

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANNA BEATRIZ RODRIGUES DE SOUZA LIMA

ANÁLISE DAS PERDAS DE PROTENSÃO IMEDIATAS EM PONTE DE
CONCRETO PROTENDIDO: UM ESTUDO DE CASO

Jataí
2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Anna Beatriz Rodrigues de Souza Lima

Matrícula: 20182020260032

Título do Trabalho: Análise das perdas de protensão imediatas em ponte de concreto protendido: um estudo de caso

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente
ANNA BEATRIZ RODRIGUES DE SOUZA LIMA
Data: 22/01/2024 15:53:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jataí, 22 / 01 / 2024.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ANNA BEATRIZ RODRIGUES DE SOUZA LIMA

**ANÁLISE DAS PERDAS DE PROTENSÃO IMEDIATAS EM PONTE DE
CONCRETO PROTENDIDO: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Jataí
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Lima, Anna Beatriz Rodrigues de Souza.

Análise das perdas de protensão imediatas em ponte de concreto protendido: um estudo de caso [manuscrito] / Anna Beatriz Rodrigues de Souza Lima. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

69 f.; il.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Bibliografias.

Apêndices.

1. Concreto protendido. 2. Pós-tração. 3. Perdas imediatas. I. Bueno, Mônica Maria Emerenciano. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária – Rosy Cristina O. Barbosa – CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F002/2024-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

ANNA BEATRIZ RODRIGUES DE SOUZA LIMA

Análise das perdas de protensão imediatas em ponte de concreto protendido: um estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 01 de dezembro de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno
Presidente da banca / Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Profa. Ma. Márcia Franco de Assis
Membro Externo
Faculdade Una Jataí

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eulher Chaves Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/12/2023 20:05:00.
- **Márcia Franco de Assis, Márcia Franco de Assis - Outros - Brasil Educação S. a / Faculdade Una Jataí (05648257000178)**, em 14/12/2023 14:28:01.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/12/2023 13:26:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 478750

Código de Autenticação: 930328bd24



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9580 (ramal: 9580)

Dedico este trabalho principalmente a minha avó que sempre apoiou e incentivou minha vida acadêmica, a toda minha família que sempre estiveram ao meu lado e não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Dedico também aos amigos que fizeram dos momentos difíceis que eventualmente passei ao longo da graduação mais leves e felizes, e aos colegas de trabalho que tive ao longo desses anos, por todo o incentivo, pelas trocas de experiência, os ensinamentos e oportunidades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha mentora, a professora doutora Mônica, por ter concordado em me orientar neste projeto e, em seguida, por ter se dedicado a ele com muito empenho, fornecendo-me todo o suporte necessário para alcançar seus objetivos, e me apoiando e incentivando em relação ao tema que propus.

Também quero expressar minha gratidão a todos os profissionais da Construtora Trena que forneceram os dados e permitiram que eu acompanhasse a execução da obra, o que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Em particular, desejo agradecer ao engenheiro de execução Kleber Lafetá Meira, cujo estágio me proporcionou uma experiência tão enriquecedora para o meu conhecimento. Além disso, quero agradecer-lhe por sua dedicação e paciência, sempre disposto a compartilhar seu conhecimento comigo e com todos os estagiários que passaram pela equipe.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Engenharia (*substantivo feminino*)

1. aplicação de métodos científicos ou empíricos à utilização dos recursos da natureza em benefício do ser humano. (FERREIRA,2009)

RESUMO

Neste estudo, foi realizada uma análise sobre os diversos tipos de protensão, suas aplicações, métodos construtivos e métodos de cálculo das perdas imediatas de protensão. Foram utilizados para confecção deste trabalho dados bibliográficos dos projetos executivos da Ponte sobre o Rio Claro fornecidos pela empresa executora e também os dados obtidos in loco nos atos de protensão das aduelas nas pistas da ponte. Com eles fez-se uma comparação do alongamento teórico determinado em projeto e o valor das leituras do alongamento alcançado no ato da protensão. Utilizando os dados coletados in loco das fichas de protensões executadas na superestrutura da ponte sobre o Rio Claro, localizada no Município de Jataí estado de Goiás, foi possível compreender a necessidade de prever as perdas de protensão, a fim de que o processo seja monitorado e planejado de forma adequada, evitando grandes discrepâncias em relação ao projeto original. Compreender as perdas de carga nas protensões de pontes é fundamental, visto que essas perdas têm potencial para impactar significativamente o desempenho do sistema de protensão, e por conseguinte, a estabilidade e longevidade das pontes que utilizam esse processo construtivo.

Palavras-chave: Concreto protendido; Pós-tração; Perdas imediatas.

ABSTRACT

In this study, an analysis was conducted on various types of prestressing, including their applications, construction methods, and methods for calculating immediate prestressing losses. Bibliographic data from the executive projects of the Bridge over the Rio Claro, provided by the executing company, were used for the preparation of this work. Additionally, on-site data were obtained during the prestressing activities of the arches on the bridge decks. A comparison was made between the theoretical elongation determined in the project and the value of the elongation readings achieved during the prestressing. By utilizing on-site data from the prestressing records carried out on the superstructure of the Bridge over the Rio Claro, located in the Municipality of Jataí, state of Goiás, it was possible to understand the need to anticipate prestressing losses so that the process can be monitored and planned appropriately, avoiding significant discrepancies from the original project. Understanding load losses in prestressed bridge elements is crucial, as these losses have the potential to significantly impact the performance of the prestressing system, and consequently, the stability and longevity of bridges using this construction process.

Keywords: Prestressed concrete; Post-tensioning; Immediate losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Primeiro ponte do Galeão, Rio de Janeiro 1948	23
Figura 2.2 Sequência construtiva de pós-tração com aderência posterior.....	25
Figura 2.3 - Sequência executiva de pós-tração com protensão externa	26
Figura 2.4 - Sequência construtiva de pré-tração	27
Figura 2.5 - Cimbramento fixo em viaduto	29
Figura 2.6 - Cimbramento fixo em ponte	29
Figura 2.7 - Lançamento de vigas pré-moldadas na ponte da União em Braço do Norte.....	31
Figura 2.8 - Ponte sobre o rio peixe	32
Figura 2.9 - Balanço sucessivo sobre a ponte do Rio Claro	33
Figura 2.10 - Execução de cimbramento móvel.....	34
Figura 2.11 - Detalhes de dispositivos de protensão	39
Figura 2.12 - Diagrama perdas por acomodação	40
Figura 2.13 - Perdas por acomodação da ancoragem com força de protensão.....	41
Figura 2.14 - Cálculo aproximado do alongamento	45
Figura 3.1 - Ponte sobre o Rio Claro.....	47
Figura 3.2- Acoragem Rudloff tipo E.....	49
Figura 3.3 - Macaco de protensão	49
Figura 3.4 - Processo de injeção de nata de cimento pista esquerda	50
Figura 3.5- Fluidez nata de cimento	51
Figura 3.6 - Finalização de injeção de nata de cimento.....	51
Figura 4.1- Elevação do traçado geométrico do cabo C4.....	53
Figura 4.2 - Diagrama de forças $P_0(x)$. (x): processo geral e simplificado.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROCESSO GERAL.....	55
TABELA 2 – PROCESSO SIMPLIFICADO.....	55
TABELA 3 – ALONGAMENTO TEORICO DOS CABOS.....	56
TABELA 4 – DADOS PROTENSÕES MAIO 2022.....	57
TABELA 5 – DADOS REPROTENSÃO MAIO 2022.....	58
TABELA 5.A – DADOS PROTENSÕES DEZEMBRO 2021	63
TABELA 6.A – DADOS PROTENSÕES JANEIRO 2022.....	63
TABELA 7.A – DADOS PROTENSÕES FEVEREIRO 2022.....	64
TABELA 8.A – DADOS PROTENSÕES MARÇO 2022.....	64
TABELA 9.A – DADOS PROTENSÕES ABRIL 2022.....	65
TABELA 10.A – DADOS PROTENSÕES JUNHO 2022.....	65
TABELA 11.A – DADOS PROTENSÕES JULHO 2022.....	66
Tabela 6.B – RESULTADOS ALOGAMENTO TÉORICO DOS CABOS DE JANEIRO DE 2022 Á JULHO DE 2022.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP'S – Corpos de prova de concreto

NBR – Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

P_0 = força de protensão na seção de abscissa $x=0$; no tempo $t = 0$;

$P_0(x)$ = força de protensão na seção de abscissa x , no tempo $t = 0$;

P_i = força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração;

μ = coeficiente de atrito entre o aço e a bainha;

α = somatório dos ângulos de inflexão do cabo, não considerada a inclinação inicial α_0 ;

$k = \mu \gamma$, sendo γ = coeficiente de perdas por metro, provocadas por curvaturas não intencionais;

K = coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo;

λ_r = recuo devido à cravação das colunas (cm);

A_p = área da seção transversal do cabo (cm²);

Δp = perda da força de protensão por unidade de comprimento nos 16,0 m iniciais (kN/cm);

ΔP = perda da força de protensão junto à ancoragem, devida à cravação das cunhas (kN);

E_p = módulo de elasticidade do aço (kN/cm²);

$f = p \cdot x_r$ = perda da força de protensão no comprimento $x = x_r$;

n = número de cabos protendidos sucessivamente;

$\alpha = E_p/E_{ci}(t)$; relação entre os módulos de deformação do aço e do concreto na idade de protensão, onde $E_p = 200$ Gpa;

E_{ci} = módulo de elasticidade do concreto para a idade de 28 dias;

$E_{ci}(t)$ = estimativa do módulo de elasticidade do concreto na idade entre 7 e 28 dias;

F_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade em Mpa;

σ_{cp} = tensão no concreto devido a protensão simultânea dos cabos;

σ_{cg} = tensão no concreto devido as ações de cargas permanentes;

σ_p^n = tensão média na armadura ativa, já consideradas as perdas imediatas;

L = comprimento do cabo correspondente ao alongamento que está sendo calculado, incluindo o trecho reto;

L_r = fora do concreto;

E_p = módulo do aço de protensão;

n = número de trechos;

ℓ_i = comprimento de cada trecho (projeção);

Δy_i = variação das ordenadas;

E_p = Módulo de elasticidade de projeto;

A_p = área da seção transversal da cordoalha;

$E_p(\text{fábrica})$ = Modulo de elasticidade de fábrica da cordoalha;

$A_p(\text{fábrica})$ = área da seção transversal da cordoalha de fábrica;

$\Delta \ell$ = alongamento teórico de projeto.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 Tipos de Protensão	23
2.1.1 PÓS-TRAÇÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR	24
2.1.2 PÓS-TRAÇÃO SEM ADERÊNCIA POSTERIOR	25
2.1.3 PÓS-TRAÇÃO COM PROTENSÃO EXTERNA	26
2.1.4 PRÉ-TRAÇÃO EM PRÉ-MOLDADOS	26
2.2 PONTES PROTENDIDAS	27
2.3 FORMAS DE EXECUÇÃO	28
2.3.1 CONCRETO MOLDADO <i>IN LOCO</i> COM CIMBRAMENTO FIXO	28
2.3.2 ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS	30
2.3.3 BALANÇO SUCESSIVO	31
2.3.4 CIMBRAMENTO MÓVEL	33
2.4 PERDAS DA FORÇA DE PROTENSÃO	34
2.4.1 PERDAS INICIAIS DA FORÇA DE PROTENSÃO	35
2.4.2 PERDAS IMEDIATAS DA FORÇA DE PROTENSÃO	35
2.4.2.1 PERDAS POR ATRITO	36
2.4.2.2 PERDAS POR ACOMODAÇÃO DAS ANCORAGENS	38
2.4.2.3 PERDAS POR ENCURTAMENTO IMEDIATO DO CONCRETO	42
2.4.2.4 VERIFICAÇÃO – ALONGAMENTO TEÓRICO DOS CABOS	43
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	46
3.1 Cálculo de Perdas Imediatas	46
3.2 Caracterização da protensão executada <i>in loco</i>	46
3.2.1 CORDOALHA DE AÇO E CONCRETO ESTRUTURAL	47
3.2.2 BAINHAS	48
3.2.3 ANCORAGEM ATIVA TIPO “E”	48
3.2.4 INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO EM PROTENSÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR	49

3.2.5 DADOS TÉCNICOS PARA FICHA DE EXECUÇÃO DA PROTENSÃO.....	52
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	53
4.1 APLICAÇÃO NUMÉRICA.....	53
4.2 ANÁLISE DOS ALONGAMENTOS TEÓRICOS DO ESTUDO DE CASO.....	56
CAPÍTULO 5 Considerações Finais	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS DAS PROTENSÕES	63
APÊNDICE B – RESULTADOS.....	67

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material construtivo muito utilizado. É estimado um uso anual de concreto em torno de 11 bilhões de toneladas, o que segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, este valor é inferior apenas ao consumo de água (Pedroso, 2009).

