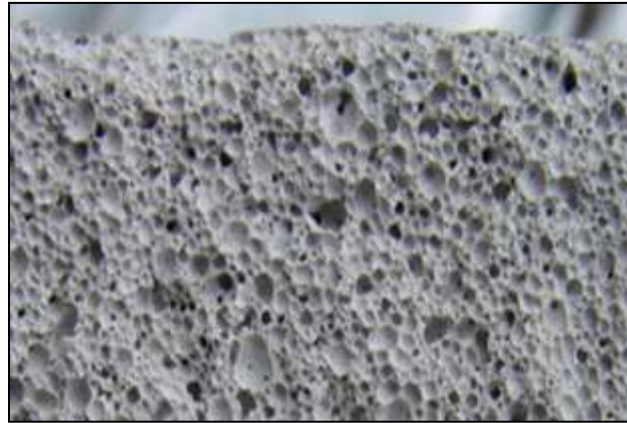
Figura 10 – Concreto aparente.



Fonte: SITE SENAI. (2019).

- Concreto leve: Este concreto é, na verdade, uma argamassa celular, pois não possui o agregado graúdo e o agregado miúdo utilizado, é o pó de alumínio. É confeccionado com aditivos espumígenos ou incorporadores de bolhas de ar, não intercomunicáveis, na massa durante a mistura (Figura 11).

Figura 11 – Concreto leve.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

- Concreto pesado: Concreto elaborado com agregados de elevada massa específica, como os minérios de ferro ou os fragmentos de aço. A principal finalidade deste tipo de material é a construção de estruturas capazes de conter radiação (Figura 12).

Figura 12 – Concreto pesado.



Fonte: TOPMIX Concreto. (2019).

- Concreto massa: Concreto com baixo consumo de cimento ($< 150 \text{ kg/m}^3$), uso de cimento de baixo calor de hidratação, retardador de pega e agregados de grandes DMC ($> 76 \text{ mm}$). Pode ser compactado a rolo. É usual em barragens, fundações de torres eólicas, assim

como nas grandes vigas e pilares de edificações, pontes e viadutos (Figura 13).

Figura 13 – Concreto massa.



Fonte: Construtora Fernandes Ltda. (2019).

- Concreto para pavimento: Concreto confeccionado para tráfego de veículos. Diferencia-se dos anteriores pela característica de ser resistente à tração e à abrasão (Figura 14).

Figura 14 – Concreto para pavimento.



Fonte: IBIMIX Concreto. (2019).

Segue abaixo as principais patologias encontradas no concreto:

A corrosão de armaduras é o processo de enfraquecimento da armadura presente no concreto armado, reduz a resistência aos esforços mecânicos da estrutura. A corrosão ocorre devido a insuficiência do recobrimento (armadura exposta) ou por porosidade no concreto por deficiência no adensamento, permitindo

a entrada de umidade e outros agentes agressivos. Evita-se esta patologia fazendo o correto adensamento do concreto, respeitando o recobrimento das armaduras, fazendo a inspeção e manutenção periódica, principalmente em locais propensos ao acúmulo de água e em locais de agressividade ambiental acentuada como, marquises, pontes e viadutos; utilizando ainda cimento autoadensável ou preferencialmente com adições.

A eflorescência é o aparecimento de manchas brancas no concreto. A causa desta patologia é a infiltração de umidade no concreto que juntamente com o contato do gás carbônico da atmosfera dá origem ao material carbonato (manchas esbranquiçadas). Para evitar a eflorescência devem-se utilizar cimentos com adições que reduzem os compostos geradores da patologia; aplicar polímeros ou impermeabilizantes na superfície para impedir a entrada de umidade no concreto e quando executar alvenarias e revestimentos externos optar por processos mais secos.

As trincas ou fissuras são aberturas indesejáveis na superfície do concreto, com diversos graus de largura e profundidade. Elas surgem por causa da retração no concreto em função da rápida perda da água, em virtude de alta temperatura e baixa umidade do ar no momento da concretagem e cura. A superfície seca rapidamente e a resistência do concreto, ainda baixa, não consegue impedir a trinca. Para diminuir esse problema deve-se impedir que a água evapore rapidamente fazendo-se uma proteção ativa, que pode ser aspersão de água, uso de película química, mantas, sacos de aniagem, areia molhada, lona plástica ou sacos de papel umedecidos. Pode-se também adicionar fibras sintéticas de polipropileno.

Manchas ocorrem quando a água ao atravessar uma peça de concreto fica aderente, fazendo surgir o bolor, um acúmulo de fungos dos mais variados tipos, estes geram colônias que se alimentam de materiais orgânicos. Forma-se manchas escuras indesejáveis em tonalidades preta, marrom e verde, ou ocasionalmente, manchas claras esbranquiçadas ou amareladas. Para evitar esta patologia deve-se prevenir as infiltrações e umidade excessiva no concreto, aplicar polímeros ou impermeabilizantes na superfície.

7 CONCEITOS SOBRE CONCRETO PROTENDIDO - ASPECTOS TÉCNICOS E CONSTRUTIVOS.

No concreto armado (CA) utiliza-se o aço para absorver os esforços de tração, e o concreto para resistir os esforços de compressão e cisalhamento. Quando a estrutura recebe carregamentos de serviço, e a tração que ocorre na parte inferior do elemento estrutural supera a capacidade do concreto de resistir à tração surgem fissuras na peça, que deixam o aço exposto a agentes agressivos e limita o campo de aplicação do concreto armado, não permitindo utilizar boa parte da elevada resistência do aço a este esforço. O concreto protendido (CP) introduz esforços que anulam ou limitam as tensões de tração do concreto, de modo a eliminar a abertura das fissuras como condição determinante do dimensionamento da viga. O artifício da protensão desloca a faixa de trabalho do concreto para o âmbito das compressões, onde o material é mais eficiente (PFEIL, 1984, p.2).

Em peças em concreto protendido empregam-se aços de protensão com resistências de 4 a 5 vezes maior que os aços convencionais e resistências do concreto de 2 a 3 vezes maior que as resistências empregadas no concreto armado.

As vantagens da aplicação desse artifício em relação ao concreto armado convencional são percebidas na redução da quantidade de concreto e aço utilizada, nas seções mais esbeltas e leves, na possibilidade de execução de vãos maiores, na possibilidade de testes nos elementos (uma prova de carga) antes de receberem as cargas de serviço.

As desvantagens da protensão em relação ao concreto armado se dão na necessidade de melhor controle na execução de concretos com maior resistência, assim como maiores cuidados com relação à corrosão dos aços de alta resistência. Deve-se observar com precisão a colocação dos cabos e execução da protensão através de equipamentos, que necessitam de mão de obra mais especializada, como também fazer o controle permanente dos esforços aplicados e do alongamento dos cabos.

A utilização da protensão em estruturas pré-moldadas apresenta uma série de vantagens: no caso de peças fletidas, como toda a seção trabalha como compressão, o aproveitamento da capacidade resistente da seção é muito maior. Observa-se menos retração, menos deformação, menos fissuras e manutenção do fechamento de fissuras produzindo maior proteção contra a corrosão. Através da

classificação de agressividade do ambiente que será construído, norma NBR 6118-2014, é definido o fator água cimento e a classe de resistência para os concretos, como mostrado na (Tabela 3). As estruturas em concreto protendido tem maior recobrimento das armaduras, maior resistência à compressão e tem menor relação a/c do que estruturas de concreto armado, consequentemente uma maior durabilidade.

Em função da posição do esforço normal na seção podemos ter *protensão centrada*, aquela onde a força de protensão é aplicada no centro de gravidade da seção transversal, a compressão é uniforme na seção; ou *protensão excêntrica* onde a força varia dentro da seção transversal, gerando flexão composta normal com tensões máximas nas fibras extremas, superior e inferior. “A escolha deve ser conduzida caso a caso em função dos carregamentos” (CHOLFE, 2015, p.36). Para regiões com momentos fletores, recomenda-se a protensão excêntrica. Nas seções com baixos ou nenhum momento fletor, a força de protensão deve estar pelo menos dentro do núcleo central de inércia.

Tabela 3 – Relação água/cimento, classe de resistência e cobrimento nominal, respectivamente. Comparativo entre CA e CP.

CONCRETO ARMADO				
Classe	Água/Cimento	Resistência (MPa)	Cobrimento para laje (mm)	Cobrimento para viga/pilar (mm)
Classe I	0,65	C20	20	25
Classe II	0,60	C25	25	30
Classe III	0,55	C30	35	40
Classe IV	0,45	C40	45	50
CONCRETO PROTENDIDO				
Classe	Água/Cimento	Resistência (MPa)	Cobrimento para laje, viga e pilar (mm)	
Classe I	0,60	C25	30	
Classe II	0,55	C30	35	
Classe III	0,50	C35	45	
Classe IV	0,45	C40	50	

Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula. ADAPTADO. (2018)

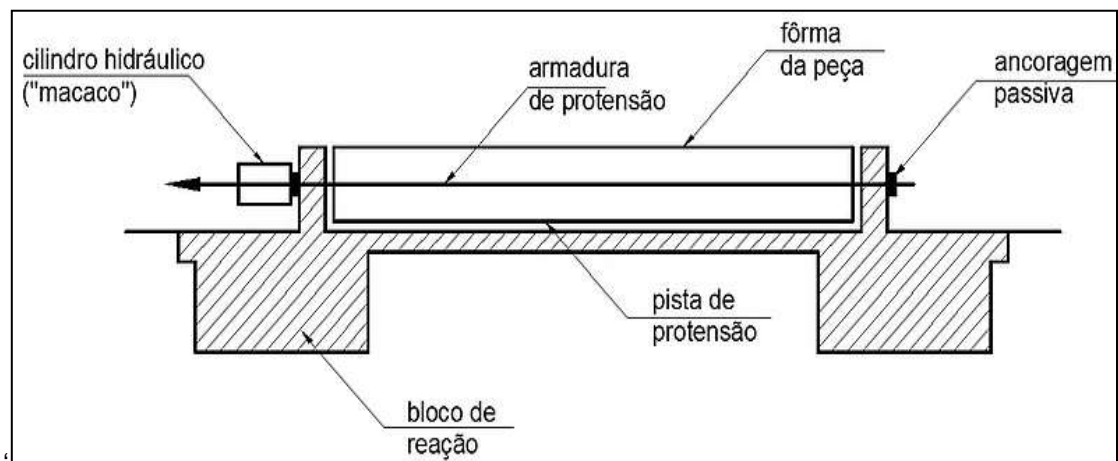
Quanto ao processo construtivo, quando fazer o estiramento dos cabos, a protensão pode ser *pré-tensionada*. Cabos são estirados na pista de proteção (Figura 15), antes do lançamento do concreto na forma. A vantagem deste tipo de protensão empregado em peças pré-moldadas é a produção de grandes quantidades de peças iguais. Não é utilizada a bainha, o que diminui o custo e existe reaproveitamento das ancoragens. A desvantagem deste modelo é o alto custo dos maciços de concreto armado utilizados na pista de protensão, mostrada na (Figura 16). Também pode ser do tipo *pós-tensionada*, o cabo é tensionado após a concretagem e endurecimento da viga ou laje.

Figura 15 – Fábrica de confecção de pré-moldados em CP com pré-tensão.



Fonte: CAETANO, Cristiano Curado Abrantes; FIRMINO, Marcus Vinicius do Nascimento. Concreto Protendido: Material Didático para o Autoaprendizado. Estimativa de carga de protensão.

Figura 16 – Esquema de pista de confecção de pré-moldados em CP com pré-tensão.



Fonte: Site 3ES Engenharia. Disponível em: < <http://www.3es.eng.br/concretoarmado01> >. Acesso em: 21.nov.2018.

A pós-tração pode ser com aderência posterior - protensão com aderência - (Figura 17), onde a calda de cimento, a qual, de acordo com a NBR 7681:2013, deve ter contração volumétrica no máximo igual a 2%, boa fluidez, f_{ck} de 20 MPa aos 7 dias, f_{ck} de 30 MPa aos 28 dias e fator a/c entre 0,35 a 0,44, preenche os espaços vazios residuais dos cabos que estão no interior bainha. É mais utilizado em estruturas de médio a grande porte e em obras viárias de infraestrutura. Também pode ser pós tracionada sem aderência posterior - protensão sem aderência – (Figura 18) .

Figura 17: Viga pós-tensionada, cordoalhas de cabos aderentes.



Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula. (2018)

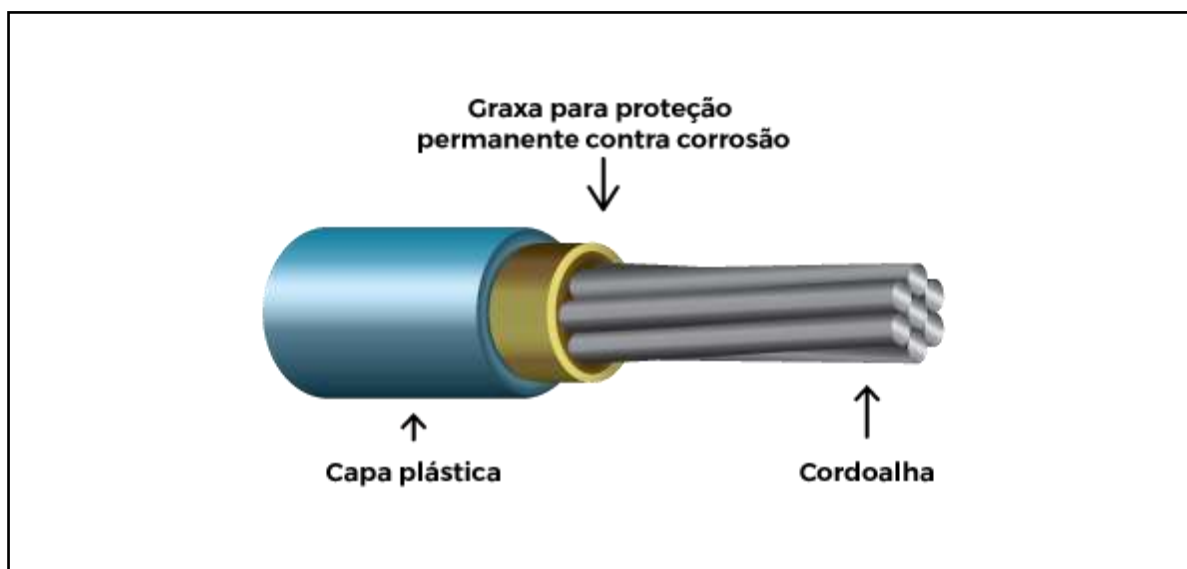
Figura 18: Viga pós-tensionada, cabos não aderentes.



Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula.

Nesse caso, a cordoalha de aço é protegida por uma capa plástica, em todo seu comprimento longitudinal, entre aço e capa existe lubrificação por graxo, ficando o aço não aderido ao concreto. Detalhe da cordoalha na (figura 19).

Figura 19 – Detalhamento da cordoalha não aderente.



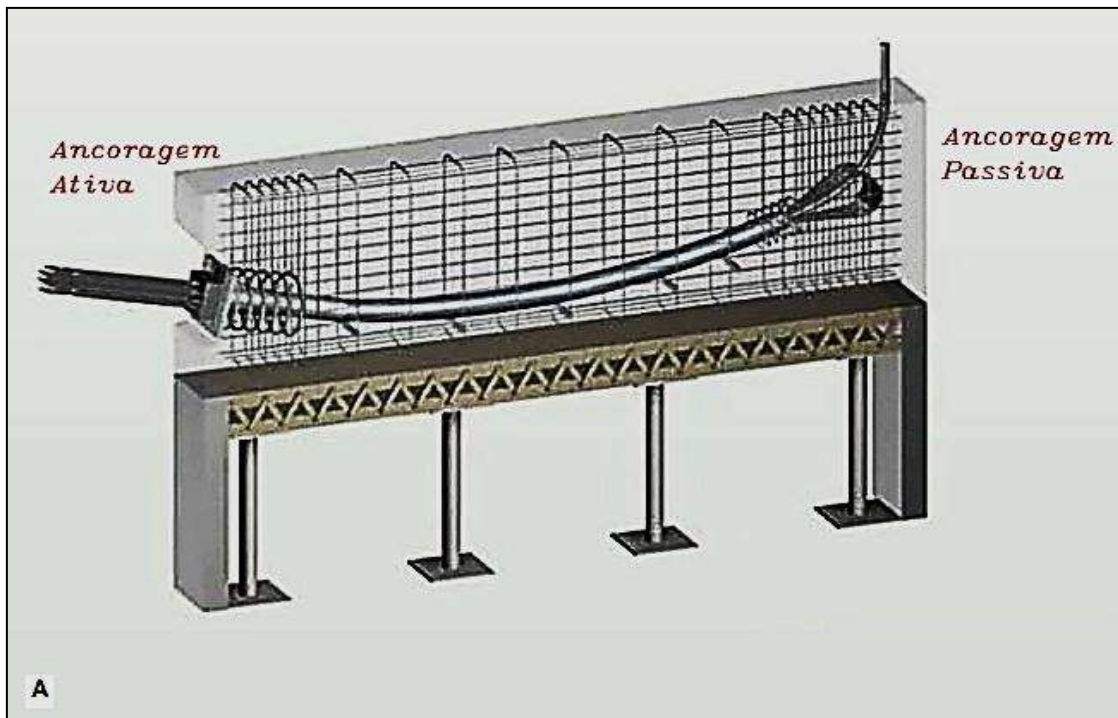
Fonte: Site Impacto Protensão. Disponível em: <<http://www.impactoprotensao.com.br/protensao/>>
Acesso em: 26.10.17.

Na protensão não aderente temos a vantagem do atrito na cordoalha-bainha ser menor, exclui-se a injeção da calda de cimento e havendo alguma necessidade os cabos podem ser substituídos. Como desvantagem existe um esforço permanente nas ancoragens, o que se reduz a capacidade de resistência dos cabos. Também se deve ter maior atenção em situações que necessitem fazer aberturas na laje para não atingir cabos e estes perder toda a tensão.

Quanto aos pontos de aplicação da tensão, pode ser ativa-ativa (protensão dos dois lados) ou ativa-passiva (protensão só de um lado). Demonstradas na (Figura 20A e 20B).

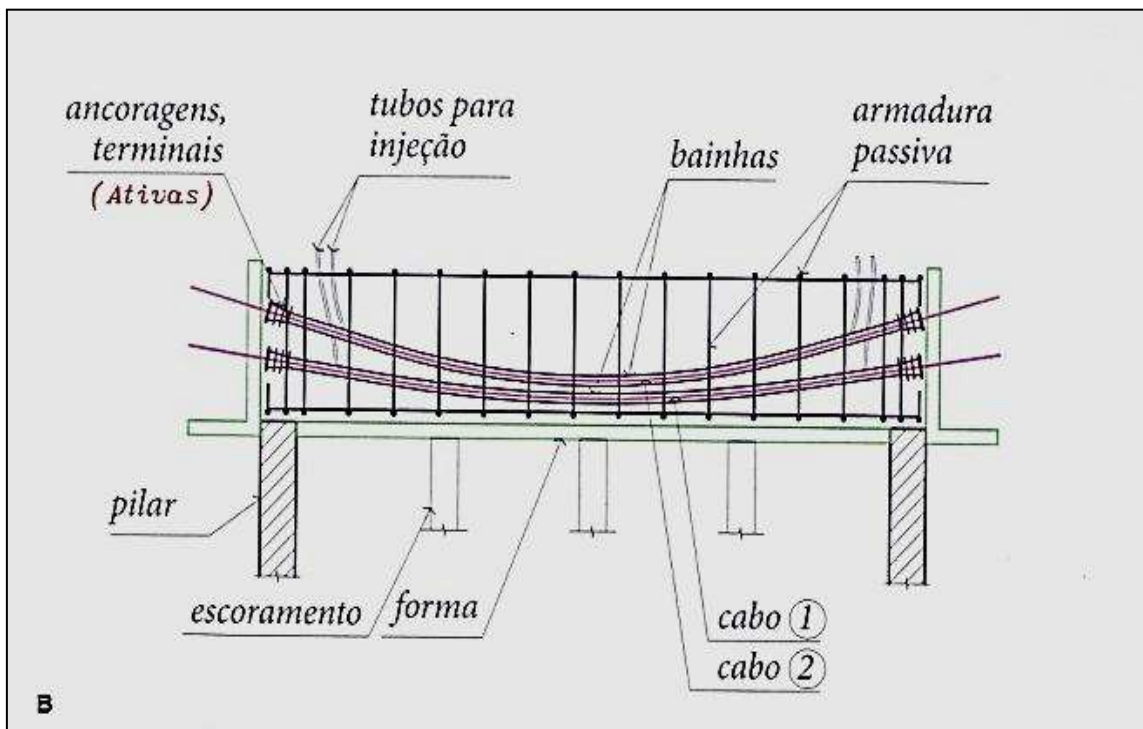
“Quando a armadura ativa estiver atuando fora da seção de concreto, a peça estará sob efeito de uma *protensão externa*” (CHOLFE, 2015, p.57). Bastante utilizada em pontes e viadutos e como reforço de estruturas prontas (Figura 21 e 22).

Figura 20A – Esquema da armadura e detalhes construtivos das ancoragens.



Fonte: RUDLOFF. Catálogo do concreto protendido. Disponível em:<
<https://www.yumpu.com/pt/document/view/12938221> >. Acesso em: 21.nov.2018.

Figura 20B – Esquema da armadura e detalhes construtivos das ancoragens.



Fonte: CHOLFE, Luiz. 2015, p.53. ADAPTADO.

Figura 21 – Traçado da protensão externa na face lateral da viga principal.



Fonte: VITORIO, José Afonso Pereira. Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa. (2011).

Figura 22 - Protensão externa.

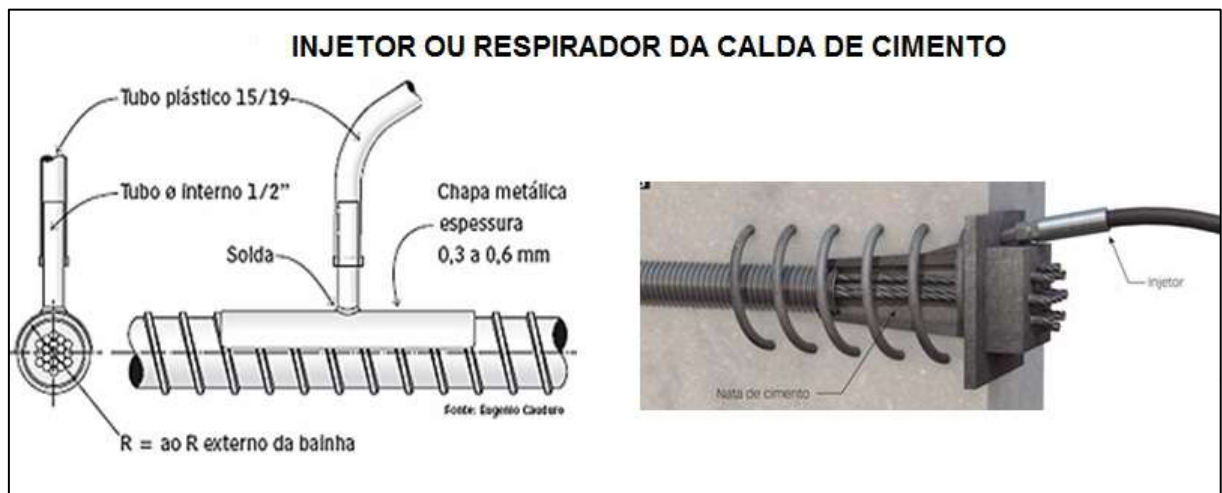


Fonte: ROSAS, Letícia R. Batista. Concreto Protendido: Sistemas de Aplicação da protensão.

Em geral se fazem duas etapas de protensão sendo de 3 a 7 dias nas lajes e de 5 a 10 dias nas vigas. O macaco hidráulico, constituído de cilindro e pistão de seção cheia ou em coroa circular, aplica a força de protensão nos cabos presos ao macaco quando a bomba injeta uma emulsão pressurizada no corpo do cilindro. A

pressão causa um deslocamento entre o pistão e cilindro, produzindo alongamento dos cabos. Na situação de pós-tensão com aderência, a próxima etapa será a injeção da calda de cimento dentro da bainha, tubos fabricados de chapa de aço laminada a frio com espessura de 0,1 a 0,35 mm, costurado em hélice. A calda pode ser injetada através de injetores (nos pontos mais baixos) e purgadores ou respiros (nos pontos mais altos), tubos plásticos de polivinil corrugado (Figura 23), instalados no comprimento longitudinal da bainha, quando o conjunto cabo e bainha tem posicionamento curvilíneo, ou pelo injetor existente na placa de ancoragem.

Figura 23 – Injetor e purgador da calda de cimento em bainha.



Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula. ADAPTADO. (2018).

Os Aços para CP podem ser: fios trefilados, cordoalhas e barras (Figura 24) sendo classificada de acordo com o valor característico da resistência a tração f_{ptk} e quanto à relaxação normal (RN) ou relaxação baixa (RB).

- Fios trefilados de aço carbono com diâmetro de 3 a 8 mm podendo atingir até 12 mm fornecidos em rolos ou bobinas. A trefilação produz enruamento do aço aumentando a resistência. Deformação unitária de 1 ‰. Módulo de elasticidade igual a 20.500 tf/cm².
- Cordoalhas: produtos formados por fios enrolados em forma de hélice como uma corda. As cordoalhas mais comuns são constituídas por três ou sete fios. Deformação unitária igual a 1 ‰. Módulo de elasticidade igual a 19.500 tf/cm².

- Barras de aço liga de alta resistência laminadas a quente com diâmetro superior a 12 mm fornecidas em peças retilíneas de comprimento limitado.