Buscando suprir as demandas de melhorias na construção civil surgiram o concreto armado e o concreto protendido, com objetivo de ampliar a resistência do concreto e sua funcionalidade (Veríssimo e Lenz César Jr, 1998).

Vasconcelos (2012), define como elementos protendidos aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento dos aços de alta resistência no estado limite último.

Protender uma estrutura de concreto permite que a resistência mecânica do concreto e do aço presentes na estrutura seja melhor aproveitada, reduzindo assim a quantidade utilizada desses materiais. Essa tecnologia é altamente eficiente, devido à sua excelência técnica em relação às soluções mais convencionais. Além disso, é importante ressaltar que ela pode aumentar a vida útil dos elementos em que é aplicada (Schmid, 2002).

A técnica do concreto protendido tem sido cada vez mais adotada no Brasil devido à sua habilidade em vencer grandes vãos e permitir maior liberdade arquitetônica. Adicionalmente, ela apresenta uma melhoria significativa na capacidade da estrutura em resistir aos esforços de flexão, resultando em vãos livres maiores do que aqueles alcançados com o uso do concreto armado convencional. Por essa razão, o concreto protendido tem se tornado uma alternativa cada vez mais popular na construção civil brasileira (Ribeiro, 2018).

Na tecnologia do concreto protendido, a força de protensão é o principal, tal força é definida como a consequência do pré-alongamento da armadura ativa. A protensão representa um sistema construtivo no qual, uma ação mecânica tensiona o aço, com o máximo aproveitamento da resistência do material (Cholfé e Bonilha, 2018).

A principal distinção entre o concreto armado e o protendido é a presença ou ausência das forças de protensão. É essencial levar em consideração os efeitos da retração e da fluência no concreto, bem como da relaxação no aço, juntamente com as perdas por atrito e encunhamento, durante

o projeto das peças. Esses fatores devem ser cuidadosamente calculados para garantir a efetividade da protensão e, conseqüentemente, a capacidade da estrutura em resistir aos esforços de flexão e suportar grandes vãos (Hanai,2015).

Sabe-se que o concreto apresenta uma resistência à compressão significativamente maior do que à tração, o que requer medidas para controlar ou evitar a fissuração. Nesse sentido, a protensão pode ser utilizada para criar tensões de compressão prévias em áreas onde o concreto seria submetido a esforços de tração na estrutura. Esse processo permite evitar a fissuração do concreto e aumentar a capacidade da estrutura em suportar cargas e vencer grandes vãos (Bastos,2019).

É certo que, apesar de o conceito ser simples, o projeto e a execução de uma estrutura como essa envolve conhecimentos, equipamentos, equipes treinadas, além de recursos tecnológicos avançados em motivo do tipo e do porte da obra (Hanai, 2015).

Pode-se citar ainda algumas vantagens do concreto protendido, como:

- conter de modo mais eficaz a fissuração, podendo-se até mesmo eliminá-la;
- utilizar aços de alta resistência, sem causar com isso uma fissuração intolerável;
- desenvolvimento de novos processos construtivos, nos quais a protensão entra como elemento determinante no peso próprio de elementos pré-moldados e na solidarização de componentes;
- pode-se conter melhor as deformações das estruturas, com melhor aproveitamento da seção transversal de concreto não fissurado;
- vencer grandes vãos, como o de pontes e viadutos.

Neste estudo, será realizado o monitoramento das protensões, juntamente com a análise das perdas imediatas de carga, mediante a avaliação do alongamento teórico dos cabos. A ponte em foco está situada no município de Jataí, no estado de Goiás, e é conhecida como a "Ponte sobre o Rio Claro". Esta construção foi retomada após alguns anos de abandono, demandando a aplicação de técnicas construtivas avançadas para assegurar a segurança estrutural.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com Duarte (2015), o que se precisa fundamentalmente para difundir o concreto protendido no Brasil é difundir seu conhecimento.

Visto que a construção civil sempre busca formas de melhorar processos executivos e melhorias nos materiais utilizados, pode-se definir protensão como a habilidade de inserir tensões antecipadas em uma estrutura, com o intuito de melhorar as características técnicas do material, bem como seu comportamento (PFEIL, 1984).

Levando em conta esses aspectos e o fato de que a técnica de protensão é frequentemente empregada na construção de pontes com vãos extensos. É importante avaliar corretamente as perdas das forças de protensão no projeto para que a execução da mesma seja bem feita. A análise das perdas imediatas de protensão não apenas garante a integridade estrutural da ponte, mas também impulsiona a eficiência construtiva, a conformidade com as especificações do projeto e a sustentabilidade a longo prazo da infraestrutura. Em nosso estudo, foi acompanhado um desvio significativo dos padrões aceitáveis de perda, considerando o alongamento teórico dos cabos, diante dessa constatação, tornou-se imperativo proceder com a reprotensão da estrutura, focando especificamente no cabo 14 da superestrutura da aduela. De acordo com o acompanhamento dos projetos foi observada a necessidade de reprotensão do cabo em questão, o que despertou a curiosidade de se estudar tais perdas.

1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar as perdas de protensão em pontes utilizando o estudo de caso da Ponte sobre o Rio Claro em Jataí-GO.

1.2.2 Objetivos Específicos

Tem-se como objetivos específicos desse trabalho os seguintes pontos:

1. Estudar a protensão aplicada a pontes de concreto protendido;

2. Avaliar a importância do dimensionamento das perdas de protensão imediatas na execução;
3. Comparar os alongamentos teóricos previstos em projeto com os alongamentos reais através do acompanhamento da execução sobre a ponte do Rio Claro na cidade de Jataí Goiás e relatar o processo executivo da protensão.

CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Duarte (2015), a história do concreto protendido é antiga, pode-se citar o conceito do barril de vinho, onde tem-se várias tiras de madeira comprimidas por uma fita metálica de menor diâmetro que o maior diâmetro do barril, que ao ser forçada sobre o barril estica-se fazendo com que as tiras de madeira não se soltem, ou seja o conceito de protensão é a interação entre os materiais, aproveitando-se das melhores propriedades de cada material.

Em 1896, na França, Monier tentou protender o concreto utilizando vergalhões ao construir uma jardineira. Ele partiu da ideia de que as barras de aço que utilizaria fariam o trabalho de tração da peça e, ao mesmo tempo, comprimiriam o concreto. Dessa forma, combinando a tração do aço e a compressão do concreto, foi criado o princípio do concreto protendido. Entretanto, o experimento fracassou após quatro anos, com o rompimento da jardineira em questão, indicando que o experimento não obteve êxito.

Cerca de 30 anos após o experimento da jardineira, o francês Eugene Freyssenet percebeu que o problema a ser solucionado seria o aço utilizado, pois quando é liberada, a barra de aço comprime o concreto, fazendo-o encurtar simultaneamente. Posteriormente, a retração do concreto provoca um encurtamento adicional da barra, enquanto a deformação gradual do concreto também contribui para a diminuição do comprimento da barra de aço. No desfecho, o alongamento inicial da barra de aço, devido a esses três fenômenos, é completamente anulado. Com isso ele propôs que se criasse um aço mais alongável, que mesmo após os fenômenos da compressão, retração e fluência, se mantivesse tracionado.

Freyssient então apresentou o primeiro estudo significativamente importante sobre o concreto protendido. Abordando em seu estudo as perdas de cargas causadas por alguns fatores limitantes, como por exemplo a retração, a fluência do concreto, a relaxação do aço, o escorregamento na ancoragem, entre outros elementos. E após uma grande linha de pesquisas e experimentos, constatando a importância da consideração das perdas de protensão e da importância do aço com bom teor de resistência, durante o século XX, foram desenvolvidos aços mais resistentes e a mais alongáveis, fazendo com que a técnica da protensão alcançasse sucesso (Bastos, 2019).

Segundo Eugène Freyssinet: “Protender uma estrutura é submetê-la, antes ou simultaneamente com a aplicação das cargas, a esforços permanentes e adicionais, que combinados com os provenientes dos carregamentos, ocasionam, em toda a peça, esforços resultantes inferiores às

tensões limites que o material pode suportar indefinidamente sem alteração” (Mota, 2010). A primeira obra realizada com concreto protendido no Brasil, foi a ponte do Galeão (figura 2.1), situada na cidade do Rio de Janeiro. A ponte foi construída em 1948 utilizando o sistema Freyssinet. (Cholfe e Bonilha, 2018)

Figura 2.1-Primeiro ponte do Galeão, Rio de Janeiro 1948



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Primeira-Ponte-do-Galeao-Rio-de-Janeiro-1948-Mondorf-2006_fig2_278674545

2.1 TIPOS DE PROTENSÃO

É interessante salientar que há uma diferença conceitual entre os termos sistema de protensão e tipo de protensão. Simplificando, é possível definir que os sistemas de protensão podem ser divididos em protensão com aderência inicial e protensão com aderência posterior. O que significa que o elemento distintivo é quando se dá a aderência da armadura protendida com o restante da peça em relação à cura do concreto. O sistema de protensão, pode ser utilizada também para se designar um processo executivo específico, e o termo tipo de protensão se refere ao efeito final da força de protensão sobre uma peça (Veríssimo e Lenz César Jr, 1998).

No dicionário a definição de protensão é: “Processo pelo qual se aplicam tensões prévias ao concreto.” (Ferreira, 1999).

Na engenharia a protensão é aplicada em peças estruturais e alguns materiais de construção. A protensão aplicada ao concreto, como será abordado neste estudo, se desenvolveu muito nos últimos 100 anos (Veríssimo e Lenz César Jr, 1998).

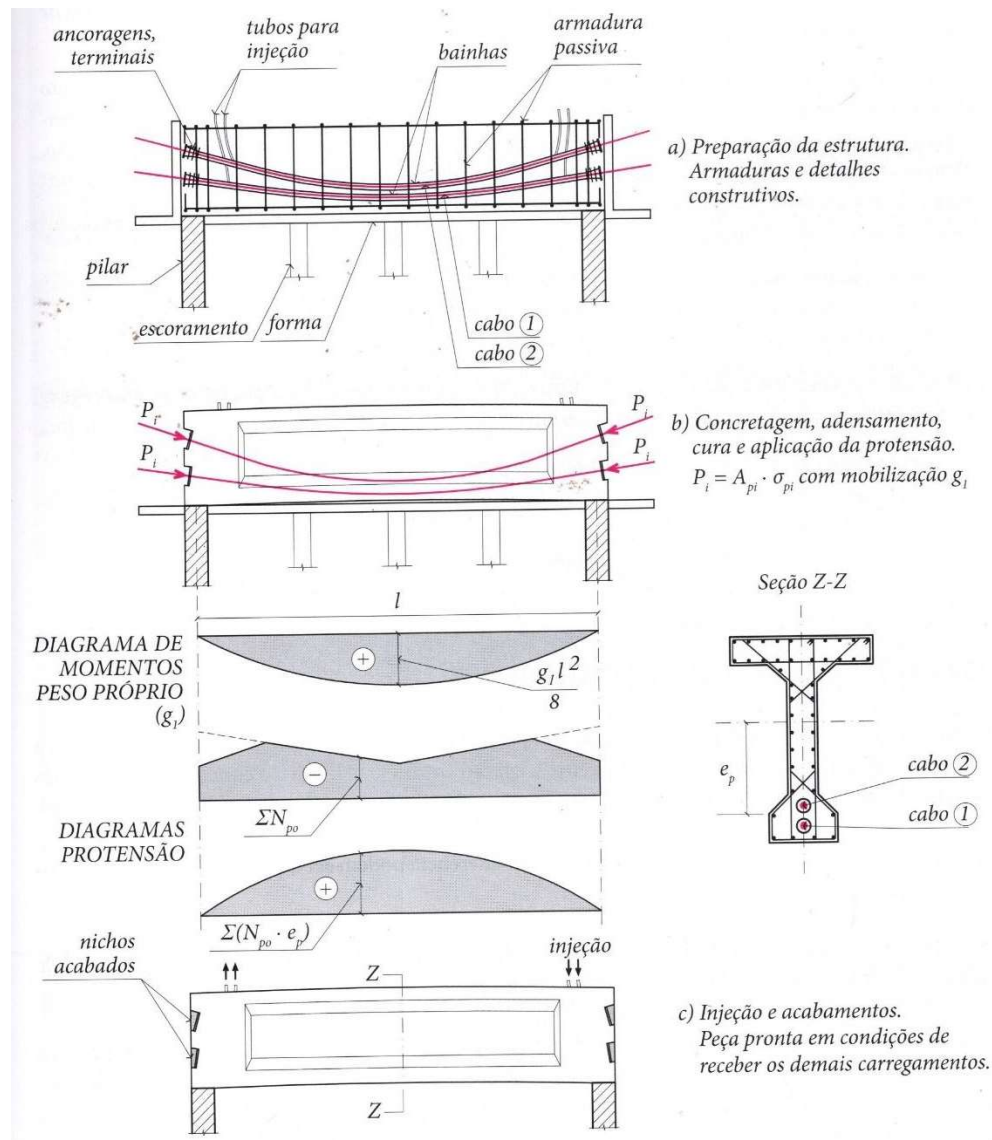
Considerando que a técnica de protensão é amplamente empregada em lajes e vigas, bem como em grandes estruturas como viadutos e pontes (Veríssimo e Lenz César Jr, 1998). Este estudo irá se concentrar especificamente na aplicação da protensão em pontes.

2.1.1 PÓS-TRAÇÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR

Segundo a NBR 6118 (ANBT, 2023), o processo de pós-tração com aderência posterior (figura 2.2) se refere ao concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito depois que o concreto está endurecido, e utilizando como apoios partes do próprio elemento estrutural, e posteriormente a aderência é criada com a injeção de calda de cimento nas bainhas.

Esse processo tem ampla aplicação em estrutura protendidas de médio e grande porte, como obras de infraestrutura viária. Essas estruturas geralmente são moldadas e protendidas in loco e a transferência das forças de protensão são feitas por meio das ancoragens (ativas e passivas), que são incorporadas na peça (Cholfe e Bonilha, 2018).

Figura 2.2 Sequência construtiva de pós-tração com aderência posterior



Fonte: Cholfe e Bonilha (2018)

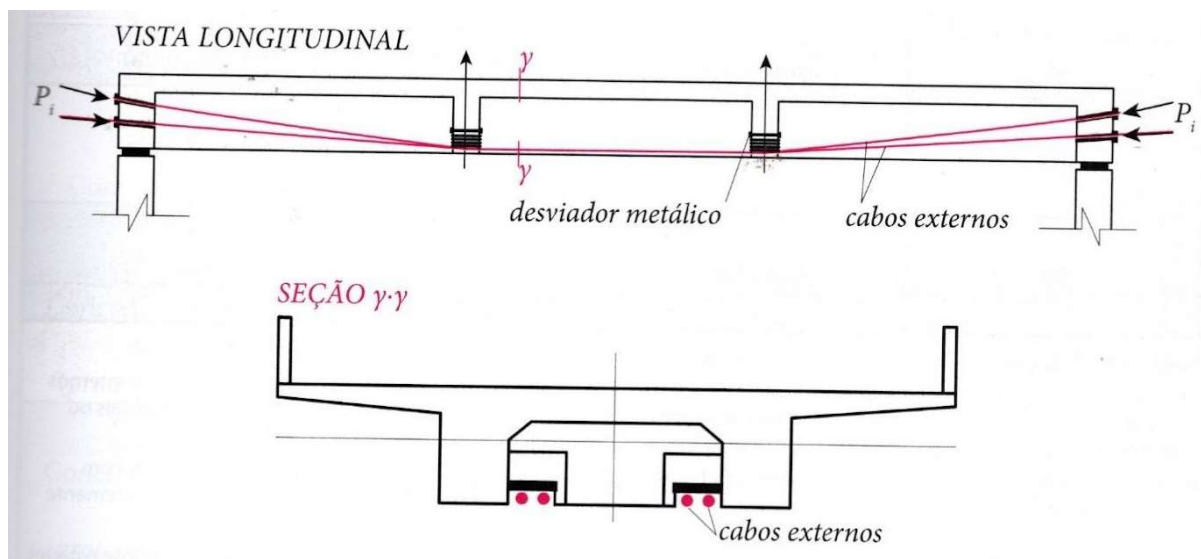
2.1.2 PÓS-TRAÇÃO SEM ADERÊNCIA POSTERIOR

Segundo a NBR 6118 (ANBT, 2023), a pós-tração com aderência posterior é o processo em que nas peças com pós-tração não são injetadas a nata de cimento após a protensão. Essa ligação se dá somente nas ancoragens, onde a força de protensão é transferida ao elemento estrutural. Esse processo de protensão alcançou maior relevância com o desenvolvimento das cordoalhas engraxadas (Bastos, 2006) e está presente na maioria dos projetos de lajes planas ou nervuradas de edifícios tanto comerciais como residenciais. Bem como em pisos estruturais e pré-moldados com pós-tração executados in loco (Cholfe e Bonilha, 2018).

2.1.3 PÓS-TRAÇÃO COM PROTENSÃO EXTERNA

A técnica de protensão externa (figura 2.3) consiste na aplicação de uma força, devidamente posicionada com a ajuda de dispositivos desviadores. Quando a armadura ativa atua fora da seção do concreto, a peça protendida é submetida a uma protensão externa. Essa técnica é frequentemente utilizada em pontes e viadutos, além de ser empregada para reforçar estruturas que foram construídas anteriormente. É importante destacar que, na protensão externa, a bainha utilizada deve ser feita de um material resistente às condições climáticas adversas, a fim de garantir a devida proteção à armadura ativa (Cholfe e Bonilha, 2018).

Figura 2.3 - Sequência executiva de pós-tração com protensão externa



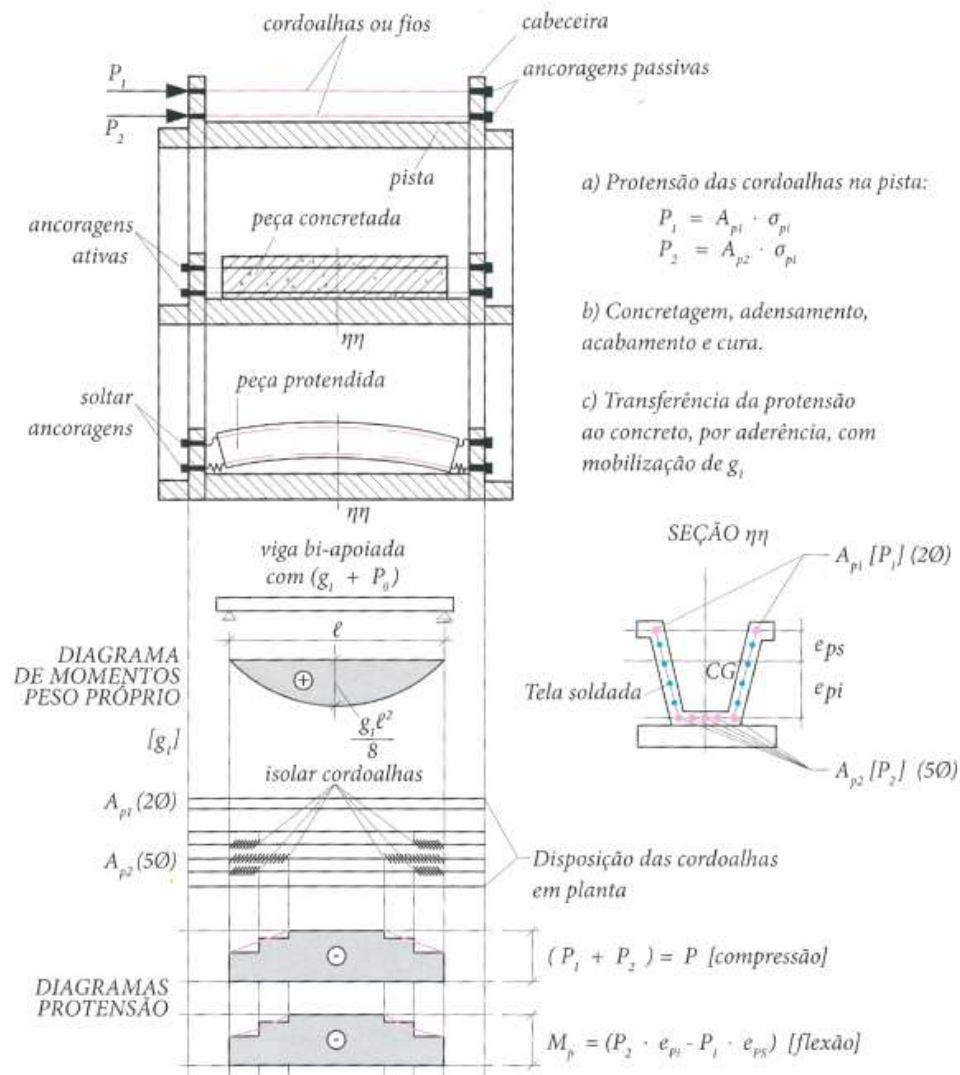
Fonte: Cholfe e Bonilha (2018)

2.1.4 PRÉ-TRAÇÃO EM PRÉ-MOLDADOS

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o processo de pré-tensão (figura 2.4) refere-se à técnica de concreto protendido em que a armadura ativa é pré-alongada por meio de apoios independentes da estrutura, antes da concretagem.

Nesse tipo de protensão, a ligação entre a armadura e os apoios é desfeita após o endurecimento do concreto, sendo a ancoragem realizada por aderência. Essa técnica é comumente utilizada na produção de elementos pré-moldados (Cholfe e Bonilha, 2018)

Figura 2.4 - Sequência construtiva de pré-tração



Fonte: Cholfe e Bonilha (2018)

2.2 PONTES PROTENDIDAS

Segundo Vasconcelos (2012): “No sentido genérico, ponte é qualquer coisa criada para vencer um obstáculo.”

De acordo com Marchetti (2018), as estruturas que transpõem rios são conhecidas como pontes, enquanto aquelas que superam vales ou outras vias são chamadas de viadutos.

Existem diversos tipos de pontes, incluindo aquelas construídas em alvenaria de tijolos, alvenaria de pedra, madeira, aço, concreto armado, concreto protendido, pontes estaiadas, pontes mistas, entre outras. Neste trabalho, o foco será direcionado para as pontes de concreto protendido.

Segundo Vitório (2015), o concreto protendido é amplamente empregado na construção de pontes e viadutos que apresentam grandes vãos. A técnica de protensão é um facilitador para garantir a segurança dessas estruturas, além de oferecer diversas vantagens em relação a outros métodos construtivos, que serão detalhadas ao longo deste estudo.

A seguir, do item 2.3.1 ao item 2.3.5 serão apresentados alguns métodos construtivos de pontes e viadutos que utilizam a técnica de protensão.

2.3 FORMAS DE EXECUÇÃO

Serão descritos a seguir alguns métodos construtivos comumente utilizados na execução de pontes e viadutos.

É importante ressaltar que esta introdução irá se concentrar nos aspectos gerais de cada processo construtivo.

2.3.1 CONCRETO MOLDADO *IN LOCO* COM CIMBRAMENTO FIXO

O cimbramento fixo em viadutos (figura 2.5) e pontes (figura 2.6) é o processo mais tradicional de construção desses componentes. Os andaimes temporários para execução devem ser resistentes e garantir as dimensões previstas no projeto, por isso é comum o uso de fundações temporárias para esses andaimes, pois eles devem ser projetados para suportar o peso do concreto recém-lançado e a sobrecarga dos trabalhadores e dos equipamentos utilizados na execução da concretagem. Além disso, o andaime deve ser pensado dentro do canteiro de obras de modo a não interferir indevidamente nas condições de tráfego ou fluxo no canteiro de obras.

Figura 2.5 - Cimbramento fixo em viaduto



Fonte: autoria própria (2022)

Figura 2.6 - Cimbramento fixo em ponte



Fonte: <https://omensageiro77.wordpress.com/2015/06/25/a-grande-guerra-a-guerra-total-e-dom-alfredo-a-violenta-historia-do-paraguai%E2%80%8F/ponte/>

As escoras podem ser de madeira, de metal, ou ainda mistas intercalando elementos metálicos e de madeira.

Atualmente, o escoramento metálico vem sendo cada vez mais utilizado na construção civil, apresentando diversas vantagens em relação ao uso de escoras de madeira. Entre essas vantagens, destacam-se a maior segurança para os trabalhadores, já que a estrutura é mais resistente; o atendimento à legislação ambiental, pois evita o uso de madeiras impróprias ou

ilegais; a economia na obra, uma vez que minimiza a necessidade de mão de obra especializada; o maior tempo de vida útil em comparação à escora de madeira; e um armazenamento de baixo custo, já que não necessita de tantas especificidades quanto a madeira (Borges e Leite e Correia, 2019).

Apesar de ser considerado um método tradicional, é importante destacar que o processo de escoramento pode apresentar variações significativas, de acordo com as características da construção e as condições em que o trabalho é executado (Debs e Takeya, 2007).