Figura 24: Barras e cordoalhas para concreto protendido.



Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula. (2018)

Segundo VERISSÍMO e CÉSAR JR (1998), Quanto a modalidade de tratamento os aços podem ser:

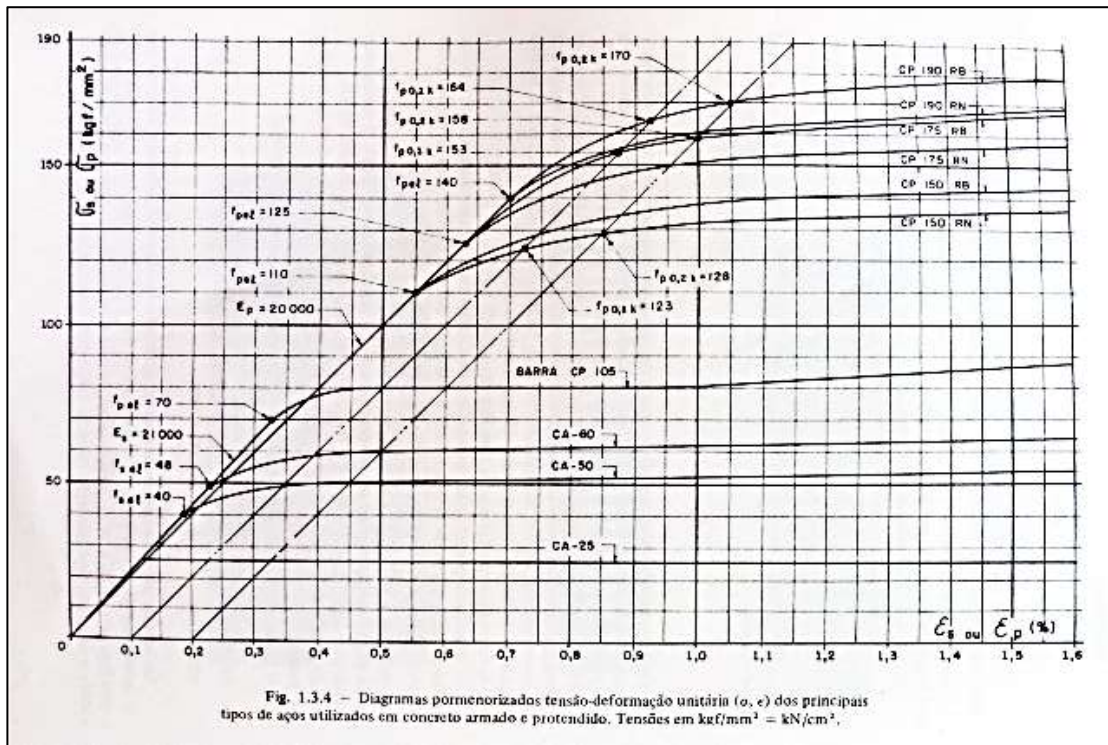
- Aços aliviados ou de relaxação normal (RN). São aços retificados por um tratamento térmico que alivia as tensões internas de trefilação.
- Aços estabilizados ou de relaxação baixa (RB). São aços que recebem um tratamento termomecânico que melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação.

Assim como feito para o concreto também listo algumas propriedades físicas do aço, apresentadas na (Tabela 4), apresento diagrama de tensão e deformação para os aços utilizados em concreto armado e protendido (Figura 25) e tabela com características mecânicas dos aços protendidos (Tabela 5):

Tabela 4 – Propriedades físicas do Aço

Massa Específica - μ (Kg/dm³)	7,65 a 7,85
Coeficiente de dilatação linear - α (°C⁻¹)	12×10^{-6}
Condutividade térmica (W/m.K)	46
Condutividade elétrica - σ (1/Ω.m)	$0,06 \times 10^8$
Módulo de Elasticidade - (MPa)	210.000

Fonte: LARA, Luiz Alcides Mesquita. Materiais de Construção. ADAPTADO.

Figura 25 – Diagrama de tensões e deformações dos aços para concreto armado e protendido.

Fonte: PFEIL, Walter. Concreto Protendido, 2ª edição, PG 18. (1984)

Tabela 5 – Características mecânicas dos aços para concreto protendido.

Características mecânicas especificadas para aços de protensão															
Designação	Tipo	Resistência característica à ruptura (f_{ptk})			Limite de escoamento convencional ($f_{pyk} = f_{p0,2k}$)			Tensão corr. à def. unit. resid. 0,1% ($f_{pn,1k}$)			Limite elástico (f_{pef})			Alongamento unit. de ruptura (ϵ_{rut}) %	Relaxação a 1 000 horas, a 20° C, na tensão $\sigma_p = 0,7 f_{ptk}$
		kgf/mm ² kN/cm ²	kgf/cm ²	N/mm ² MPa	kgf/mm ² kN/cm ²	kgf/cm ²	N/mm ² MPa	kgf/mm ² kN/cm ²	kgf/cm ²	N/mm ² MPa	kgf/mm ² kN/cm ²	kgf/cm ²	N/mm ² MPa		
CP 105	barra	105	10 500	1 050	80	8 000	800	105	10 500	1 050	70	7 000	700		
CP 125	barra	125	12 500	1 250	110	11 000	1 100	125	12 500	1 250	100	10 000	1 000		
CP 150 RN	fio	150	15 000	1 500	128	12 800	1 280	123	12 300	1 230	110	11 000	1 100	6	5
CP 175 RN	cordoalha	175	17 500	1 750	150	15 000	1 500	145	14 500	1 450	125	12 500	1 250	3,5	7
CP 175 RB	cordoalha	175	17 500	1 750	158	15 800	1 580	153	15 300	1 530	125	12 500	1 250	3,5	2
CP 190 RN	cordoalha	190	19 000	1 900	160	16 000	1 600	155	15 500	1 550	140	14 000	1 400	3,5	7
CP 190 RB	cordoalha	190	19 000	1 900	170	17 000	1 700	164	16 400	1 640	140	14 000	1 400	3,5	2

Fonte: PFEIL, Walter. Concreto Protendido, 2ª edição, PG 19. (1984)

Seguem os itens que devem ser calculados em uma estrutura em concreto protendido:

Para o caso de peças fletidas, define-se grau de protensão como sendo a relação entre o momento fletor de descompressão e o momento característico máximo (Equação 1).

$$K_p = \frac{M_0}{M_{M\acute{A}X}} \quad (\text{Equação 1})$$

O momento de descompressão é aquele para o qual se atinge o estado limite de descompressão, ou seja, para o qual as tensões de tração na seção, oriundas do carregamento, são anuladas.

No caso de protensão completa tem-se grau de protensão pelo menos igual a 1. Essa relação entre momentos fletores representa o aparecimento de tensões de tração ou de formação de fissuras numa peça. A composição ótima entre a armadura ativa e a armadura passiva propicia menores custos, sendo obtida com graus de protensão da ordem de 0,5 e 0,6.

A partir da força de protensão estimada, calcula-se a seção transversal de armadura ativa necessária, levando-se em conta os estados limites para cada situação.

De acordo com PEREIRA, 2018:

A tensão aplicada na cordoalha é aproximadamente igual a 77% da tensão de ruptura nominal do aço... Em geral as lajes tem pequena espessura (10 a 25 cm), utilizam-se cordoalhas de protensão de pequena capacidade, colocados a espaços regulares. As tensões médias de protensão nas lajes variam de 15 a 40 kgf/cm². Nos edifícios utilizam-se cordoalhas de 1 a 4 fios de ½". (PEREIRA, 2018).

P_i é a força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração. Esta força corresponde à força aplicada pelos macacos hidráulicos antes de ser realizada a ancoragem dos cabos (Equação 2).

$$P_i = \sigma_{PI} \times A_p \quad (\text{Equação 2})$$

Conhecer o valor do esforço médio de protensão (Equação 3) é necessário para os cálculos das perdas de protensão e dos valores de alongamento do cabo. O esforço médio é um percentual do esforço máximo aplicado aos cabos de protensão.

$$P_{MÉD} = 0,965 \times P_{MÁX} \quad (\text{Equação 3})$$

Para encontrar o alongamento do cabo durante a protensão, faz-se a soma de todos os alongamentos dos diversos trechos que compõe o cabo, utiliza-se a (Equação 4). Sendo l a distância entre os apoios da viga, A_p a área da seção transversal do cabo de protensão e E_p o módulo de elasticidade do aço. Segundo PFEIL(1984), o valor médio de E_p para barras e fios será 205.000 MPa ou 2050 tf/cm², e para cordoalhas será 195.000 MPa ou 1950 tf/cm².

$$\Delta_l = \frac{P_{MÉD} \times l}{A_p \times E_p} \quad (\text{Equação 4})$$

Segundo PEREIRA, 2018:

Quando os alongamentos são maiores do que o previsto no plano de protensão, os coeficientes de atrito reais são menores dos que os utilizados nos cálculos, podendo esticar o cabo até a pressão máxima e comparar com o alongamento previsto. Se o alongamento lido for até 10% superior do alongamento previsto, pode-se ancorar o cabo, se o alongamento lido for superior a mais de 10% do alongamento previsto não se pode ancorar o cabo. Quando os alongamentos são menores do que o previsto no plano de protensão, os coeficientes de atrito reais são maiores dos que utilizados nos cálculos, não podendo esticar o cabo acima do valor estipulado no plano de protensão pois este aumento poderá provocar a ruptura do cabo.

O equipamento de tensionamento, constituído por macaco, bomba hidráulica de alta pressão, mangueira e manômetro de pressão, precisa estar calibrado então a bomba aplica pressão suficiente para produzir tensão no cabo (Equação 5).

$$P = 1,05 \times \frac{\sigma_{PMAX} \times A_P}{A_{CIL}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde σ_{PMAX} é a tensão no cabo de protensão junto à ancoragem, A_P é a área do cabo e A_{CIL} é a área do cilindro.

Os eixos dos cabos são geralmente projetados como associações de parábolas e trechos retilíneos, podendo assumir uma forma qualquer. Para o traçado curvilíneo, será calculado o ângulo ou inclinação θ a ser posicionado o cabo (Equação 6). a é a altura do apoio da viga até a posição do cabo.

$$\theta = \frac{4a}{l} \quad (\text{Equação 6})$$

O comprimento do cabo retilíneo é igual a distância l , para cabos curvilíneos o comprimento será encontrado utilizando a (Equação 7), onde a é a altura entre o apoio da viga e a posição do cabo.

$$l_c = \frac{l+8}{\frac{3a^2}{l}} \quad (\text{Equação 7})$$

A seção do meio do vão é a mais solicitada pelo carregamento externo. Se analisarmos outras seções, como por exemplo, aquelas próximas aos apoios, podemos notar que as tensões provocadas pelas cargas externas diminuem, tendendo a zero. Para calcular o esforço de protensão no meio do vão P_x em cabo parabólico utilizar a (Equação 8). Onde μ é o coeficiente de atrito e K coeficiente de

perda por metro, provocada por curvaturas não intencionais do cabo. Segundo o Código Modelo CEB 78, para os cabos de uso corrente, pode-se adotar $K = 0,01$ rad/m, e os valores de μ (Tabela 6) ou os valores da NBR 7197:1989 [item 8.5.1.2] (Tabela 7).

$$P_x = P_{M\acute{A}X} [1 - \mu (\theta + K \times X)] \quad (\text{Equação 8}).$$

Durante as operações de protensão, a força de tração na armadura não pode superar os valores decorrentes da limitação das tensões no aço. A NBR 6118:2014 [item 9.6.1.2.1] recomenda para a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho tensor (macaco) que não sejam ultrapassados os seguintes valores (Equações 9 a 14):

NA PRÉ-TRAÇÃO:

$$\sigma_{pi} = 0,77 \times f_{ptk} \text{ e } 0,90 \times f_{pyk} \quad (\text{AÇOS RN}) \quad (\text{Equação 9})$$

$$\sigma_{pi} = 0,77 \times f_{ptk} \text{ e } 0,85 \times f_{pyk} \quad (\text{AÇOS RB}) \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo f_{ptk} o valor característico da resistência de ruptura a tração do aço de protensão e f_{pyk} o valor característico da resistência limite de escoamento do aço de protensão.