2.3.2 ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS

Este método de construção emprega elementos pré-fabricados (figura 2.7) com o comprimento adequado para abranger as distâncias da ponte e suas variações. Normalmente, é utilizado em vãos mais curtos que não necessitam de cimbramento.

Para a execução de pontes com elementos pré-moldados deve-se subdividir o tabuleiro em faixas longitudinais (no caso de pontes de laje), ou em vigas longitudinais (no caso de pontes de vigas), tais faixas serão posteriormente unidas por concreto feito in loco, e podem também ser protendidas transversalmente.

Em construções como pontes de vigas, as lajes comumente são moldadas in loco, e as suas formas ficam escoradas nos próprios elementos pré-moldados, diminuindo dessa forma o peso dos elementos pré-moldados. Esses elementos podem ser adquiridos em fabricas ou feitos no próprio canteiro de obras.

Os equipamentos de elevação e transporte são uma das principais limitações para a aplicação de elementos pré-moldados neste tipo de execução (Debs e Takeya, 2007).

Figura 2.7 - Lançamento de vigas pré-moldadas na ponte da União em Braço do Norte



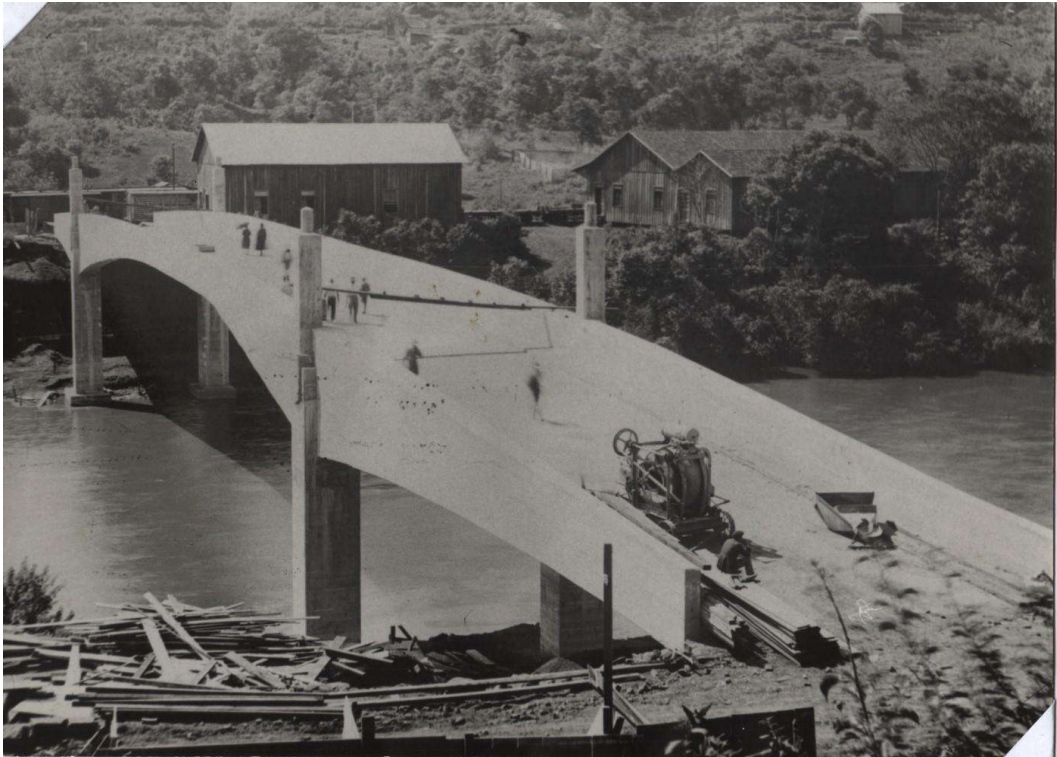
Fonte: <https://www.sulinfoco.com.br/ponte-da-uniao-primeiras-vigas-pre-moldadas-chegam-em-braco-do-norte/>

2.3.3 BALANÇO SUCESSIVO

O balanço sucessivo é um método de concretagem in loco para a execução de pontes e viadutos em concreto armado ou concreto protendido.

Esse método consiste em dividir a ponte em segmentos e construir cada segmento apoiado no anterior, de forma progressiva a partir dos apoios, até a execução completa do vão. Este método foi utilizado pela primeira vez pelo engenheiro Emílio Baumgart, na construção da ponte sobre o rio do Peixe, ligando as cidades de Herval do Oeste e Joaçaba em Santa Catarina, em 1930, com um vão central de 68m (figura 2.8). É uma técnica que permite a construção de pontes com grandes vãos, e tem sido utilizada em muitas obras ao redor do mundo (Debs e Takeya, 2007).

Figura 2.8 - Ponte sobre o rio peixe



Fonte: <https://medium.com/@maisespecificoimpossivel/ponte-em%C3%A9lio-baumgart-1-ponte-em-balan%C3%A7os-sucessivos-do-mundo-251bfec7a425>

Este sistema é utilizado quando existem obstáculos que inviabilizam de alguma maneira a execução de escoramentos apoiados. Estes obstáculos podem ser rios, lagos ou rodovias.

O método de balanço sucessivo (figura 2.9) utiliza duas abordagens: segmentos moldados no local e segmentos pré-moldados. Em outras palavras, as aduelas podem ser moldadas no local ou pré-fabricadas. No método executivo feito in loco, a concretagem é executada através de formas deslocáveis em balanço, suportadas pelos trechos já concluídos (DNIT, 1996). No caso das aduelas pré-moldadas, estas são moldadas contra a face frontal da aduela imediatamente anterior, de modo a obter-se o maior ajustamento possível nas superfícies a serem ligadas futuramente (DNIT, 2006).

Figura 2.9 - Balanço sucessivo sobre a ponte do Rio Claro



Fonte: Autoria própria, 2022

Como alternativa, a construção moldada no local requer que todas as infraestruturas e mesoestruturas estejam concluídas antes da concretagem da superestrutura. Esse método é adotado quando os segmentos pré-moldados são muito pesados para serem transportados ou quando há restrições significativas de acesso ao canteiro de obras (Debs e Takeya, 2007).

2.3.4 CIMBRAMENTO MÓVEL

Segundo Desbs e Takeya (2007) o cimbramento móvel (figura 2.10) possui dispositivos que permitem o deslocamento do cimbramento sem que seja necessário desmontá-lo.

O método construtivo com cimbramento móvel envolve a retirada do suporte das formas em uma parte da ponte que seja auto sustentável, após a concretagem. Quando o concreto atinge a resistência necessária, o cimbramento é movido para o próximo segmento e o processo se repete. Esse processo de construção com cimbramento móvel é indicado caso a ponte tenha três ou mais vãos, e preferencialmente que tenha seção transversal constante (Desbs e Takeya, 2007).

Figura 2.10 - Execução de cimbramento móvel



Fonte: <https://www.trucadao.com.br/cimbramento-movel/berd/pr/m30x2-f/57660>

2.4 PERDAS DA FORÇA DE PROTENSÃO

Se tratando de perdas de protensão pode-se citar dois tipos, que são, aquelas que acontecem antes da transferência da protensão para o concreto e durante essa transferência. As perdas iniciais são aquelas ocorridas na pré-tração antes da liberação do dispositivo. As imediatas ocorrem durante a transferência da protensão para o concreto e as progressivas ocorrem durante a vida útil da estrutura. As perdas de protensão são inerentes ao processo executivo e devem ser previstas em projeto.

As perdas imediatas de protensão ocorrem tanto no processo de pós-tração, quanto no de pré-tração, devido à acomodação das ancoragens, deformação imediata do concreto e/ou atrito nos cabos. Já as perdas progressivas de protensão são causadas pela retração e fluência do concreto, também podem ocorrer devido à relaxação do aço de protensão ao longo do tempo (Hanai, 2015).

A força de protensão é um elemento fundamental das estruturas de concreto protendido, é o que garante a capacidade de suporte da seção de concreto ao longo de sua vida útil. Essa força é determinada por fatores físicos, como o aparelho tensor, as bainhas e as ancoragens terminais,

bem como pela interação entre o aço e o concreto, que são submetidos a um estado de tensão permanente em favor da protensão e das cargas atuantes na estrutura. O projeto de uma estrutura protendida deve levar em consideração as perdas de força de protensão que ocorrem antes da transferência da força ao concreto, durante a transferência e após, considerando essa perda ao longo da vida útil da estrutura (Cholfle e Bonilha, 2018).

2.4.1 PERDAS INICIAIS DA FORÇA DE PROTENSÃO

Segundo Chofle e Bolina (2018), são consideradas perdas iniciais, as que acontecem antes da liberação do dispositivo de tração no processo de pré-tração. Essas perdas podem decorrer de diversos motivos, como os citados abaixo:

- Atrito nos pontos de desvio da armadura poligonal, cuja avaliação deve ser feita experimentalmente, em função do tipo de aparelho de desvio empregado, porém para armaduras sem desvios, com protensão constante, caso comum dos pré-moldados com armaduras aderentes, essa perda não existe;
- Escorregamento da armadura na ancoragem, cuja determinação deve ser experimental ou devem ser adotados os valores indicados pelo fabricante dos dispositivos de ancoragem;
- Relaxação inicial da armadura, em função do tempo decorrido entre o alongamento da armadura e a liberação do dispositivo de tração;
- Retração inicial do concreto, considerado o tempo decorrido entre a concretagem do elemento estrutural e a liberação do dispositivo de tração;
- Execução inadequada do processo de protensão também pode contribuir para essas perdas, como por exemplo, falhas na fixação das ancoragens e na distribuição uniforme da força de protensão. Outros fatores como a qualidade do material utilizado na protensão, as condições ambientais e a técnica de protensão adotada também podem influenciar nas perdas iniciais de protensão.

2.4.2 PERDAS IMEDIATAS DA FORÇA DE PROTENSÃO

Segundo Chofle e Bolina (2018), são consideradas perdas imediatas as que acontecem durante a transferência da força de protensão para o concreto.

No caso das perdas imediatas na pré-tração segundo Chofle e Bolina (2018), a transferência da força de protensão para o concreto, através da aderência a força aplicada sofre perda imediata devido ao encurtamento imediato do concreto. A variação da força de protensão, em razão desse encurtamento, deve ser calculada em regime elástico, considerando a deformação da seção homogeneizada. O módulo de elasticidade do concreto a considerar é o respectivo à data de protensão, e corrigido, se houver cura térmica.

Segundo Chofle e Bolina (2018), pode-se considerar para os sistemas com utilização de protensão com pós-tração, as seguintes perdas imediatas no processo de transferência das forças:

- Perdas devido ao atrito entre as armaduras e a bainha ou o concreto durante o alongamento do aço;
- Perdas devido à acomodação da ancoragem (dispositivos de ancoragem com deslizamento da armadura (recuo do cabo);
- Encurtamento imediato do concreto em elementos estruturais com protensão sucessivas de cabos.

2.4.2.1 PERDAS POR ATRITO

Segundo Schmid (1998), nas protensões executadas em elementos estruturais com pós-tração, quando a armadura ativa é tensionada, a mesma sofre um alongamento gradativo, em consequência disso, levando em consideração que a bainha apresenta na sua maioria desenvolvimentos curvos e sinuosidades involuntárias.

Os cabos podem durante a operação de protensão, se deslocarem no interior das bainhas, sofrendo assim a perda por atrito nos pontos de contato, reduzindo a força de protensão (Chofle e Bonilha, 2018).

Em função das forças de inflexão e do coeficiente de atrito " μ ", a perda da força de protensão devida ao atrito pode ser quantificada ao longo do cabo, através da equação indicada na NBR 6118 (ABNT, 2023):

$$Po(x) = Po \cdot e^{-(\mu\alpha - kx)}$$

Equação 1.1

Onde,

P_0 = força de protensão na seção de abscissa $x=0$; no tempo $t = 0$;

$P_0(x)$ = força de protensão na seção de abscissa x , no tempo $t = 0$;

P_i = força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração;

μ = coeficiente de atrito entre o aço e a bainha;

α = somatório dos ângulos de inflexão do cabo, não considerada a inclinação inicial α_0

$k = \mu \gamma$, sendo γ = coeficiente de perdas por metro, provocadas por curvaturas não intencionais. Varia com o diâmetro da bainha.

No caso do coeficiente μ , na falta de dados experimentais para determiná-lo é possível estimar com os seguintes valores:

$\mu = 0,50$ – entre cabo e concreto (sem bainha);

$\mu = 0,30$ – entre barras ou fios com mossas ou saliências e bainha metálica;

$\mu = 0,20$ – entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica;

$\mu = 0,10$ – entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica lubrificada;

$\mu = 0,05$ – entre cordoalha e bainha de polipropileno engraxada;

K = coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo.

- No caso do coeficiente K , também caso haja a falta de dados experimentais é possível determiná-lo como sendo $0,01 \mu$. (Cholfe e Bonilha, 2018)

Tem-se observado que os alongamentos medidos em obra são quase sempre menores que os teóricos pois o coeficiente " μ " é subestimado e principalmente o coeficiente " $k = \mu \alpha$," das curvaturas não intencionais. O fato merece atenção a fim de que a estrutura não fique com falta de protensão. (Schmid, 1998)

Segundo Luiz Cholfe e Luciana Bonilha, a variação da perda entre dois pontos pode ser calculada de modo mais simples, utilizando a equação a seguir:

$$\sum \alpha = \sum_{i=1}^n \frac{(2 \cdot \Delta y_i)}{\ell_i}$$

Equação 1.2

Onde,

n = número de trechos;

ℓ_i = comprimento de cada trecho (projeção);

Δy_i = variação das ordenadas.

2.4.2.2 PERDAS POR ACOMODAÇÃO DAS ANCORAGENS

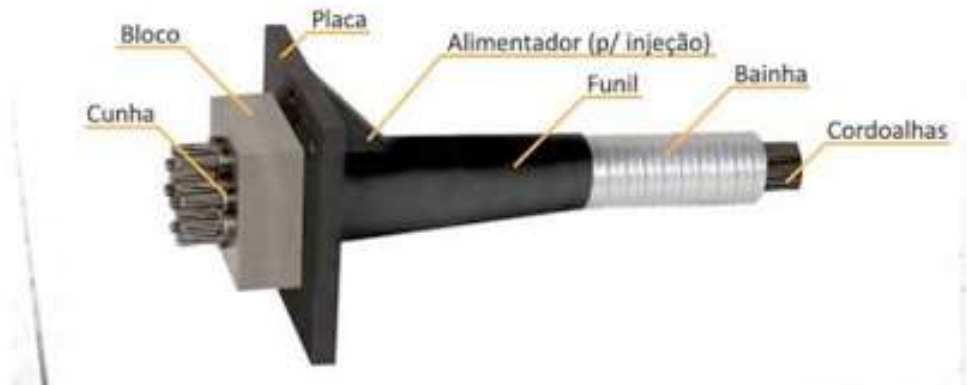
As perdas de protensão por acomodação das ancoragens ocorrem porque a ancoragem inicialmente se deforma quando o cabo de protensão é ancorado e a força de protensão é aplicada. Com o tempo, a ancoragem pode continuar a se deformar sob a ação da força de protensão, o que leva a uma redução da força de protensão na seção de concreto protendido.

No procedimento de pós-tração, a força de protensão exercida pelo macaco é transferida para a seção de concreto por meio das ancoragens. Essas ancoragens podem ser classificadas como ativas ou passivas. Nas ancoragens ativas, a extremidade é empregada para tensionar o cabo, enquanto nas ancoragens passivas, o dispositivo tensor não é utilizado. Quando se utiliza fios ou cordoalhas, a ancoragem é realizada por meio de cunhas de aço. (Cholfe e Bonilha, 2018)

A acomodação das cunhas nas ancoragens provoca uma perda de 4 a 5 mm no alongamento inicial ao qual se chegou antes da cravação. (Schmid, 1998)

A ancoragem (figura 2.11), é constituída por um conjunto de equipamentos a seguir:

Figura 2.11 - Detalhes de dispositivos de protensão



Fonte: internet (2022)

1. Cunhas (Clavetes): peças de metal tronco-cônicas com dentes que "mordem" o aço de protensão. Podem ser bipartidas ou tripartidas.
2. Bloco: peças de metal externamente cilíndricas, com um furo tronco-cônico que aloja as cunhas. O porta-cunhas transfere a força da cordoalha (ou fio) para a placa de apoio.
3. Placa: placas de metal que recebem as forças do conjunto cunhas/ porta-cunhas e as transferem, de forma distribuída, para a seção de concreto;
4. Alimentador para injeção: o alimentador para injeção é um dispositivo que permite a injeção de material (como grout ou argamassa) para preencher espaços vazios na ancoragem e proporcionar uma conexão segura e durável.
5. Funil: o funil é frequentemente utilizado para direcionar o material de injeção para a área desejada, facilitando o processo de preenchimento.
6. Bainha: a bainha é uma proteção ao redor da cordoalha que a isola do concreto circundante e fornece espaço para a injeção do material de ancoragem. Ela é essencial para proteger a cordoalha contra a corrosão.
7. Cordoalha: é um cabo de aço ou fio de alta resistência usado para aplicar forças de pré-tensão à estrutura de concreto. Ela é passada através da bainha e tensionada antes de ser ancorada no bloco.

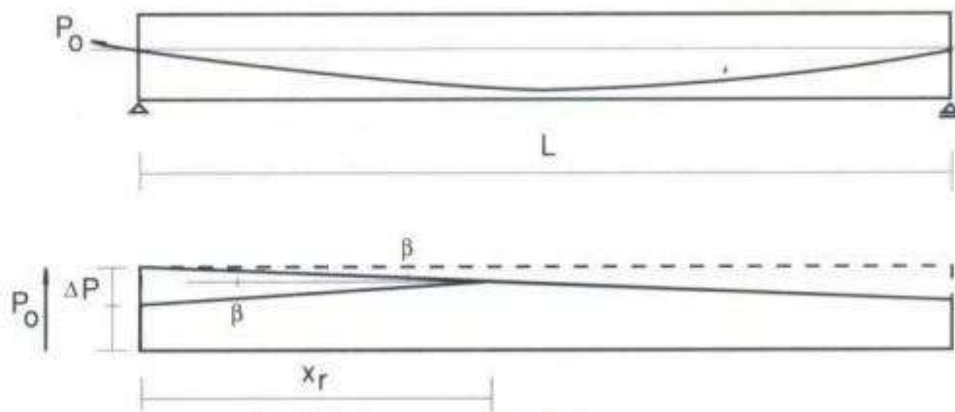
O funcionamento das ancoragens por meio de cunhas exige uma mobilização mecânica simultânea do conjunto, provocando constantemente pequenos deslocamentos da cordoalha ou

do fio. Esses deslocamentos são denominados de acomodação da ancoragem e provocam perdas de protensão. (Cholfe e Bonilha, 2018)

Como a força produzida pelo atrito se manifesta em direção oposta ao movimento do cabo, resultando em uma oposição a esse movimento, o que caracteriza um atrito negativo. (Schmid, 1998)

Com o atrito negativo, a inclinação terá o seu sinal invertido, e com a perda ocasionada na cravação ocorrerá um aumento $\frac{p}{m}$ até que o diagrama crescente encontre em $x = x_r$ o diagrama original decresce (figura 2.12). (Schmid, 1998)

Figura 2.12 - Diagrama perdas por acomodação



Fonte: Rudloff Industrial Ltda, (1998)

O valor de x_r depende α , μ e κ , mas em cabos curvos seu valor costuma variar entre 12 e 16 m, por isso usa-se 16,0 m como referência para o cálculo de Δp . (Schmid, 1998).

Sejam:

λ_r = recuo devido à cravação das colunas (cm);

A_p = área da seção transversal do cabo (cm²);

Δp = perda da força de protensão por unidade de comprimento nos 16,0 m iniciais (kN/cm);

ΔP = perda da força de protensão junto à ancoragem, devida à cravação das cunhas (kN);

E_p = módulo de elasticidade do aço (kN/cm²);

$f = p \cdot x_r$ = perda da força de protensão no comprimento $x = x_r$.

Pela Lei de Hooke tem-se:

$$\lambda_r = \frac{f \cdot x_r}{A_p \cdot E_p} = \frac{\Delta p \cdot x_r^2}{A_p \cdot E_p} \quad \text{Equação 1.3}$$

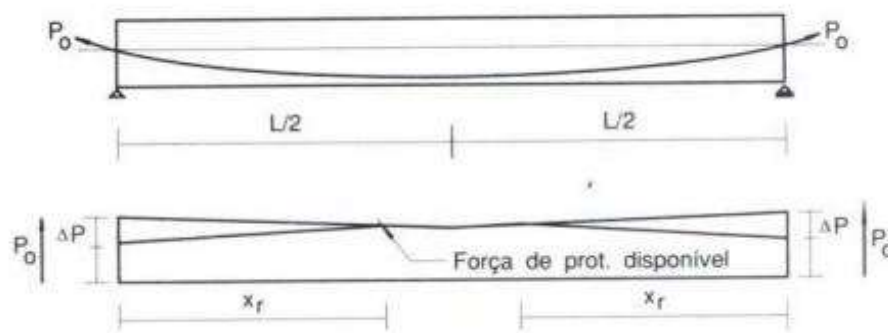
logo tem-se,

$$x_r = \sqrt{\frac{\lambda_r \cdot A_p \cdot E_p}{\Delta p}} \quad \text{Equação 1.4}$$

Em decorrência, a perda de protensão junto as ancoragens pode ser calcula pela seguinte equação:

$$\Delta P = 2 \cdot \Delta p \cdot x_r \text{ (kN)} \quad \text{Equação 1.5}$$

Figura 2.13 - Perdas por acomodação da ancoragem com força de protensão



Fonte: Rudloff Industrial Ltda, (1998)

Vale frisar que as perdas por acomodação das ancoragens são difíceis de calcular com precisão, pois dependem de vários fatores, incluindo o tipo de ancoragem, o material da ancoragem, condições de instalação e a magnitude da força de protensão.

2.4.2.3 PERDAS POR ENCURTAMENTO IMEDIATO DO CONCRETO

As perdas de protensão por encurtamento imediato do concreto ocorrem devido à deformação elástica do concreto durante o processo de protensão. O encurtamento do concreto resultante da protensão leva a um aumento da tensão nos cabos e uma redução na força de protensão aplicada.

Nas estruturas que utilizaram o método de protensão com pós-tração, posto que os cabos são protendidos, os macacos se apoiam diretamente sobre o concreto e, portanto, o encurtamento imediato se realiza anteriormente a ancoragem do cabo, com ausência de perdas de protensão. (Cholfé e Bonilha, 2018)

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), pode se calcular a perda média de protensão para todos os cabos, utilizando a seguinte expressão:

$$\Delta\sigma_p = \frac{(n-1)}{(2 \cdot n)} \cdot \alpha_p \cdot (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) \quad \text{Equação 1.6}$$

Onde,

n = número de cabos protendidos sucessivamente;

α = E_p/E_{ci} (t); relação entre os módulos de deformação do aço e do concreto na idade de protensão, onde $E_p = 200$ Gpa;

E_{ci} = módulo de elasticidade do concreto para a idade de 28 dias;

$E_{ci} = \alpha E \cdot 5.600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$, em Mpa (concretos de classes C20 à C50);

$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$, em Mpa (concretos de classes C55 à C90).

O módulo de elasticidade, para idades de 7 à 29 dias, a dado por:

$E_{ci}(t) = [f_{ckj} / f_{ck}]^{0,5} \cdot E_{ci}$, em Mpa (para concretos de classes C20 à C45);

$E_{ci}(t) = [f_{ckj} / f_{ck}]^{0,3} \cdot E_{ci}$, em Mpa (para concretos de classes C50 à C90).

Onde,

$E_{ci}(t)$ = estimativa do módulo de elasticidade do concreto na idade entre 7 e 28 dias;

f_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade em Mpa;

σ_{cp} = tensão no concreto devido a protensão simultânea dos cabos;

σ_{cg} = tensão no concreto devido as ações de cargas permanentes.

2.4.2.4 VERIFICAÇÃO – ALONGAMENTO TEÓRICO DOS CABOS

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2023) Para o controle da protensão, deve ser preparada para cada cabo uma planilha de protensão, onde devem constar alguns dados importantes para execução da mesma como: elemento da estrutura a ser protendido (vão, viga, laje etc.); o número do cabo que irá ser protendido, além tipo do cabo a ser utilizado, o tipo do equipamento de protensão, a pressão manométrica teórica definida em projeto a ser aplicada, o alongamento teórico total previsto, e o alongamento corrigido em função dos valores reais da seção transversal e do módulo de elasticidade além disso deve constar as pressões manométricas parciais, e as pressões manométricas correspondentes às etapas de carregamento previstas.

As perdas de protensão devido ao alongamento teórico dos cabos ocorrem devido à deformação elástica dos cabos de protensão durante a execução e a liberação subsequente da tensão.