NA PÓS-TRAÇÃO:

$$\sigma_{pi} = 0,74 \times f_{ptk} \text{ e } 0,87 \times f_{pyk} \quad (\text{AÇOS RN}) \quad (\text{Equação 11})$$

$$\sigma_{pi} = 0,74 \times f_{ptk} \text{ e } 0,82 \times f_{pyk} \quad (\text{AÇOS RB}) \quad (\text{Equação 12})$$

Cordoalhas engraxadas:

$$\sigma_{pi} = 0,80 \times f_{ptk} \text{ e } 0,88 \times f_{pyk} \quad (\text{AÇOS RB}) \quad (\text{Equação 13})$$

Aços CP-85/105, fornecidos em barras:

$$\sigma_{pi} = 0,72 \times f_{ptk} \text{ e } 0,88 \times f_{pyk} \quad (\text{Equação 14})$$

Segundo PEREIRA, 2018, os valores limite da tensão de protensão σ_{po} , decorrente da força P_o , no término das operações de protensão são (Equação 15 e 16):

NA PRÉ-TRAÇÃO E PÓS-TRAÇÃO:

$$\sigma_{po} = 0,74 \times f_{ptk} \text{ e } 0,87 \times f_{pyk} \text{ (AÇOS RN) (Equação 15)}$$

$$\sigma_{po} = 0,74 \times f_{ptk} \text{ e } 0,82 \times f_{pyk} \text{ (AÇOS RB) (Equação 16)}$$

Um conjunto de cabos protendidos numa primeira etapa vai sofrendo perdas de protensão por retração, até o instante de protensão dos cabos restantes. O valor de P_o corresponde ao valor da força de protensão ao término de todas as operações de protensão, resultando da soma de conjuntos de cabos que sofreram o efeito da retração inicial e de um conjunto final, o último, que não sofre nenhum efeito (Equação 17). Sendo σ_{po} a tensão ao término da protensão e A_{PO} área do cabo de aço.

$$P_o = \sigma_{po} \times A_{PO} \text{ (Equação 17)}$$

A ancoragem das armaduras no concreto faz-se por aderência, num comprimento de ancoragem. O comprimento de ancoragem básico (l_{bp}) que de uma maneira simplificada pode-se considerar como sendo o menor comprimento necessário para no estado limite último a ruptura se dê na armadura. Nesta situação considera-se a armadura com o maior esforço possível e concreto em torno da armadura com a menor resistência e fissurado, sendo calculado (Equação 18).

$$\sigma_{po} = 0,81 \times l_{bp} \text{ ou } 1,2 \times l_{bp} \text{ (Equação 18)}$$

Segundo Pfeil, Walter (1984), o comprimento de ancoragem varia de 100φ a 140φ para fios entalhados e de 45φ a 90φ para cordoalhas de 7 fios. O comprimento também pode ser calculado segundo [item 9.4.5.1] da NBR 6118:2014.

O esforço de protensão N_p é obtido multiplicando-se a área da armadura protendida A_p pela tensão do aço σ_p (Equação 19).

$$N_p = A_p \times \sigma_p \text{ (Equação 19)}$$

“A força de protensão é o elemento fundamental das peças de concreto. Ela deve garantir o estado de protensão das seções de concreto durante a vida útil da estrutura” (CHOLFE, 2015, p.133). O comportamento dessa força depende dos componentes físicos (aparelho tensor, bainhas) e do comportamento intrínseco dos materiais, sendo necessário prever perdas desta força, em relação à força inicial,

antes da transferência da protensão ao concreto, durante essa transferência e depois ao longo do tempo.

Seguem abaixo as perdas iniciais existentes:

Relaxação inicial da armadura: em função do tempo decorrido entre o alongamento da armadura (protensão) e a liberação do dispositivo de tração.

Retração do concreto: em função do tempo decorrido entre a concretagem do elemento estrutural e a liberação do dispositivo de tração.

Seguem as perdas imediatas existentes:

Por aderência ao concreto a força de protensão aplicada sofre perda imediata devido ao encurtamento imediato do concreto, como também a protensão sucessiva de cabos (diversas etapas) deforma e conseqüentemente afrouxa os cabos anteriormente protendidos e ancorados. O último cabo tem perda, por encurtamento imediato, nula. Chamando σ_c à tensão do concreto, na seção considerada, ao nível do cabo de protensão, sob efeito de protensão e peso próprio, a perda por encurtamento elástico para pré-tensão é dada por (Equação 20).

$$\Delta\sigma_p = \alpha_e \times \sigma_c \quad (\text{Equação 20})$$

Onde α_e representa a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto. Nos casos de perda por encurtamento elástico do concreto nas armaduras pós-tracionadas, quando os cabos são esticados, os macacos se apoiam no concreto e, assim, o encurtamento elástico se realiza antes de ancorar o cabo. As vigas com cabos concentrados são em geral protendidas em uma só operação, envolvendo todos os cabos, que são ancorados ao mesmo tempo. Nestes casos, não existe perda de encurtamento elástico a considerar. Se entretanto, a viga tem n cabos, protendidos sucessivamente, a perda média de encurtamento elástico na viga é dada por (Equação 21):

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{2} \frac{n-1}{n} \alpha_e \times \sigma_c \quad (\text{Equação 21})$$

Para a perda de protensão imediata na região central devido ao encurtamento do concreto Δ_{ep} , onde α_e representa a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto, N_{pi} ou P_i a força aplicada, A_c área da seção homogeneizada, I_c inércia da seção homogeneizada, G_1 o peso próprio, l distância entre os apoios, E_p e E_c os módulos de elasticidade do aço e concreto, respectivamente, e e_p excentricidade tem se (Equação 22).

$$\Delta_{ep} = \alpha_e \times \frac{\frac{N_{pi}}{A_c} + N_{pi} \times \frac{e_p^2}{I_c} + \left(G_1 \times \frac{l^2}{8}\right) \times \frac{e_p}{I_c}}{E_p} \quad (\text{Equação 22})$$

As perdas por atrito verificam-se principalmente ao longo do cabo, mas também nas ancoragens e nos macacos hidráulicos. Nas armaduras pré-tracionadas as perdas por atrito verificam-se nos macacos hidráulicos, nas ancoragens provisórias e nos pontos de mudança de direção das armaduras poligonais. Nas armaduras pós-tracionadas, as perdas por atrito verificam-se nos macacos, nas ancoragens e nos pontos de contato dos cabos com as bainhas. As perdas dependem do coeficiente médio de atrito (μ), entre o cabo e a bainha, e da configuração geométrica do cabo, esta última medida pela variação angular α do eixo do cabo. Nos cabos colocados no interior de bainhas, além do atrito causado pelas curvaturas do eixo do cabo, existe outro produzido por desvios da bainha em relação ao eixo teórico do cabo (falta de linearidade, flechas entre pontos de suspensão). Esses desvios são construtivos, manifestam-se tanto nos trechos retos como nos trechos curvos dos cabos; para efeito de cálculo eles podem ser assimilados a variações angulares ($k\alpha$) por metro linear de cabo. Segundo o Código Modelo CEB 78, para os cabos de uso corrente, pode-se adotar $k\alpha = 0,01$ rad/m, e os valores de μ (Tabela 6) ou os valores da NBR 7197:1989 [item 8.5.1.2] (Tabela 7) para (Equação 23).

$$\Delta_{p(x)} = P_i \times [1 - e^{-(\mu \times \sum \alpha + k \times X)}] \quad (\text{Equação 23})$$

Tabela 6 – Valores de μ por Raul Lobato.

ESTADO DA SUPERFÍCIE DAS ARMADURAS	TIPO DE AÇO DAS ARMADURAS		
	TREFILADO	LAMINADO LISO	LAMINADO COM INDENTAÇÕES
Limpas, sem lubrificação	0,20	0,25	0,30
Limpas, com lubrificação leve (óleo solúvel)	0,18	0,23	0,27

Fonte: LOBATO, Raul. Concreto Protendido: Perdas de protensão.

Tabela 7 – Valores de μ pela NBR 7197:1989.

MATERIAIS UTILIZADOS	VALOR DO COEFICIENTE DE ATRITO (μ)
Cabo e concreto (sem bainha)	0,50
Barras ou fios com mossas ou saliência e bainha metálica	0,30
Fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica	0,20
Fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica lubrificada	0,10
Cordoalha e bainha de polipropileno lubrificada	0,05

Fonte: NBR 7197:1989 [item 8.5.1.2].

Nos sistemas usuais de cabos constituídos por fios ou cordoalhas, verifica-se experimentalmente que as perdas por atrito dos cabos nas ancoragens e por atrito no interior dos macacos são da ordem de 5%.

Denominam-se perdas nas ancoragens as perdas de alongamento do cabo, quando o esforço é transferido do elemento tensor (macaco) para a ancoragem. Nos processos com armaduras pré-tracionadas, a ancoragem das armaduras se faz por aderência com o concreto, não havendo propriamente perdas na ancoragem. Nos processos com armaduras pós-tracionadas, quando a ancoragem é feita por meio de rosca e porca, não existe perda na ancoragem. Quando, entretanto, a ancoragem é feita por meio de cunhas, estas ao absorverem as cargas resultam uma perda ω de alongamento do cabo. Sendo Δ_ω a variação do encurtamento, A_{PO} área do cabo de aço, a perda imediata devido à acomodação da ancoragem para cabos parabólicos ω_{cp} será (Equação 24).

$$\omega_{cp} = \sqrt{\frac{(\Delta_\omega \times Ep \times A_{PO})}{\Delta Pi}} \quad (\text{Equação 24})$$

D diâmetro do cabo, para a perda imediata devido a acomodação da ancoragem em cabo retilíneo ω_{cr} (Equação 25).

$$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{A_{PO} \times Ep \times D}{\mu \times k \times Pmáx}} \quad (\text{Equação 25})$$

Seguem abaixo as perdas progressivas existentes:

É a diminuição da força de protensão ao longo do tempo, durante o período de vida útil da estrutura. O projetista tem que confirmar se após as perdas iniciais e imediatas o que resta da força de protensão aplicada anteriormente e se os estados limites estão sendo atendidos. As perdas progressivas ocorrem devido à retração, fluência e relaxação do aço.

Quando se tem perda da água com a redução da umidade relativa do ambiente ocorre a retração. Apresentando contração do concreto, quando ele é submetido a secagem e expansão dele quando submetido a molhagem, causando nas duas situações instabilidade dimensional. Depende de vários fatores como: tipo do cimento, tipo do agregado, dosagem do concreto, uso de aditivos, geometria da peça, tipo de cura, umidade relativa, tempo de exposição, etc...

Como solução deve-se aplicar no concreto uma maior resistência à compressão com menor fator a/c , realizar uma cura eficiente, utilizar juntas de contração nas peças estruturais.

A retração por fluência ocorre pelo aumento da deformação sob tensão permanente, variando sua intensidade com o aumento da tensão. Quanto aumentada a tensão, maior a perda por fluência.

Como correção dessa perda deve-se diminuir a tensão, diminuindo a força de protensão, para isto ocorrer aumenta-se a resistência do concreto e reduz o fator água-cimento, como visto, é a mesma medida preventiva para a perda por retração.

A relaxação do aço ocorre quando os aços protendidos são ancorados com comprimentos constantes (deformações constantes) e sob tensões elevadas (acima de $0,5 \times f_{ptk}$). A relaxação do aço depende das características do aço, da tensão atuante e da temperatura ambiente.

“Esta perda se estabiliza após 30 anos da execução da protensão. No sistema de barras é menor que os sistemas de fios e cordoalhas.” (PEREIRA, 2018).

Segundo NBR 6118:2014, para efeito de projeto, os valores de perdas de relaxação do aço podem ser adotados (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores em porcentagem das perdas de relaxação do aço.

Tabela 8.4 – Valores de Ψ_{1000}, em porcentagem					
σ_{po}	Cordoalhas		Fios		Barras
	RN	RB	RN	RB	
$0,5 f_{ptk}$	0	0	0	0	0
$0,6 f_{ptk}$	3,5	1,3	2,5	1,0	1,5
$0,7 f_{ptk}$	7,0	2,5	5,0	2,0	4,0
$0,8 f_{ptk}$	12,0	3,5	8,5	3,0	7,0
Onde RN é a relaxação normal; RB é a relaxação baixa.					

Fonte: NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Como valores representativos de relaxação pura dos aços brasileiros, podem tomar-se os valores tabelados no quadro abaixo, para $\sigma_{p0} = 0,7 f_{pt}$ e temperatura 20°C. Obtêm-se, assim, os valores do quadro para perdas por relaxação do aço em fios e cordoalhas específicas:

Tabela 9 – Porcentagens de perdas por relaxação para aços.

TIPO DE AÇO	RN	RB
Fio CP 150	25%	20%
Cordoalha CP 175	25%	18%
Cordoalha CP 190	25%	17%

Fonte: PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido. Notas de aula. ADAPTADO. (2018)

A quantidade menor de equipamentos e materiais envolvidos no processo construtivo, bem como a necessidade de um concreto de melhor qualidade, se encaixa ao perfil deste tipo de concreto, tendo a possibilidade de executar as protensões e processar a cura, dentro ou fora do canteiro, com rigoroso controle tecnológico. Temos como exemplo dos pré-moldados protendidos as estacas pré-fabricadas para fundações profundas, cravadas no solo por bate estaca, com uma protensão de pequena intensidade, executada com aderência inicial, permite evitar fissuras e faz o material resistir melhor às ações dinâmicas da cravação. Ainda temos as lajes pré-moldadas com nervuras em concreto protendido, lajes em duplo tê, as lajes lisas, aquelas apoiadas diretamente sobre os pilares, e a laje com painel alveolar, provavelmente o elemento de protensão com aderência inicial mais usado no mercado brasileiro, é a solução de baixo custo de fabricação para vencer vãos em torno de 9 a 10 metros. Ainda podemos citar as fundações em radier, laje apoiadas em solo que serve de apoio a uma estrutura, as vigas baldrame e os pavimentos de concreto sobre solo; No caso de grandes cargas concentradas, como as pistas para aeroportos, podem ser protendidas com barras ou cordoalhas.