Nos casos de protensão por pré-tração são usados fios ou cordoalhas ancorados em uma cabeceira, e na ponta oposta esses fios ou cordoalhas são tensionados por aparelhos tensores. O alongamento obtido no processo pode ser verificado no ato da protensão, com a utilização de réguas ou trenas (Veríssimo e Lenz César Jr, 1998).

Segunda a Norma NBR 14931 (ABNT, 2023) na falta de indicação específica no projeto, os valores de alongamento que se afastem de $\pm 10\%$ dos valores previstos devem ser comunicados ao projetista estrutural para interpretação e consequentemente liberação ou eventual tomada de

medidas de correção. Os cabos cujos alongamentos estejam dentro do intervalo de $\pm 10\%$ podem ser liberados.

O alongamento teórico é determinado levando em conta o comprimento alongável do cabo e sua rigidez. Todas as imprecisões decorrentes da geometria do cabo (desvios angulares, ondulações), coeficientes de atritos “ μ ”, posicionamento das ancoragens precisam ser considerados para que se tenha um comprimento teórico que represente fielmente a realidade física do projeto. (Protende, 2013)

As perdas de protensão devido ao alongamento teórico dos cabos ocorrem devido à deformação elástica dos mesmos sob a ação da força de protensão. (Schmid, 1998). O cálculo do alongamento teórico do cabo é feito a partir da Lei de Hooke, podendo-se empregar a expressão:

$$\lambda_p = \sigma_p^n \cdot \frac{L}{E_p} \quad \text{Equação 1.7}$$

Onde,

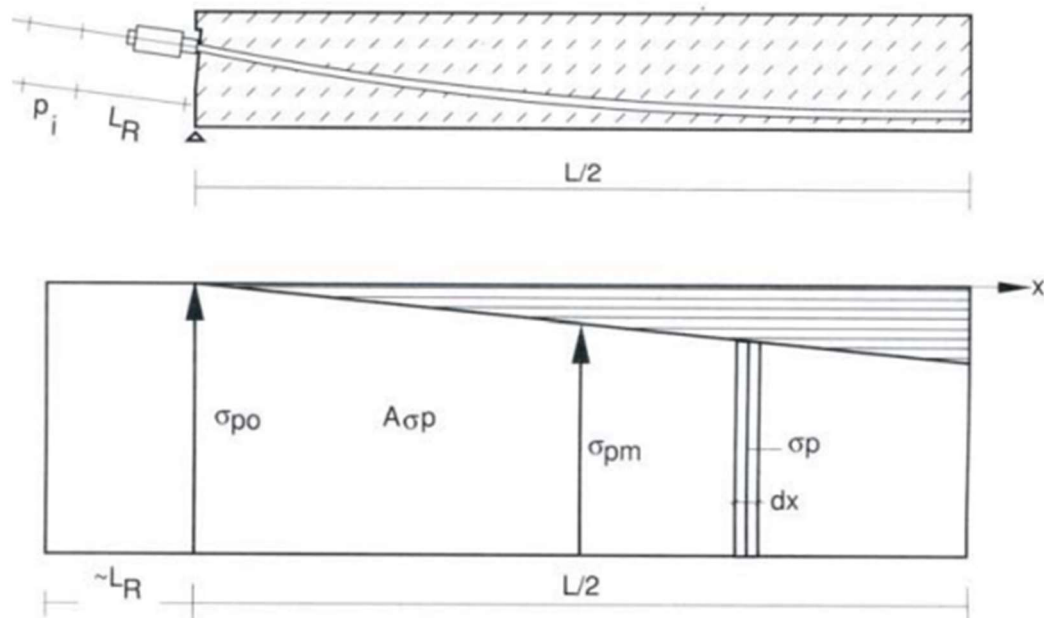
σ_p^n = tensão média na armadura ativa, já consideradas as perdas imediatas;

L = comprimento do cabo correspondente ao alongamento que está sendo calculado, incluindo o trecho reto;

L_r = fora do concreto;

E_p = módulo do aço de protensão.

Figura 2.14 - Cálculo aproximado do alongamento



Fonte: Rudloff Industrial Ltda, 1998

Segundo Schmid (1998) no local de construção, a progressão do deslocamento de um ponto de referência "R" na armadura será monitorada. A força de protensão gerada pelo macaco será determinada pelos aumentos de pressão registrados no manômetro conectado a ele. Tipicamente, a disposição da armadura ativa demonstra uma simetria em relação à estrutura de concreto que será tensionada. Quando a protensão é aplicada em ambas as extremidades do cabo, o alongamento resultante será a combinação das deformações acumuladas a partir do ponto central de reação.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

O estudo das perdas de protensão é de grande importância, para o projeto bem como para a parte de execução. Com objetivo de entender o funcionamento deste processo, inicialmente, são feitas aplicações numéricas em exercícios para estimar tal perda teórica, e em seguida, é feito o acompanhamento das fichas de protensão sobre a ponte do Rio Claro, fazendo então a comparação entre o valor teórico calculado em projeto e o valor real corrigido *in loco*. É feita então verificação conforme a norma competente para execução de protensão.

3.1 CÁLCULO DE PERDAS IMEDIATAS

Visto que este estudo se trata de um comparativo de cálculo, foi adotado para análise exemplos de exercícios de livros, artigos e fichas técnicas para obter-se uma analogia entre os alongamentos teóricos de projeto, os alongamentos alcançados calculados com dados *in loco* e informações baseadas no estudo bibliográfico.

Adota-se neste trabalho um exemplo prático de aplicação numérica para métodos de cálculo de perda imediata e verificação de alongamento teórico. Antes de analisar os alongamentos teóricos, obtidos nas protensões realizadas na ponte, serão feitas aplicações numéricas para explicitar o processo de cálculo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PROTENSÃO EXECUTADA *IN LOCO*

Para análise neste trabalho foram adotados os dados obtidos nas fichas de protensão e dados das pranchas de um projeto já executado, da ponte sobre o Rio Claro no município de Jataí Goiás (Figura 3.1), onde pode-se encontrar algumas especificações quanto aos tipos de materiais utilizados para tais protensões, bem como dados auxiliares para sua execução.

Figura 3.1 - Ponte sobre o Rio Claro



Fonte: Autoria própria (2022)

O método construtivo empregado na construção da ponte foi o balanço sucessivo, utilizando duas guias, uma a jusante e outra a montante do rio. Essa abordagem permitiu a execução sequencial das aduelas de ambos os lados da ponte, culminando no fechamento do vão, uma aduela de cada vez. Quanto à protensão, optou-se pelo método de pós-tração com aderência posterior de nata de cimento. A responsabilidade pela execução das protensões recaiu sobre a empresa Protende, pioneira ao introduzir a tecnologia de estaiamento de pontes no mercado nacional. (Protende, 2020)

3.2.1 CORDOALHA DE AÇO E CONCRETO ESTRUTURAL

Segundo NBR 7483 (ABNT, 2023), as cordoalhas podem ser classificadas quanto ao número de fios (cordoalha de sete fios e cordoalhas de três fios) e quanto a resistência a tração nas categorias CP-190 e CP-210 (190 e 210 correspondem ao limite mínimo a resistência à tração na unidade quilograma força por milímetro quadrado). Para os efeitos desta Norma, considera-se $1 \text{ kgf/mm}^2 = 10 \text{ MPa}$.

Foi utilizado para execução da concretagem na ponte de estudo cordoalhas de sete fios, com categoria de resistência a tração CP-190 de diâmetro 15,2 mm.

Para concretagem da superestrutura utilizou-se concreto de $f_{ck} = 40$ Mpa. Depois da concretagem da aduela, a protensão só poderia ser executada após o concreto alcançar a resistência de projeto definida.

3.2.2 BAINHAS

Segundo as diretrizes da NBR 14931 (ABNT, 2023), na escolha da bainha devem ser levados em consideração os processos de montagem que são utilizados para a armadura de protensão, assim como as condições ambientais a que estão submetidas as obras. A bainha deve garantir, temporária ou permanentemente, a movimentação do cabo no seu interior.”

Além disto as bainhas devem ter diâmetro interno medindo no mínimo 10 mm (admitindo-se 6 mm para bainhas chatas) a mais do que o diâmetro do respectivo cabo, e área interna de sua seção transversal igual a no mínimo 2,5 vezes a área da seção transversal dos aços de protensão.

As bainhas devem ser suficientemente resistentes para suportar os pesos dos respectivos cabos, e garantir, sua fixação, posicionamento e as emendas entre bainhas. A ligação das bainhas com as ancoragens deve ser assegurada por meio de luvas externas, feitas com o mesmo material da bainha, e diâmetro ligeiramente maior, com emprego adicional de material de vedação tipo termorretrátil, massa epóxica, fita adesiva ou solda.

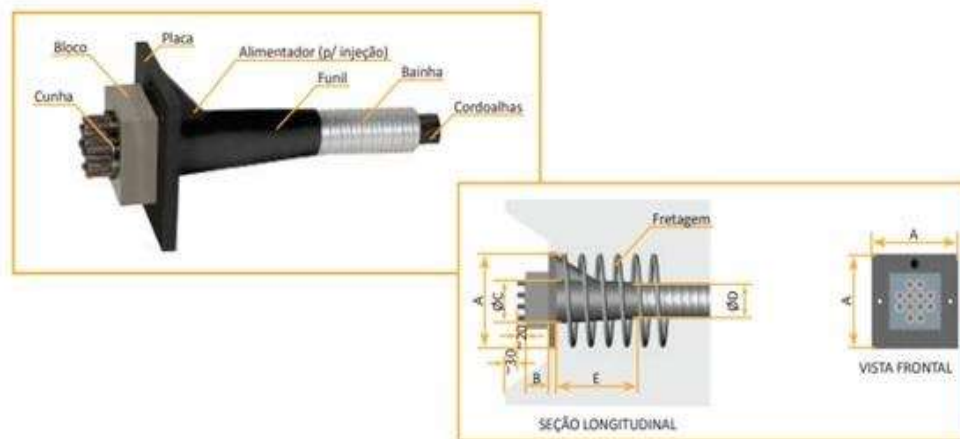
3.2.3 ANCORAGEM ATIVA TIPO “E”

De acordo com a NBR 14931 (ABNT, 2023) as ancoragens são dispositivo capazes de manter o cabo em estado de tensão, transmitindo força de protensão à estrutura.

As ancoragens são divididas em quatro tipos: E, B, EL e AF, são elas que promove, o estado de tensão no cabo, através do macaco de protensão (figura 3.3) (Schmid, 1998).

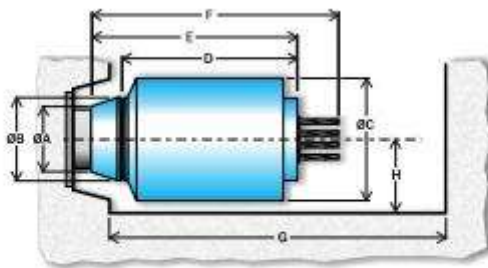
Neste estudo de caso é utilizada a ancoragem do tipo Ruodloff tipo E (figura 3.2). Tal é composta por um bloco de ancoragem com furos troncos cônicos, cunhas tripartidas e placa funil, repartidora de esforços sobre o concreto. A placa funil é o único componente da ancoragem que é posicionado na estrutura antes da concretagem. (Schmid, 1998)

Figura 3.2- Acoragem Rudloff tipo E



Fonte: Rudloff Industrial Ltda, (1998)

Figura 3.3 - Macaco de protensão



Fonte: Protende, (2002)

3.2.4 INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO EM PROTENSÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR

Segundo as diretrizes da NBR 14931 (ABNT, 2023) Os objetivos das injeções com calda de cimento é garantir a aderência mecânica entre as armaduras de protensão e o concreto em todo o comprimento do cabo, conforme estabelecido no cálculo estrutural. Além disso, busca-se assegurar a proteção contra a corrosão, prevenindo a infiltração de agentes corrosivos externos até os aços, e estabelecer um ambiente passivo livre de elementos agressivos. Recomenda-se realizar a injeção logo após a protensão dos cabos, idealmente dentro de um prazo máximo de 15 dias. A escolha do método de injeção deve garantir o preenchimento completo das bainhas com a calda de cimento.

Para que a injeção da nata de cimento (figura 3.4) seja conforme, é necessário seguir alguns parâmetros como uma fluidez adequada (figura 3.5) durante todo o processo, ausência de

agentes agressivos, boa estabilidade, baixa retração, boa resistência mecânica e pouca absorção capilar. Levando em consideração também que alguns parâmetros influenciam na qualidade desta nata, os quais pode-se citar a natureza, a idade e a temperatura (Protende, 2020).

Em todo processo de injeção da nata de cimento na ponte sobre o Rio Claro foi utilizado barras de gelo para que a nata conseguisse se manter em temperatura adequada até que fosse finalizada a injeção (figura 3.6).

Após a injeção, as peças não devem ser submetidas a esforços ou vibrações que possam vir a afetar a integridade da calda. Sempre que não se comprovar por meio de ensaios a garantia desta integridade, deve ser exigida uma resistência mínima da calda de 10 MPa, determinada conforme a NBR 7684, por ocasião da aplicação desses esforços ou vibrações (NBR 14931, 2023).

Figura 3.4 - Processo de injeção de nata de cimento pista esquerda



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 3.5- Fluidez nata de cimento



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 3.6 - Finalização de injeção de nata de cimento



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.5 DADOS TÉCNICOS PARA FICHA DE EXECUÇÃO DA PROTENSÃO

Segundo as diretrizes da NBR 14931 (ABNT 2023), as operações de protensão devem obedecer ao plano de protensão fornecido pelo projetista, o qual deve conter alguns dados como a designação do aço conforme ABNT NBR 7482 e ABNT NBR 7483, o módulo de elasticidade e seção transversal do aço considerado em projeto, o valor da acomodação do sistema da ancoragem, o coeficiente do atrito cabo-bainha, o coeficiente de perdas devido às ondulações parasitas, a resistência mínima do concreto, necessária para o início das operações de protensão, as fases de protensão (em relação à força total), a sequência de protensão dos cabos a serem protendidos em cada fase, o comprimento teórico de cada cabo adotado no cálculo dos alongamentos, deve conter também a força de protensão a ser aplicada em cada cabo e seu respectivo alongamento teórico.

Ainda para o controle da protensão, deve ser preparada para cada cabo uma planilha de protensão, onde devem constar o elemento da estrutura (vão, viga, laje etc.), o número do cabo, o tipo do cabo, o tipo do equipamento de protensão, a pressão manométrica teórica a aplicar, o alongamento teórico total previsto, corrigido em função dos valores reais da seção transversal e do módulo de elasticidade e as pressões manométricas parciais, correspondentes às etapas de carregamento previstas.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Para exemplificar o processo de verificação será usada a aplicação do cálculo de alongamento teórico, do livro Concreto Protendido Teoria e prática de Luiz Cholfé e Luciana Bonilha, onde em casos de cabos com traçado parabólico, usados em vigas e lajes protendidas, a variação entre dois pontos pode ser calculada de modo mais simples.

Tendo como base o processo simplificado seguiremos com a aplicação numérica:

Exemplo 1 – Para a viga isostática a seguir, determinar as perdas por atrito e o alongamento teórico do cabo C4 que possui uma ancoragem ativa e outra passiva indicadas na figura, utilizando o processo geral e o processo aproximado de determinação dos desvios angulares.

Dados complementares: $E_p = 200 \text{ Gpa}$, $\mu = 0,20$, para o Aço CP190RB, considerar, $k = 0,01$. μ , $f_{ptk} = 1.900 \text{ Mpa}$, $A_p = 12 \text{ } \varnothing 12,7 \text{ mm}$ com $A_p(0) = 1.014 \text{ cm}^2/\text{cordoalha}$, considerar sobra de 30 cm na ancoragem A.

Onde,

E_p = Modulo de elasticidade;

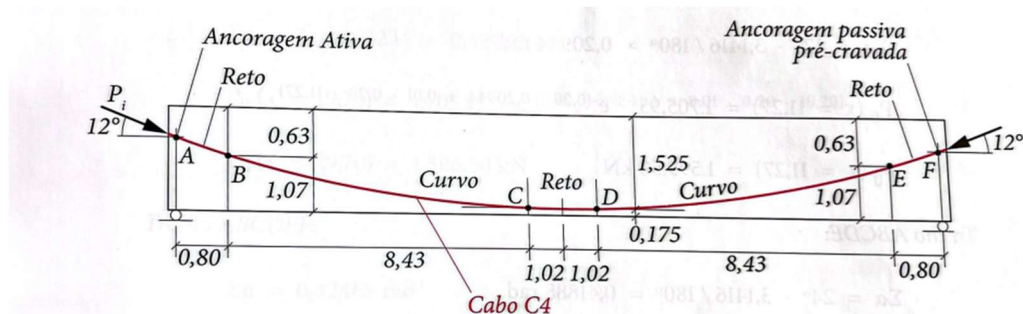
μ = coeficiente de atrito entre o cabo e a bainha;

k = coeficiente de perda por metro;

f_{ptk} = valor característico da resistência a tração;

A_p = Área do fio.

Figura 4.1- Elevação do traçado geométrico do cabo C4



Fonte: Cholfé e Bonilha (2018)

1. Determinação da tensão limite (σ_{pi}) e da força de protensão (P_i):

$$\sigma_{pi} = 0,74 \cdot f_{ptk} = 0,74 \cdot 1900 = 1,406 \text{ Mpa} \quad \text{Equação 1.8}$$

$$P_i = 12 \cdot 1,014 \cdot 10^{-4} \cdot 1,406 \cdot 10^3 = 1,7081 \quad \text{Equação 1.9}$$

Sendo,

σ_{pi} = valor limite da tensão de protensão;

f_{ptk} = valor característico da resistência a tração.

2. Determinação da força $P_0(x)$:

$$\Delta P(x) = \Delta_0(x) = P_i - P_i \cdot e^{-(\mu \cdot \Sigma \alpha + \kappa \cdot x)} \quad \text{Equação 1.10}$$

$$P_i - \Delta P_0(x) = P_i \cdot e^{-(\mu \cdot \Sigma \alpha + \kappa \cdot x)} \quad \text{Equação 1.11}$$

onde,

P_i = força aplicada pelo aparelho tensor na posição $x = 0$;

$\Sigma \alpha$ = soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa x , em radianos;

μ = coeficiente de atrito entre o cabo e a bainha;

κ = coeficiente de perda por metro;

x = abscissa do ponto onde se calcula ΔP .

No processo simplificado a variação angular entre dois pontos pode ser calculada de modo simplificado, conforme equação a seguir:

$$\Delta P(x) = \Delta_0(x) = P_i - P_i \cdot e^{-(\mu \cdot \Sigma \alpha + \kappa \cdot x)} \quad \text{Equação 1.10}$$

A Seguir podemos verificar as tabelas com os resultados obtidos no processo geral e no processo simplificado para determinação de $P_0(x)$:

TABELA 1 – PROCESSO GERAL

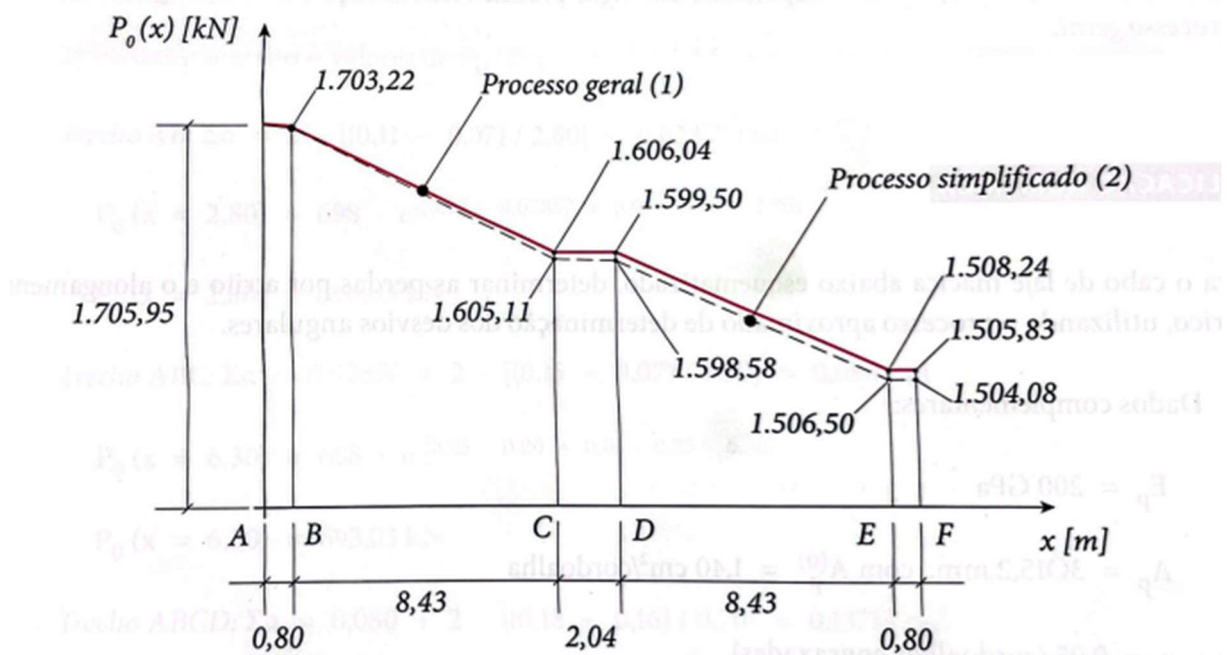
TRECHO	TIPO	GRAUS	RAD	X (m)	Pi (KN)	μ	K	P ₀ (KN)
AB	RETO	0	0	0,80	1,71082	0,2	0,002	1,7081
ABC	CURVO	12	0,20944	9,23	1,71082	0,2	0,002	1,6106
ABCD	RETO	12	0,20944	11,27	1,71082	0,2	0,002	1,6041
ABCDE	CURVO	24	0,41888	19,70	1,71082	0,2	0,002	1,5126
ABCDEF	RETO	24	0,41888	20,50	1,71082	0,2	0,002	1,5101

TABELA 2 – PROCESSO SIMPLIFICADO

TRECHO	TIPO	RAD	X (m)	Pi (KN)	μ	K	P ₀ (KN)
AB	RETO	0	0,80	1,71082	0,2	0,002	1,7081
ABC	CURVO	0,21234	9,23	1,71082	0,2	0,002	1,6097
ABCD	RETO	0,21234	11,27	1,71082	0,2	0,002	1,6031
ABCDE	CURVO	0,424674	19,70	1,71082	0,2	0,002	1,5108
ABCDEF	RETO	0,424674	20,50	1,71082	0,2	0,002	1,5084

3. Diagrama de forças $P_0(x) \cdot (x)$

Figura 4.2 - Diagrama de forças $P_0(x) \cdot (x)$: processo geral e simplificado.



Fonte: Cholfe e Bonilha (2018)

4. Alongamento teórico do cabo:

$$\Delta \ell = (1 / (E_p \cdot A_p)) \cdot (P_0(x), \text{média} \cdot \ell_i \quad \text{Equação 1.11}$$

Onde,

$E_p \cdot A_p$ = rigidez do cabo de proteção;

ℓ_i = comprimento do trecho.

TABELA 3 – ALONGAMENTO TEÓRICO DOS CABOS

TRECHOS					
	AB	BC	CD	DE	EF
P ₀ (X), média P.G	1,7070	1,6594	1,6074	1,5583	1,5113
P ₀ (X), média P.S	1,7070	1,6589	1,6064	1,557	1,5096
Li (m)	1,1	8,43	2,04	8,43	0,8
$\Delta \ell_i$, P.G	7,72	57,48	13,47	53,98	4,97
$\Delta \ell_i$, P.S	7,72	57,46	13,47	53,98	4,96

O alongamento teórico é determinado a partir do diagrama de P₀ (x) (força de protensão, descontadas as perdas por atrito), levando em conta o comprimento alongável do cabo e sua rigidez. Todas as imprecisões decorrentes da geometria do cabo, coeficiente de atrito μ e posicionamento das ancoragens precisam ser cuidadosamente avaliados para que se tenha um comprimento teórico representativo da realidade física do projeto.

4.2 ANÁLISE DOS ALONGAMENTOS TEÓRICOS DO ESTUDO DE CASO

Visto sobre os processos utilizados, segue-se uma tabela com resumo dos dados retirados das fichas de protensão onde é possível observar o cabo a qual foi aplicada a força de protensão até que se atingisse o valor de 361,00 tf. Pode-se visualizar também os alongamentos teóricos adotados em projeto, os alongamentos corrigidos in loco onde se faz a correção do alongamento teórico, para se fazer essa correção é necessário coletar dados das cordoalhas que foram compradas para a execução da protensão, em sua ficha técnica se encontra seu módulo de elasticidade real testado em laboratório e também sua área da seção transversal da cordoalha, pois há alterações desses valores por cordoalha, o cálculo é feito da seguinte forma:

$$\Delta \ell(\text{corrigido}) = \frac{E_p \cdot A_p}{E_p(\text{fábrica})} \cdot \Delta \ell \quad \text{Equação 1.12}$$

Onde,

E_p = Modulo de elasticidade de projeto;

A_p = área da seção transversal da cordoalha;

$E_p(\text{fábrica})$ = Modulo de elasticidade de fábrica da cordoalha;

$A_p(\text{fábrica})$ = área da seção transversal da cordoalha de fábrica;

$\Delta \ell$ = alongamento teórico de projeto.