Existem também estruturas protendidas de grande porte; As coberturas de prédios pré-moldados, principalmente vãos de até 25 metros, podem ser executados com “telhas” protendidas do tipo W ou Y; As plataformas marítimas (offshore) de exploração de petróleo ou gás, os invólucros de proteção de centrais atômicas, as torres de concreto e as pontes estaiadas. É comum, também, a utilização de tirantes de ancoragem protendidos em obras de terra como cortinas atirantadas, estruturas de contenção, barragens, etc.

8 DESCRIÇÃO EXECUTIVA E ESTRUTURAL DAS OBRAS RECORDISTAS BRASILEIRAS, EM CONCRETO PROTENDIDO, EXECUTADAS EM NATAL/RN.

As Obras Catedral de Natal/RN, Ginásio Sesi SENAI e o Pórtico Monumental de Natal/RN estão no Rank Brasil - O livro dos recordes brasileiros, respectivamente, maior vão livre em concreto protendido no Brasil, ginásio de esportes com maior vão livre em concreto protendido no Brasil e maior balanço em concreto protendido no Brasil, portanto, escolhidas para pesquisa sobre seus aspectos estruturais e processos construtivos, como também para saber das condições estruturais atuais das edificações.

8.1 - CATEDRAL DE NATAL/RN

A primeira edificação pública com elementos estruturais de grandes seções em concreto protendido executada no Rio Grande do Norte foi a Catedral de Natal/RN (1988). A concepção, a supervisão técnica e a execução foram respectivamente do arquiteto Marconi Grevi, do engenheiro calculista José Pereira da Silva e do engenheiro Malef Victório de Carvalho. Os desenhos e detalhamentos do projeto arquitetônico (Figuras 26 e 27), todos feitos à mão, e dimensionamento estrutural, realizado com auxílio de régua de cálculo, foram iniciados em 1975, tiveram como desafio vencer o vão livre de 60 metros, exigidos pela estrutura do subsolo e nave, tendo a nave capacidade de acomodar três mil pessoas; A solução veio com vigas principais em concreto protendido, no sistema Freyssinet de pós-tensão.

A cobertura com dez vigas convergentes, inclinadas e com geometria de forma parabólica - vigamento fortemente desnivelado em 20m de altura - são vigas protendidas bi-apoiadas em placas de Neoprene fretadas nos pilares frontais, pilar com altura de 5 metros, e placas de Neoflon nos pilares posteriores, pilares com altura de 25 metros, (Figura 28); apresentam seção transversal em duplo "T"(Figura 29), com variação apenas na altura, de 1,60 m a 3,60 m. Segundo SILVA (2009), as mesas superiores e inferiores apresentam largura de 40 cm e alma de 20 cm. A mesa inferior foi concebida de forma a servir de suporte às lajes pré-moldadas da cobertura mas acarretou prejuízo de ordem estrutural pela ausência de monolitismo

e redução da importante rigidez do conjunto, compensada pela presença de vigas transversais de contraventamento espaçadas de 5 metros.

Figura 26 – Fachada da Catedral de Natal/RN.



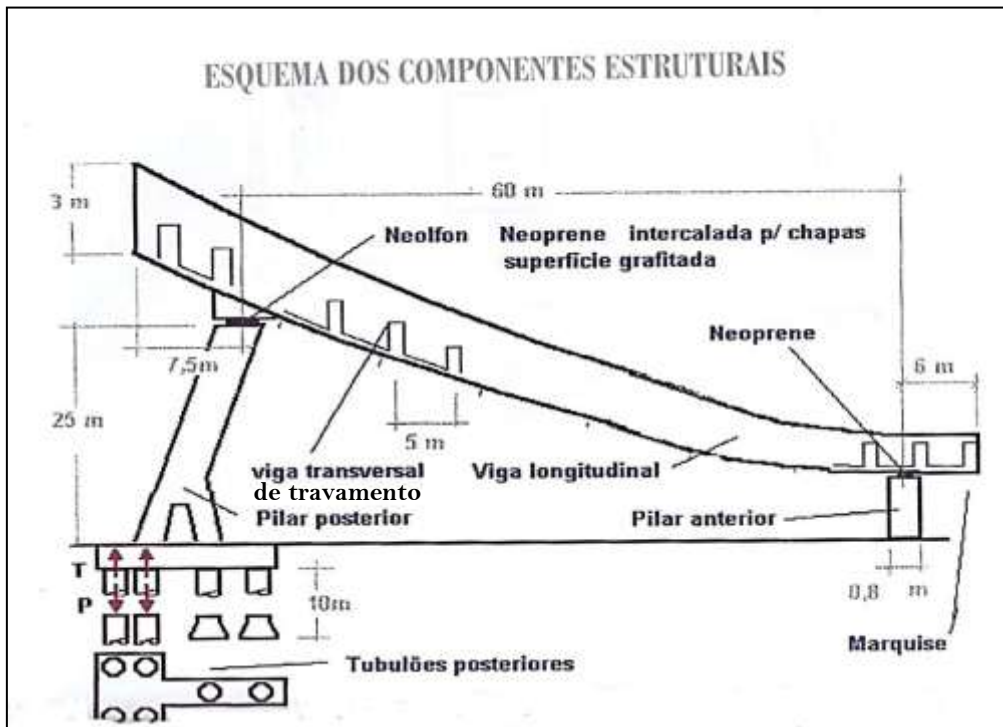
Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2017.

Figura 27 – Vista lateral da Catedral de Natal/RN.



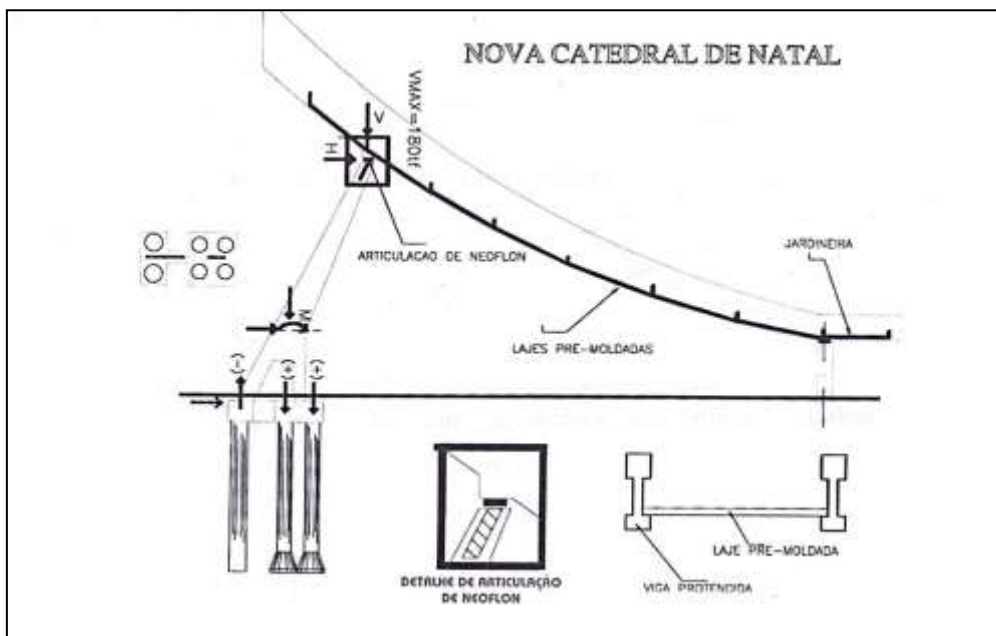
Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2017.

Figura 28 – Esquema dos componentes estruturais da Catedral de Natal/RN.



Fonte: SILVA, José Pereira da. 2009.

Figura 29 – Diagrama de corpo livre da Catedral de Natal/RN.



Fonte: SILVA, José Pereira da. 2009.

A fachada posterior foi concebida por 23 metros de altura por 36 metros de largura. Os pilares posteriores (Figura 30) não possuem contraventamentos

intermediários para atender a colocação de vitrais em toda a altura. São inclinados para o lado interno da nave, originando elevada excentricidade de primeira ordem para ação de uma reação de apoio vertical de $180tf$, originando um momento resultante de elevada intensidade no engaste inferior, associado ao momento da ação das reações horizontais de apoio e dos efeitos de segunda ordem. A acentuada curvatura da estrutura gerou elevadas forças de arrancamento das fundações e a existência de perdas de protensão durante a execução. Os pilares possuem bifurcação na parte inferior, por ordem estrutural, para absorver externa e internamente a ação das grandes solicitações de momento fletor e esforço cortante com redução do consumo de cimento.

De acordo com PEREIRA, (2010):

Sua infraestrutura é composta de tubulões com dez metros de profundidade, onde o bloco de coroamento da parte posterior, em forma de “T”, tem 1m de altura, sendo os dois tubulões paralelos de tração, ou seja, o próprio peso da estaca equilibra a força que tende a levantar a estaca, e mais duas estacas de compressão. O bloco de coroamento dos tubulões anteriores tem forma retangular, sendo composto por duas estacas.

Do cálculo estrutural: cada viga protendida é composta de 12 cordoalhas aderentes (de 12 fios), sendo o diâmetro da cordoalha 12,7 mm ao longo de sua extensão (aço RB-190). A área de uma cordoalha pode ser encontrada através da (Equação 26), onde D é o diâmetro da cordoalha.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 1,27^2}{4} = 1,26cm^2 \quad (\text{Equação 26})$$

A força de protensão aplicada foi de $180tf$. Para calcular a tensão em uma cordoalha usamos a (Equação 27), multiplicamos por uma fator de transformação para MPa e multiplicamos por 12 cordoalhas para encontrar-mos a tensão por viga.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{180000 \text{ kgf}}{1,26 \text{ cm}^2} \times 0,0980665 \times 12 = 168.114 \text{ MPa} \quad (\text{Equação 27})$$

Como na Catedral temos 10 vigas o total da tensão é $1.681.140 \text{ MPa}$.

Apesar de complexa e desafiadora (Figura 31), a obra da Catedral de Natal/RN foi totalmente construída com mão de obra local e ocorreu sem registro de acidente de trabalho.

Figura 30 – Vista geral da fase final da construção da Catedral de Natal/RN.



Fonte: SILVA, José Pereira da. 2009.

Figura 31 – Complexidade da montagem das formas e armações da viga protendida da Catedral de Natal/RN.



Fonte: SILVA, José Pereira da. 2009.

8.2 - GINÁSIO SESI SENAI

O ginásio poliesportivo com cobertura em vigas poligonais retas e lajes maciças, com maior vão livre em concreto protendido do Brasil, possui vão livre de 30 metros, e foi construído em 1995. É parte integrante das instalações do SESI/SENAI da Avenida Mor Gouveia, em Natal/RN. A concepção arquitetônica modernista (Figura 32 e 33) é do arquiteto Moacyr Gomes e o projeto estrutural do engenheiro calculista José Pereira da Silva. Dimensionado com auxílio do programa computacional SISTRUT, teve seus cálculos comprovados manualmente, não sendo considerada a agressividade do meio ambiente ($a/c, f_{ck}, \text{recobrimento}$) por ter como base a norma de projeto de estruturas de concreto armado anterior a NBR 6118 atual. O projeto tem planta baixa formada por dois trapézios iguais, unidos pela base maior; cobertura composta de 2 águas, com vigas poligonais de concreto protendido apoiadas nas extremidades em placas de Neoflon (Figura 34), constituído de Neoprene associado com camadas de teflon (resina que sob altas pressões apresenta coeficientes de atrito muito baixos), com diretriz longitudinal representando um “v” invertido simétrico, de angulosidade côncava; e lajes maciças de concreto armado. O conjunto vigas e lajes é sustentado por pórticos transversais de seção variável com valor mínimo no meio do vão e valor máximo nas extremidades, aonde se localizam pilares com grandes dimensões variáveis na seção transversal.

Figura 32 – Vigas protendidas e lajes em concreto armado do telhado do ginásio SESI-SENAI.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Figura 33 – Encontro das diagonais dos trapézios da forma da planta baixa.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

As vigas retas existentes na cobertura são inéditas em ginásios poliesportivos do Brasil, no entanto a maior dificuldade foi a angulosidade côncava no meio do vão, que exigiu um estudo pormenorizado da distribuição longitudinal dos cabos de protensão. O equilíbrio das forças nas ancoragens e pressões ao longo dos cabos foi calculado considerando as peças de concreto isoladas, sob a ação das cargas atuantes, de maneira que os cabos de protensão são contínuos, de extremidade a extremidade, inclusive os cabos relevés.

As fundações do ginásio foram estacas escavadas pré-moldadas de concreto armado com profundidade de 8 m e bloco de coroamento de concreto armado.

Do cálculo estrutural: Estrutura com 13 pórticos em concreto armado e 13 vigas em concreto protendido, constituídas de 10 cordoalhas aderentes (de 12 fios), de ½" ou 12,7 mm de diâmetro ao longo de sua extensão.

Como vimos, a área de uma cordoalha é encontrada através da (Equação 26), onde D é o diâmetro da cordoalha.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 1,27^2}{4} = 1,26 \text{ cm}^2 \text{ (Equação 26)}$$

A força de protensão aplicada foi de $90tf$. Para calcular a tensão em uma cordoalha usamos a (Equação 27), multiplicamos por uma fator de transformação para MPa e multiplicamos por 10 cordoalhas para encontrar-mos a tensão por viga.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{90000 \text{ kgf}}{1,26 \text{ cm}^2} \times 0,0980665 \times 10 = 70.047,50 \text{ MPa} \quad (\text{Equação 27})$$

Como no Ginásio temos 13 vigas o total da tensão é $910.617,5 \text{ MPa}$.

Figura 34 – Perspectiva externa do ginásio SESI-SENAI mostra viga apoiada no pilar.



Fonte: SILVA, José Pereira da; PEREIRA, Flávio César da Costa; PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. Projetos de Estrutura de Concreto Armado e Protendido do Rio Grande do Norte Recordistas Nacionais: Palestra, 2017.

8.3 - PÓRTICO MONUMENTAL DE NATAL/RN

O maior balanço em concreto protendido de toda a América Latina, incluso no livro **O concreto no Brasil – Pré Fabricação-Monumentos-Fundações**, volume III do engenheiro Augusto Carlos de Vasconcelos, é o Pórtico Monumental de Natal-RN, um marco comemorativo aos quatrocentos anos de fundação da cidade do Natal-RN(1999). Representa um cometa orientando os Reis Magos ao local do nascimento de Jesus Cristo. O projeto arquitetônico foi realizado pelos arquitetos Moacyr Gomes e Eudes Galvão. Teve como projetistas estruturais o engenheiro José Pereira da Silva e sua equipe técnica formada pelos engenheiros Flávio César e Fábio Sérgio. os cálculos foram realizados através do programa TQS e

comprovados através de cálculos manuais até o estado limite último. A sua forma é inspirada em um reluzente cometa que possui na sua ponta uma estrela espacial de barras metálicas inscrita numa esfera de 4 metros de diâmetro, pesando $48kN$ (Figura 35) atravessa a via e termina do outro lado da calçada em cima de três estátuas de 4 metros de altura, confeccionadas pelo escultor conhecido apenas como “Mancha”. A maior dificuldade encontrada foi a limitação do avanço das fundações para o lado da pista de rolamento, que teve como solução criar a geometria da fundação com alongamentos laterais que foram indispensáveis para a estabilidade da estrutura quanto a ação de cargas horizontais (vento).

Figura 35 – Pórtico Monumental de Natal/RN.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

A estrutura do pórtico é uma viga em balanço de 60 metros com seção transversal variável, vazada em 80% do comprimento e maciça nos 20% restantes. Possui forma triangular com o vértice voltado para baixo (Figura 36). A viga parte excentricamente com inclinação de 37 graus de um bloco de fundação de 2,80 metros de altura (Figura 37).

Segundo SILVA (2009), na seção de engastamento, a seção triangular possui uma base superior de 4,54 metros e uma altura de 6,39 metros.

Figura 36 – Vértice inferior do Pórtico Monumental.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Figura 37 – Parte do bloco de fundação e da seção de engastamento.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Mesmo a obra sendo anterior a determinações normativas em relação ao meio ambiente da NBR 6118:2003, as mesmas foram utilizadas no projeto estrutural do pórtico, pois em 1999 tais valores já tinham sido definidos, no início do processo de revisão da NBR 6118.

As fundações são compostas de 8 tubulões com 1,20 m de diâmetro com 6 m de profundidade com bloco de coroamento com altura de 2,80m. Foram consumidos 72 m³ de concreto nas fundações do pórtico.

Do cálculo estrutural: O fato água/cimento escolhido foi $\leq 0,55$ (faixa 2 – para concreto protendido). A resistência característica do concreto $f_{ck} \geq 30\text{MPa}$, comprimento nominal de 3,5 cm;

A Protensão foi realizada pela empresa PROTENDE. A seção foi protendida com 26 cordoalhas não aderentes (de 12 fios) de bitola de 12,7 milímetros do aço CP-190-RB (7,2 toneladas).

Como vimos, a área de uma cordoalha é encontrada através da (Equação 26), onde D é o diâmetro da cordoalha.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 1,27^2}{4} = 1,26\text{cm}^2 \quad (\text{Equação 26})$$

A execução da protensão foi realizada por etapas atingindo cada cordoalha uma força de protensão de 120tf. Para calcular a tensão em uma cordoalha usamos a (Equação 27), multiplicamos por uma fator de transformação para MPa e multiplicamos por 26 cordoalhas para encontrar-mos a tensão por viga.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{120000\text{ kgf}}{1,26\text{ cm}^2} \times 0,0980665 \times 26 = 242.831,33\text{ MPa} \quad (\text{Equação 27})$$

Os valores do cálculo estrutural são (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores finais do cálculo do Pórtico da BR 101.

ESFORÇO	VALOR (tf.m) ou (tf)
Momento fletor vertical	3.829
Esforço cortante	265
Momento torsor	69
Momento fletor lateral	114
Carga máxima dos tubulões	262
Carga mínima dos tubulões	88

Fonte: SILVA, José Pereira da; PEREIRA, Flávio César da Costa; PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. Projetos de Estrutura de Concreto Armado e Protendido do Rio Grande do Norte Recordistas Nacionais: Palestra, 2017.

Na extremidade, a seção triangular reduz para 0,70 metros de base e 1 metro de altura. No vértice inferior o ângulo é constante em todo o comprimento. Os cabos

de protensão são protendidos e ancorados pela parte inferior e pré-blocados na extremidade, com comprimentos variáveis de acordo com a necessidade estática. As ancoragens ativas foram introduzidas na base da superestrutura ficando imperceptíveis após a execução do aterramento. As ancoragens passivas foram introduzidas nas seções intermediárias da mesa inferior. As seções transversais foram espaçadas com 5 metros.

Foi comprovada a contra-flecha calculada no projeto estrutural após a retirada do escoramento, sendo esta de -12 cm.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS REALIZADAS

9.1 ANÁLISE ESTRUTURAL DA CATEDRAL DE NATAL/RN

Dos resultados encontrados na vistoria realizada por PEREIRA, 2010:

Ao longo dos anos, progressivamente, ocorreu deficiência de impermeabilização da laje de cobertura, devido à depreciação natural da manta ardosiada de cor verde, face sua utilização além do prazo de garantia, bem como em razão de sua má execução (ineficiência dos arremates); como consequência, foram verificadas infiltrações ao longo de toda área de cobertura e total ausência de impermeabilização nas jardineiras suspensas frontais.

Observou-se a falta de manutenção nos aparelhos de apoio de Neoprene e Neoflon.

Havia corrosão nas vigas protendidas da cobertura, em vigas, lajes e pilares de concreto armado nas áreas internas da Catedral. Foram realizados ensaios na estrutura da Catedral, visando obter informações sobre o estado de corrosão das armaduras e do concreto.

Foram medidos doze pontos diferentes da estrutura, utilizando o eletrodo de cobre/ sulfato de cobre, com base na norma ASTM-C 876. Os valores deram todos acima de -350mv (Tabela 11), significando uma probabilidade de corrosão de 95% nas armaduras analisadas.

Tabela 11 – Resultados do ensaio eletrodo de cobre/sulfato de cobre.

Pontos	VALOR (<i>mv</i>)	Pontos	VALOR (<i>mv</i>)	Pontos	VALOR (<i>mv</i>)
Ponto 1	-386	Ponto 5	-373	Ponto 9	-384
Ponto 2	-380	Ponto 6	-461	Ponto 10	-540
Ponto 3	-362	Ponto 7	-515	Ponto 11	-400
Ponto 4	-352	Ponto 8	-627	Ponto 12	-348

Fonte: SILVA, José Pereira da.(2010)

Para analisar a profundidade de carbonatação foram medidos vários pontos da estrutura pelos indicadores fenolftaleína, timolftaleína e lápis medidor de pH, observando-se que, as áreas externas, onde a agressividade é maior, apresentaram alta carbonatação (concreto com cor incolor, após aspersão de fenolftaleína, obtendo $\text{pH}=5$ pelo lápis medidor de pH), ao contrário das áreas internas da

Catedral, que não apresentaram carbonatação (concreto com cor rosa após aspersão de fenolftaleína, obtendo pH=12 pelo lápis medidor de pH).

Para avaliar o teor de cloreto foram extraídas amostras (pó) de seis pontos na estrutura; os ensaios foram feitos por titulação pelo Método de Mohr no laboratório de química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), apresentando valores abaixo do limite de 0,4% da massa do cimento (Tabela 12), indicado pelas normas. Foi realizado também ensaio através da aspersão de nitrato de prata no concreto, apresentando o concreto, após a aspersão, coloração branca, indicando presença de cloretos, na superfície externa com até 1 cm de profundidade.

Tabela 12 – Resultados do ensaio teor de cloreto – Método de Mohr.

Pontos	Massa cimento (%)	Pontos	Massa cimento (%)
Ponto 1	0,32	Ponto 4	0,34
Ponto 2	0,28	Ponto 5	0,30
Ponto 3	0,27	Ponto 6	0,24

Fonte: SILVA, José Pereira da.(2010)

Para avaliar a porosidade foram extraídas amostras de concreto da Catedral em alguns pontos, sendo levadas ao laboratório de materiais de construção da UFRN para análise, conforme a NBR-9778, apresentando resultados inferiores a 10%, indicando, conforme a norma, um concreto de boa qualidade e compacto (Tabela 13).

Sobre a resistência à compressão, foram extraídas amostras de corpos de prova (10x20cm), que foram encaminhadas ao laboratório de materiais de construção da UFRN para o rompimento; todos os resultados apresentaram valores satisfatórios, superiores à resistência de 30 MPa.

Tabela 13 – Resultados do ensaio Porosidade.

Pontos	Porosidade (%)	Pontos	Porosidade (%)
Ponto 1	8,6	Ponto 5	8,80
Ponto 2	8,65	Ponto 6	7,87
Ponto 3	9,91	Ponto 7	9,84
Ponto 4	9,15		

Fonte: SILVA, José Pereira da.(2010)

Após esses resultados, realizou-se a recuperação, reforço e impermeabilização das estruturas na Catedral Metropolitana de Natal/RN em (2009-2010), seguindo a aplicação das metodologias executivas abaixo:

Os apoios da estrutura, de Neoprene e Neoflon, foram substituídos.

Nos elementos no interior da Catedral (pilares, vigas e lajes) de concreto armado e nas vigas em concreto armado da cobertura realizou-se hidrojateamento de areia nas armaduras, com pintura anticorrosiva nas armaduras e grauteamento tixotrópico para recomposição das seções, seguida de posterior aplicação de argamassa polimérica. As fissuras existentes nestas estruturas receberam aplicação de injeção de epóxi na sua extensão.

Executou-se impermeabilização na cobertura e nas jardineiras da Catedral, com remoção de toda a manta ardosiada verde aplicada há mais de vinte anos, e posterior aplicação de resina de poliuretano moldada in loco e elastômeros especiais (SBR-SBS), com revisão geral de todo o sistema de drenagem da cobertura.

Além destes serviços executou-se o hidrojateamento de areia no concreto das vigas protendidas e nos pilares posteriores da catedral, objetivando sua limpeza, seguida da aplicação da argamassa polimérica, visando o aumento da durabilidade da estrutura, já que não tinha existência de corrosão.

Apesar da recuperação executada em (2009-2010), os problemas em face da impermeabilização da cobertura e consequentemente os casos das infiltrações na cobertura da Catedral Metropolitana de Natal/RN prosseguiram. A arquidiocese de Natal no ano de 2014, realizou o processo de revitalização das áreas com infiltrações, sendo instalada a manta Evalon do tipo V importada da Alemanha, com feltro de poliéster no reverso e de cor cinza, sendo caracterizada por ser um polímero composto não deteriorável com o tempo, resistente à poluição, intempéries, UV e ozônio. Com garantia de 10 anos a 20 anos de vida útil a manta foi instalada sobre toda a área da laje de cobertura, vigas invertidas e calhas, com a aplicação em uma área total considerada de 5.197,02m².

Em 2018, foi realizada nova vistoria pelo engenheiro Fábio Pereira, tendo a escritora deste trabalho oportunidade de acompanhar a avaliação in-loco.

Nesta avaliação mais recente foi observado que as cruzeiras na parte externa da catedral, encontram-se em contato diário com respingos de água utilizada para molhar o gramado, sendo submetidos a ciclos de molhagem e secagem constantes, estando inserida no nível de agressividade classe IV, classificando-se com

características similares a respingos de maré, de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), ou seja, uma agressividade muito forte com risco de deterioração elevada.

A (Figura 38) mostra a corrosão linear das armaduras principais na laje de fundo da parte externa da catedral da fachada principal, no qual se observou perda significativa das seções, devido à insuficiência da espessura do cobrimento, uma vez que, a introdução de classes de agressividades do ambiente, entrou em vigor a partir da ABNT NBR 6118 (2003).

Verificou-se a constante ação da frente de carbonatação e agentes agressivos externos do meio por ausência das pingadeiras na borda da laje superior de fundo resultando na percolação da água e consequentemente, diminuição do pH do concreto e redução da proteção das armaduras (despassivação) (Figura 39).

Nos aparelhos de apoios metálicos localizados na parte externa e interna da lateral (esquerda e direita) da Catedral, ocorreu ausência de manutenção na estrutura de aço. Se tratando dos aparelhos de apoios de Neoprene e Neoflon, recomenda-se realizar a troca, uma vez que o prazo de garantia de cinco anos ter se excedido.

Figura 38 – Corrosão linear na laje de fundo da parte externa, na fachada principal.



Fonte: ROCHA, Daniela Maria Arruda; Victor de Paiva. 2018

Figura 39 – Ausência de pingadeiras e impermeabilização na viga protendida e na laje.



Fonte: ROCHA, Daniela Maria Arruda; Víctor de Paiva. 2018

Notou-se após inspeção visual a ausência de manutenção nos pilares anteriores e posteriores e das vigas laterais protendidas da Catedral.

Verificou-se a ausência da manutenção das placas de metal que sustentam o vitral na parte posterior da Catedral e corrosão com perda de seção dos perfis metálicos de interligação entre as placas, dado que, as peças sofrem constante ação agressiva do meio ambiente e carecem da ausência de manutenções preventivas.

Aponta-se a necessidade de reparo e recuperação das nervuras localizadas na parte inferior da fachada posterior externa da Catedral, devido à entrada de água antes do serviço de impermeabilização da laje de cobertura, em que, por conseguinte, resultou-se na retenção de água entre o bloco e a manta, provindo seu encharcamento, assim como, identificou-se a presença do rompimento e desprendimento de parte dos blocos pré-moldados.

Na parte interna da catedral foram constatadas manifestações patológicas corrosivas aparentes nas peças estruturais do subsolo (pilares, lajes e vigas), em função do pequeno recobrimento adotado na época ou por falha de execução, uma vez que a ação de íons cloreto e da carbonatação tem menor incidência devido a inferior exposição à ação ambiental externa. Além disso, observou-se a ausência de juntas de dilatação em alguns pilares do subsolo.

Para a solução das manifestações patológicas destacadas foram apresentados a Arquidiocese de Natal/RN as metodologias executivas descritas a seguir:

No caso das cruzes deve-se realizar o hidrojateamento a limpeza e remoção de sujeiras da região, com posterior aplicação de argamassa polimérica com duas demãos.

No caso das lajes de fundo, deve-se em primeiro lugar realizar a remoção do concreto desagregado com liberação das armaduras com corrosão. Em seguida, recomenda-se realizar a limpeza das armaduras e a aplicação de uma pintura anti-corrosiva de zinco nas armaduras antigas, para assim, aplicar-se camadas de concreto projetado de 3 cm de espessura e de argamassa polimérica de 1 cm. Estes dois últimos serviços especificados visam propiciar um aumento de durabilidade das estruturas de concreto armado, em função do pequeno recobrimento existente das armaduras. Propõe-se instalação de pingadeiras na fachada das jardineiras. No entanto, essa medida será ineficaz se a mesma não introduzir como intervenção estrutural a aplicação da argamassa polimérica nas jardineiras e na parte residual da extremidade das vigas protendidas da cobertura as quais não foram aplicadas à impermeabilização da manta elastômera realizada no ano de 2014, necessitando desta aplicação para aumento da vida útil.

Para os apoios laterais localizados na face interna e externa da Catedral, recomenda-se como solução corretiva o lixamento dos aparelhos, seguido da aplicação de pintura anticorrosiva de zinco.

Devem ser trocados os aparelhos de apoios da estrutura de Neoprene e Neoflon situadas no topo dos pilares, visto que a sua manutenção decorreu a mais de cinco anos, excendendo o prazo de garantia, recomendando-se a manutenção dos aparelhos de apoio de aço, com a realização da limpeza através de hidrojateamento de areia e pintura anti-corrosiva de zinco.

No tocante as vigas laterais protendidas e dos pilares anteriores e posteriores, orienta-se a realização do hidrojateamento de água, seguido da aplicação de argamassa polimérica, como foi feito em todas as vigas protendidas (menos nas laterais externas).

Em relação às placas de metais localizadas na parte posterior, conforme observado, deve-se realizar a limpeza das placas, quanto à corrosão na estrutura de aço dos perfis metálicos, a execução de hidrojateamento de areia, com posterior

aplicação de pintura anti-corrosiva de zinco, ou a retirada e substituição das placas metálicas por outros materiais como o plástico ou a borracha.

Em relação ao tratamento das nervuras na parte inferior da fachada posterior externa da Catedral identificada com fissuras e corrosão, propõe-se a remoção do concreto, com posterior soltura e liberação da armação, aplicação da pintura anti-corrosiva de zinco nas armaduras, preenchimento com grauteamento tixotrópico e acabamento final das nervuras, com argamassa de cimento e areia.

Nos locais caracterizados pelo desprendimento do bloco recomenda-se para a recomposição deste a aplicação de graute tixotrópico, seguido de acabamento de argamassa de cimento e areia. Além disso, para intensificar o aumento da durabilidade local, recomenda-se a adoção da prática produtiva instalada no interior da Catedral, com a fixação na laje nervurada de uma estrutura de aço galvanizado com o posterior fechamento com PVC.

Por sua vez, em relação a impermeabilização, a Manta, polímero composto com feltro de poliéster no reverso e de cor cinza, instalada na laje de cobertura da Catedral no ano de 2014, tem-se que o prazo de garantia é de 10 (dez) anos, consequentemente, estando em vigência até o ano de 2024. Após o vencimento da vigência do prazo, recomenda-se vistoria in loco para eventuais manutenções preventivas.

Sugere-se a recuperação dos elementos estruturais internos (vigas, pilares e lajes) do sub-solo nas regiões onde houve perda de concreto e exposição das armaduras, devendo-se ser executada a mesma metodologia executiva de recuperação estrutural descrita para as nervuras anteriormente. É necessário ainda, em alguns pilares locados no sub-solo a limpeza com hidrojateamento de areia e a inserção de juntas de dilatação com introdução de elastômeros.

Não foi realizada análise para verificar a relaxação dos cabos, que ao completar 30 anos, em 2018, teve, segundo as normas, a perda por relaxação do aço estabilizada.

9.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DO GINÁSIO SESI-SENAI

As estruturas de concreto armado e de concreto protendido são todas aparentes. O concreto aparente introduzido como concepção arquitetônica no início do século XX na Europa, tem sua aparência acinzentada explorada como elemento

de arte, ficando ele como acabamento final da superfície. Quando se usa o concreto como forma de apresentação final da estrutura deve-se preocupar também com a aparência, e não só com a resistência e a durabilidade. Ao projetar uma estrutura em concreto aparente o projetista tem que pensar em todos os detalhes construtivos, especificar um concreto que suporte todos os efeitos nocivos que incidem sobre ele, e que estão presentes no meio ambiente, para que se mantenha a aparência por longos anos sem alterar suas características. Devem-se desenvolver projetos e estudos para que ao longo da vida útil da estrutura se faça manutenções periódicas para que se restabeleça a aparência original, ao menor custo. Na última avaliação realizada pela empresa ENGEAL, em 2009, verificou-se em algumas regiões dos pilares pertencentes ao pórtico que sustenta a cobertura, regiões que por causa da sua forma arquitetônica avançam além da cobertura, são submetidos a ciclos de molhagem da água da chuva e secagem. A chuva e a umidade relativa do ar são fatores que determinam a presença ou não de água no interior dos poros do concreto e provocam a reação de degradação. Na atmosfera existem várias substâncias agressivas e que devem ser levadas em consideração como fator de degradação das estruturas de concreto armado. Uma das principais substâncias nocivas às estruturas é o CO₂ – Dióxido de carbono, que desencadeia o processo de carbonatação do concreto e a consequente corrosão das armaduras, fazendo as superfícies apresentarem manchas e diminuição do pH do concreto e, consequentemente redução da proteção das armaduras (Figura 40).

Também se verificou a necessidade de recuperação de um pilar pórtico, em concreto armado, com armadura em alto estado de corrosão.

Não foi realizado ensaio para as perdas de relaxação do aço, que hoje tem a idade de 24 anos, sendo que mais seis anos essas perdas se estabilizarão, segundo as normas existentes.

O ginásio não apresentava acessibilidade em sua estrutura, pois a NBR 9050: 2015, que trata da acessibilidade nas edificações e espaços urbanos, não havia sido estabelecida. Não dispondo de rampas, corrimões nas escadas e banheiros acessíveis.

Para analisar a profundidade de carbonatação foram medidos vários pontos da estrutura pelos indicadores fenolftaleína e lápis medidor de pH, observando-se que, pilares e vigas na áreas externa, apresentaram carbonatação (concreto com cor incolor, após aspersão de fenolftaleína, obtendo pH inferior a 7 pelo lápis

medidor de pH), ao contrário das áreas internas do Ginásio, que não apresentaram carbonatação (concreto com cor rosa após aspersão de fenolftaleína, obtendo pH=12 pelo lápis medidor de pH).

Na avaliação do teor de cloreto, através da aspersão de nitrato de prata no concreto, apresentou-se após a aspersão, coloração incolor, indicando ausência de cloretos.

Figura 40 – Pilares dos pórticos com aparência manchada devido agentes agressivos externos.



Fonte: SILVA, José Pereira da; PEREIRA, Flávio César da Costa; PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. Projetos de Estrutura de Concreto Armado e Protendido do Rio Grande do Norte Recordistas Nacionais: Palestra, 2017.

Foram aplicadas as seguintes metodologias executivas para solução dos problemas, em 2010:

Foi realizada a recuperação de todos os pilares e pórticos com armadura em estado de corrosão. Devido ao desgaste das armaduras com corrosão, em primeiro lugar realizou-se o hidrojateamento de areia sobre a superfície aparente com a intenção da limpeza e remoção de sujeiras da região (Figura 41), em segundo lugar a remoção do concreto desagregado com liberação das armaduras com corrosão. Em seguida, fez-se o hidrojateamento de areia para limpeza das armaduras e a aplicação de uma pintura anti-corrosiva de zinco nas armaduras, seguiu-se o

preenchimento com grauteamento tixotrópico, acabamento final com argamassa de cimento e areia, e aplicação de argamassa polimérica.

Figura 41 – Aplicação do hidrojateamento para remoção das sujeitas e resultado final.



Fonte: SILVA, José Pereira da; PEREIRA, Flávio César da Costa; PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. Projetos de Estrutura de Concreto Armado e Protendido do Rio Grande do Norte Recordistas Nacionais: Palestra, 2017.

As vigas protendidas receberam hidrojateamento de areia, na parte externa e aplicação de argamassa polimérica (Figura 42). Agora em 2019, o ginásio passa por outras manutenções. O piso da área da quadra foi substituído, adaptações para atender a acessibilidade dos usuários estão sendo incorporadas, o ginásio recebeu corrimões em suas escadas e rampas de acesso substituem algumas escadas. Não apresentando indícios de corrosão em pilares, lajes e vigas protendidas.

Figura 42 – Viga protendida do Ginásio SESI-SENAI com reparo no cobrimento.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

9.3 PÓRTICO MONUMENTAL DE NATAL/RN

Passados esses quase 20 anos sem manutenção a estrutura do Pórtico Monumental de Natal/RN apresentou patologias comuns ao concreto exposto, ou aqueles construídos em áreas externas. Quando o concreto é confeccionado, sua composição é alcalina, com pH entre 12 e 14, nível de alcalinidade onde o aço não apresenta perigo de oxidação. Quando exposto a gases ácidos, como CO_2 ou aos íons de cloreto, presentes na atmosfera na forma de partículas sólidas ou de névoa, ocorre a diminuição do pH desse concreto e consequentemente a desproteção do aço (despassivação por carbonatação ou por penetração de cloreto).

Avaliou-se o Pórtico através da análise com fenolftaleína, nitrato de prata e lápis medidor de pH. A fenolftaleína quando aspergida sobre o concreto avaliado reage e pode apresentar ou não alteração da sua cor. A região não contaminada por CO_2 assume cor entre rosa a vermelho-carmim. É detectada a região carbonatada do concreto, sendo aquela que não apresenta alteração de coloração. A aspersão de nitrato de prata ($AgNO_3$) para avaliar a penetração dos cloretos também foi utilizada. Na região que houver cloretos combinados será produzido óxido de prata, que possui coloração marrom. Utilizou-se também o lápis medidor de pH para superfícies, que ao marcar ou pintar a superfície do elemento a ser ensaiado, sua tinta muda de cor e faz-se o comparativo da cor do traço do lápis no concreto com a cartela de cores de referência, para se determinar o pH atual da peça.

Na estrutura foi observada corrosão linear das armaduras passivas, em algumas regiões da estrutura do Pórtico, acarretando carbonatação, devido à ação do CO_2 e insuficiência do recobrimento. A obra era anterior a determinações normativas em relação ao meio ambiente da NBR 6118:2003, mas, as mesmas foram seguidas no projeto estrutural do pórtico, portanto a insuficiência do cobrimento, que deveria ser de 3,5 cm não foi executada nestes pontos, porque provavelmente houveram erros pequenos de execução das formas, por se tratar do formato da peça ter certa complexidade, com variadas seções, (Figura 43A e 43B).

Figura 43A e 43B – Corrosão linear das armaduras passivas da estrutura.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

A carbonatação manifesta-se inicialmente por depósitos brancos na superfície do concreto e fica mais evidente quando surgem fissuras na peça e deslocamento da camada de concreto de recobrimento. A profundidade e a velocidade do fenômeno dependem de características do próprio concreto, como o teor de concreto e o pH. Também dependem das condições de exposição, como alta concentração de gás carbônico e umidade relativa do ar, também varia em função do clima da cidade e do fluxo de veículos emissores de CO_2 .

A carbonatação também afetou o bloco de coroamento das estacas da fundação (Figura 44).

Figura 44 – Bloco de fundação do Pórtico Monumental de Natal/RN.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Esse bloco parte está enterrado e parte exposto aos agentes agressivos. A parte do bloco enterrada está protegida pelo solo. Na parte do bloco acima do solo,

a parte mais exposta aos agentes agressivos, o grau de contaminação foi intenso, o que fez o bloco apresentar fissuras e trincas (Figura 45A e 45B). Observou-se que as áreas onde a agressividade é maior, apresentaram alta carbonatação - concreto com cor incolor, após aspersão de fenolftaleína e do nitrato de prata, obtendo pH=4 pelo lápis medidor de pH (Figura 46A e 46B), motivada pela ação dos veículos da BR 101 (CO_2).

Concluindo-se que houve penetração do CO_2 na estrutura e corrosão do aço do bloco de coroamento das fundações, como também corrosão nas laterais da estrutura do pórtico. Quanto a avaliação dos cabos, ensaios para verificação da perda da relaxação do aço, que devem ser feitos a cada 5 anos, não foram realizados até hoje (20 anos).

Figura 45 A e 45 B – Detalhe de rachaduras e trincas no bloco de coroamento da fundação, com armadura com corrosão.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Figura 46 A e 46 B – Vista da aspersão de nitrato de prata e fenolftaleína, respectivamente.



Fonte: SOUZA, Cristiane Rodrigues da. 2019.

Foi encaminhado, em (2019), relatório das patologias com os resultados dos ensaios e descrição das metodologias executivas necessárias para solucionar as patologias à prefeitura de Natal/RN pelo projetista estrutural, como segue abaixo:

Deve-se recuperar as rachaduras, trincas e fissuras, pois essas são caminhos facilitadores do avanço de agentes agressivos na estrutura, de forma mais profunda, provocando a deterioração da estrutura.

No caso da corrosão linear das armaduras passivas em algumas regiões da estrutura, deve-se em primeiro lugar realizar a remoção do concreto desagregado com liberação das armaduras com corrosão. Em seguida, recomenda-se realizar a limpeza das armaduras, com hidrojateamento de areia, e a aplicação de uma pintura anti-corrosiva de zinco nas armaduras antigas, para assim, aplicar-se camada de graute tixotrópico de 1 cm de espessura e de argamassa polimérica de 1 cm em toda a extensão da estrutura do Pórtico. Estes dois últimos serviços especificados visam propiciar um aumento de durabilidade das estruturas de concreto armado, em função do pequeno recobrimento existente das armaduras.

Para a corrosão do bloco de coroamento das estacas da fundação, inicialmente deve-se retirar a terra que envolve o bloco, deixando descoberta as faces superior e laterais, em seguida realizar a remoção do concreto desagregado

com liberação das armaduras com corrosão. Fazer o apicoamento no concreto existente. Em seguida, recomenda-se realizar a limpeza das armaduras, com hidrojateamento de areia, e a aplicação de uma pintura anti-corrosiva de zinco nas armaduras antigas, para assim, preparar as fôrmas e concretar imediatamente a peça. Em seguida deve-se aplicar resina epóxi nas fissuras existentes, imediatamente depois da nova concretagem. Fazer furos perpendicularmente às faces da fundação e em todo seu perímetro, onde serão colocados armaduras de reforço de aço, após o seu preenchimento com resina epóxi fluida. Preparar as fôrmas e concretar a peça (encamisamento do bloco).

Quanto à avaliação dos cabos, sugerimos realizar o ensaio não destrutivo RIMT® (Refectometric Impulse Measurement Technique) que detecta, localiza e gradua anomalias em cabos protendidos (aderentes e não aderentes) e tirantes. Faz avaliação da integridade, confirma o comprimento de cabo ou tirante bem como aponta a presença de água em contato com o aço. Os resultados do RIMT® são utilizados para verificação da perda da relaxação do aço, que deve ser feita a cada 5 anos.

10 CONCLUSÕES

O artifício de introduzir tensões prévias na estrutura, a protensão, se utiliza de concreto e aço de melhor resistência, de mão de obra mais especializada, porém traz redução de seções e custos. A técnica possibilita vencer grandes vãos, não possíveis ao concreto armado convencional. Não apresenta problemas em longo prazo, mesmo sem a execução das manutenções necessárias.

Nota-se, a carência de uma cultura para preservação e manutenção das edificações. De modo geral, as manutenções e serviços de reparos ocorrem quando os sintomas patológicos surgem.

Para a estrutura da Catedral de Natal, esta análise observou que a estrutura atende de forma satisfatória o seu objetivo. A maior deficiência da estrutura estava em seu sistema de cobertura no que se refere à estanqueidade deste. Com a remoção da manta ardosiada e instalação da manta Evalon as infiltrações foram solucionadas, sendo necessário apenas complementar a aplicação da manta em uma pequena área da viga protendida para a proteção ser completa. Deve-se também realizar serviços de reparo de pilares externos (na parte superior) e internos desta estrutura e em partes da laje de fundo da cobertura. Realizar a manutenção dos aparelhos de apoios de neoprene e neoflon, e das placas de metal na parte posterior da Catedral.

Sobre a estrutura do Ginásio SESI SENAI, observou-se que a cobertura com vigas (protendidas) poligonais retas e lajes maciças atendeu com sucesso seu objetivo. O ponto desfavorável foi que, em função da sua forma arquitetônica, os pilares são expostos a chuva e agentes agressivos, sendo sempre necessário vistoriar, reparar e até reforça-los, nos casos de alto estado de corrosão. Na última manutenção da estrutura, em 2009, foi realizada a recuperação de todos os pilares e pórticos. Sugerimos que seja elaborado um planejamento ou cronograma de avaliações.

O Pórtico Monumental de Natal/RN, é uma estrutura totalmente ao ar livre. Sujeita a chuva e a emissão de Dióxido de Carbono. Deve-se tratar as fissuras, trincas e corrosão do aço e recuperar/reforçar o bloco de coroamento. Também é necessário reparar a corrosão das armaduras passivas e aumentar o seu recobrimento, utilizando argamassa polimérica ou concreto projetado.

Para as três estruturas sugere-se que se façam ensaios nos cabos protendidos para avaliar as características do aço, seu comportamento e que sejam verificadas as perdas de protensão dos elementos seja elaborado um cronograma de avaliações.

As empresas brasileiras no segmento da recuperação estrutural possuem técnicas e tecnologias avançadas para o restabelecimento das funcionalidades estruturais, aumentando o desempenho e protegendo a sociedade de riscos na segurança. É necessário a criação de uma normatização em reabilitação de estruturas de concreto para o meio técnico, a fim de instruir os produtos e sistemas para proteção e reabilitação das estruturas de concreto, para que se preze por uma política de obras perenes e de boa qualidade, compatibilizando a vida útil e a finalidade para a qual foi projetada, necessitando claramente de uma fiscalização presente dos serviços a serem realizados. Além, claro, de uma política estadual e municipal de manutenção preventiva das obras, deixando de lado a política da manutenção corretiva ou da execução pós colapso estrutural.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7197** – Projeto de estruturas em concreto protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-1**: Calda de cimento para injeção - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-2**: Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice da fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-3**: Calda de cimento para injeção - Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-4**: Calda de cimento para injeção - Parte 4: Determinação da resistência a compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Caetano, Cristiano Curado Abrantes; Firmino, Marcus Vinicius do Nascimento. **Concreto Protendido**: Material Didático para o Autoaprendizado. Estimativa de carga de protensão. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Junho, 2015.

CARACAS, Joaquim. Palestra Impacto e Protensão. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=M2wxzpxLY4>>. Acesso em: 26 de Outubro de 2017.

CHOLFE, Luiz. **Concreto Protendido: Teoria e Prática**. 2 ed, 2015.

CONSTRUTORA FERNANDES. Disponível em:
http://www.conferconstrutora.com.br/ultimas_obras/3/fundacao_de_aerogerador-55.
 Acesso em: 08 de Março de 2019.

IBIMIX CONCRETO. Disponível em:
<http://www.ibimixconcreto.com.br/servicos.html#>>. Acesso em: 08 de Março de 2019.

FINOTTI, Leonardo. Disponível em:< <http://www.leonardofinotti.com/projects/hermes-880-building> >. Acesso em: 21.set.2018. JUNIOR, Demétrius. Disponível em
<http://www.clistenescarlos.com.br/2013/05/coluna-formas-por-demetrius-junior.html>>. Acesso em 22.set.2017

IMPACTO PROTENSÃO. Disponível em: <<http://impactoprotensao.com.br/>>. Acesso em: 08 de Outubro de 2017.

LARA, Luiz Alcides Mesquita. **Materiais de Construção**. Rede e-Tec Brasil. Ouro Preto – MG, 2013.

LOBATO, Raul. Concreto Protendido: Perdas de protensão. Universidade do Estado de Mato Grosso. Disponível em:
http://sinop.unemat.br/site_antigo/professor_int_unemat.php?id=353. Acesso em 25 de Abril de 2019.

PAIVA, Lara. SITE BRECHANDO. **Sabia que o prédio da capitania das artes foi construído a partir de uma fachada?** Disponível em:
<https://www.brechando.com/2017/06/sabia-que-o-predio-da-capitania-das-artes-foi-construido-partir-de-uma-fachada/>> Acesso em: 08 de Março de 2019.

PFEIL, Walter. **Concreto Protendido**. Introdução. 2ª Edição, Volume 1, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1984.

PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. Concreto Protendido: Notas de Aula. 2018.

PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. Recuperação, reforço e impermeabilização das estruturas da Catedral Metropolitana de Natal. Concreto & Construções, São Paulo, p.33-36, 2010.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso Básico de Concreto Armado**. Conforme NBR 6118/2014. São Paulo, Oficina de Textos, 2015.

RIMT®, Refectometric Impulse Measurement Technique. Disponível em: <http://cordecdobrasil.com.br/rimt/>. Acesso em: 05 de Maio de 2019.

ROCHA, Daniela Maria Arruda; MAIA, Victor de Paiva. **Análise das Estruturas pós Recuperação da Catedral Metropolitana de Natal**: Um estudo de caso. Natal, 2018.

ROSAS, Letícia R. Batista. **Concreto Protendido**: Sistemas de Aplicação da protensão. Disponível em: http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13974aula_2_pdf_Aula_2.pdf Acesso em: 15 de Abril em 2019.

RUDLOFF. Catálogo do concreto protendido. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/12938221> >. Acesso em: 21 de Nov.2018.

SANTOS, José Sergio dos. **Descontruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido**. São Paulo, Oficina de Textos, 2017.

SESI SENAI. Disponível em <<https://www.rn.senai.br/escolas/>>. Acesso em 02 de Abril de 2019.

SILVA, José Pereira da; PEREIRA, Flávio César da Costa; PEREIRA, Fábio Sérgio da Costa. **Projetos de Estrutura de Concreto Armado e Protendido do Rio Grande do Norte Recordistas Nacionais**: Palestra, 2017.

SILVA, José Pereira da; **A trajetória de um calculista de estruturas**. 1ª Edição, Natal, 2009.

TOPMIX Concreto. Disponível em: <http://topmix.com.br/concreto-usinado/concreto-pesado/>. Acesso em: 08 de Março de 2019.

VERISSÍMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JR, Kléos M Lenz. Concreto Protendido: Fundamentos básicos, 4º edição, Novembro, 1998.

VITORIO, José Afonso Pereira; BARROS, Rui Carneiro de. Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa. Fortaleza (2011).

3ES ENGENHARIA. Disponível em: < <http://www.3es.eng.br/concretoarmado01>>. Acesso em: 21 de Novembro de 2017.