Conforme citado no capítulo dois deste trabalho os resultados das protensão são satisfatório quando desvio percentual se mantem em $\pm 10\%$. Quando não atingido há então a necessidade de se rever com o projetista como será dado segmento aos processos de protensão. Pode-se observar na tabela abaixo que o cabo quatorze da pista direita não atinge um resultado satisfatório, onde então foi decido pelo projetista a realização de uma protensão de reforço na pista.

TABELA 4 – DADOS PROTENSÕES MAIO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
14	206,00	199,10	152,50	-23,40%
14	206,00	199,10	155,10	-22,10%
15	206,00	200,60	201,40	0,40%
15	206,00	200,60	201,80	0,60%
16	258,00	239,60	255,50	6,60%
16	258,00	239,60	247,90	3,50%
17	258,00	251,30	247,60	-1,50%
17	258,00	251,30	247,10	-1,70%
18	303,00	294,2	276,90	-5,90%
18	303,00	288,00	282,10	-2,00%
19	303,00	291,80	291,50	-0,10%
19	303,00	293,00	277,30	-5,40%

Os resultados das protensão do cabo 14 não foram satisfatórios pois não permaneceram no desvio padrão exigido pela norma de $\pm 10\%$. Sendo assim necessária reprotensão deste cabo. Segue abaixo tabela com resultados obtidos das reprotensões.

TABELA 5 – DADOS REPROTENSÃO MAIO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
14	206,00	199,10	190,50	-4,30%
14	206,00	199,10	195,10	-2,00%

Com a reprotensão foi atingido resultado satisfatório na margem de $\pm 10\%$ de desvio percentual, sendo assim o cabo foi liberado.

Todas as protensões dos meses de dezembro de 2021 a julho de 2022 podem ser visualizadas no apêndice A – Tabelas dados de protensão.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram analisadas as aplicações e técnicas de cálculo utilizadas para estimar as perdas imediatas de protensão. Tais análises foram aplicadas para se comparar os alongamentos teóricos obtidas no ato da protensão, com os alongamentos previstos no projeto.

Com tal, buscou-se ampliar o conhecimento sobre protensão, abrangendo seus cálculos, análises das perdas de protensão e técnicas de execução, destacando a importância desse processo para a construção de grandes vãos. Bem como foi enfatizada a necessidade de prever as perdas de protensão, a fim de que o processo seja monitorado e planejado de forma adequada, evitando grandes discrepâncias em relação ao projeto original. E caso os desvios percentuais não foram de acordo com a norma competente é necessária a análise do projetista para tomada de decisão em relação a liberação da protensão executada, afim de garantir a segurança da estrutura em questão. Conforme exemplo verificado neste estudo com o cabo 14 onde foi necessária sua reprotensão para liberação da protensão em questão, pois seu desvio percentual ficou fora do percentual de desvio padrão aceitável, foi tomada a decisão da reprotensão onde o desvio obtido foi aceitável, sendo assim possível a liberação d

Além das análises e acompanhamentos, buscou-se ainda com tal estudo expandir o conhecimento sobre protensão no ambiente acadêmico da engenharia, visto que é um tema pouco explorado em cursos de graduação em geral no Brasil. Considerando que esse processo já está consolidado na construção de grandes estruturas, compreender o assunto torna-se de extrema relevância.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2023 (in Portuguese).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7197: Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14931: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos. Rio de Janeiro, 2023.

AWA comercial. *In: Ligando o Aço ao Futuro*. Brasil, 2022. Disponível em: <https://sites.iguanait.com.br/awa/index.php/cordoalha-de-aco-para-protensao/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru, 2019. 89 slides, color. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2022.

BORGES, Gabrielle Teixeira; COSTA, Matheus Rabelo; LEITE, Vitoria Souza; CORREA, Willian: ANÁLISE ENTRE ESCORAMENTO METÁLICO E ESCORAMENTO EM MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Anais do 1º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma. 2019; 675-693

CONCRETO protendido: descubra as diferentes aplicações na construção. descubra as diferentes aplicações na construção. 2018. Senior Mega. Disponível em: <https://www.mega.com.br/blog/concreto-protendido-descubra-as-diferentes-aplicacoes-na-construcao>. Acesso em: 14 abr. 2022.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto Protendido: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 346 p.

DEBS, TAKEYA, Mounir Khalil El, Toshiaki. INTRODUÇÃO ÀS PONTES DE CONCRETO: Texto Provisório de Apoio à Disciplina SET - 412. **ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**, São Carlos, p. 142-172, 1 jan. 2007.

DNIT (Brasil). DNIT. 2003. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, v. 3, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de->

manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.

DUARTE, Evandro Porto. CONCRETO PROTENDIDO: APLICANDO A PROTENSÃO EM PONTES, PISOS, RESERVATÓRIOS E EDIFICAÇÕES. **Concreto e construções**, São Paulo, p. 18-25, 1 jun. 2015.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa. 3 ed. totalmente rev. e ampl. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

HANAI, J.B. Fundamentos do concreto protendido. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, E-Book, 2005. Disponível em (12/04/21):
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2255776/mod_resource/content/1/Fundamentos%20do%20Concreto%20Protendido%20-%20J%20B%20Hanai.pdf

MOTA, Joaquim Eduardo. Introdução ao concreto protendido: notas de aula. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

PACHECO, A. L. L.; RIBEIRO, B. R. DOS S. Estudo comparativo entre laje maciça simples de concreto armado e concreto protendido não aderente: uma abordagem bibliográfica. Maceió - AL: Centro Universitário CESMAC, 2018

PERLINGEIRO, Mayra. MODELO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE PONTES SEGMENTADAS DE CONCRETO COM PROTENSÃO EXTERNA. In: PERLINGEIRO, Mayra. **MODELO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE PONTES SEGMENTADAS DE CONCRETO COM PROTENSÃO EXTERNA**. Orientador: Ronaldo Carvalho Battista. 2006. Tese (DOUTORADO EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO, 2006. p. 184. Disponível em:
https://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/PERLINGEIRO_MSPL_06_t_D_est.pdf. Acesso em: 1 jun. 2022.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto: e construções**, São Paulo, v. 53, p. 14-19, Jan., Fev., Mar., 2009.

PFEIL, Walter. **Concreto protendido**. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1984.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos de Concreto e Projeto de Edifícios**. Universidade de São Paulo – Escola de engenharia de São Carlos, 2004.

PROTENDE (Brasil). PROTENDE ABS: UM POUCO MAIS SOBRE A PROTENDE ABS. *In: PROTENDE: UM POUCO MAIS SOBRE A PROTENDE ABS.* [S. l.], 2020. Disponível em: <https://protendeabs.com.br/sobre>. Acesso em: 30 nov. 2022.

RUDLOFF INDUSTRIAL LTDA (Brasil). Profº. Manfred Theodor Schmid. 1998. **PERDAS DA FORÇA DE PROTENSÃO**, Brasil, v. 2, 1998. Disponível em: https://www.rudloff.com.br/downloads/publicacao2_perdas_da_forca_de_protensao.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.

SANTOS, Altair. **Água, cimento Portland e Concreto: porque não se vive sem eles?** ainda não criaram um material que se molda a praticamente qualquer forma e é tão resistente quanto a rocha. Ainda não criaram um material que se molda a praticamente qualquer forma e é tão resistente quanto a rocha. 2019. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/agua-cimento-portland-e-concreto-por-que-nao-se-vive-sem-eles>. Acesso em: 14 abr. 2022.

SCHMID, Manfred Theodor. A protensão parcial do concreto. 5. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002. v. 178.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **PONTES BRASILEIRAS: VIADUTOS E PASSARELAS NOTÁVEIS**. 2ª. ed. São Paulo: Câmara Brasileira do livro, 2012. 551 p.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; JR, Kléos M Lenz César. Concreto Protendido: Fundamentos básicos. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. 78 p. v. 1.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INSPEÇÃO, MANUTENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS. Reforço e Recuperação de Pontes e Viadutos. **PONTES E VIADUTOS RODOVIÁRIOS::** Conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural, Pernambuco, 1 jan. 2015. Disponível em: https://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Pontes_Viadutos_Rodoviaros.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS DAS PROTENSÕES

A seguir pode-se visualizar as tabelas com dados retirados das fichas de protensão dos cabos protendidos na ponte sobre o Rio Claro no município de Jataí Goiás dos meses de dezembro de 2021 à julho de 2022.

Tabela 5.A – DADOS PROTENSÕES DEZEMBRO 2021

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
15	203,00	195,50	190,30	-2,70%
15	206,00	195,50	191,40	-2,10%
16	258,00	248,50	238,90	-3,90%
16	258,00	248,50	236,80	-4,70%
17	257,00	257,00	238,10	-7,40%
17	257,00	257,00	240,90	-6,30%
18	303,00	303,00	308,40	1,80%
18	303,00	303,00	312,70	3,20%

TABELA 6.A – DADOS PROTENSÕES JANEIRO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
19	303,00	281,40	291,10	3,40%
19	303,00	281,40	288,40	2,50%
20	378,00	364,00	347,60	-4,50%
20	378,00	364,00	345,40	-5,10%
21	377,00	350,10	366,00	4,50%
21	377,00	366,00	368,40	0,70%
22	428,00	412,10	403,30	-2,10%
22	428,00	412,10	401,30	-2,60%

TABELA 7.A – DADOS PROTENSÕES FEVEREIRO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
23	427,00	411,20	401,30	-2,40%
23	427,00	411,20	389,30	-5,30%
24	535,00	515,20	498,30	-3,30%
24	535,00	515,20	505,00	-2,00%
25	533,00	513,30	484,70	-5,60%
25	533,00	513,30	530,20	3,30%

TABELA 8.A – DADOS PROTENSÕES MARÇO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
7	194,00	180,20	182,40	1,20%
7	194,00	180,20	183,90	2,10%
8	132,00	132,00	129,10	-2,20%
8	132,00	132,00	134,40	1,80%
9	316,00	304,30	305,20	0,30%
9	316,00	304,30	303,80	-0,20%
26	264,00	254,20	236,90	-6,80%
26	264,00	254,20	243,10	-4,40%

TABELA 9.A – DADOS PROTENSÕES ABRIL 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
10	103,00	99,60	106,80	7,20%
10	103,00	99,60	108,30	8,70%
11	103,00	99,60	108,10	8,50%
11	103,00	99,60	107,80	8,20%
12	153,00	147,90	156,80	6,00%
12	153,00	147,90	158,00	6,80%
13	153,00	153,00	145,70	-4,80%
13	153,00	153,00	147,90	-3,30%

TABELA 10.A – DADOS PROTENSÕES JUNHO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
20	378,00	364,00	349,80	-3,90%
20	378,00	364,00	344,00	-5,50%
21	378,00	364,00	332,80	-8,60%
21	378,00	364,00	332,30	-8,70%
22	428,00	412,20	372,40	-9,70%
22	428,00	412,20	395,20	-4,10%
23	428,00	412,20	384,90	-6,60%
23	428,00	412,20	378,30	-8,20%
24	535,00	501,50	507,80	1,30%
24	535,00	504,90	505,10	0,00%
25	535,00	531,80	552,70	3,90%
25	535,00	525,30	519,10	-1,20%

TABELA 11.A – DADOS PROTENSÕES JULHO 2022

CABO	ALONGAMENTO TEÓRICO (mm)	ALONGAMENTO TEÓRICO CORRIGIDO (mm)	ALONGAMENTO TOTAL OBTIDO (mm)	DESVIO PERCENTUAL
7	194,00	194,00	180,10	-7,20%
7	194,00	194,00	182,30	-6,00%
8	132,00	132,00	124,00	-6,10%
8	132,00	132,00	131,70	-0,20%
9	316,00	316,00	320,80	1,50%
9	316,00	316,00	319,00	0,90%
26	264,00	264,00	258,20	-2,20%
26	264,00	264,00	249,30	-5,60%

APÊNDICE B – RESULTADOS

Tabela 5.B – RESULTADOS ALOGAMENTO TÉORICO DOS CABOS DE JANEIRO DE 2022N Á JULHO DE 2022

PM	EP	AP	Δ L CALCULAD O	Δ L PROJET O	DIFERENÇA PERCENTUA L	L	CAB O	DIREÇÃO	MÊS/AN O
3610000	210000000 0	0,2190	0,37	0,30	17%	46,50	19	JUS	JAN
3610000	210000000 0	0,2190	0,37	0,30	17%	46,50	19	MON	
3610000	202500000 0	0,2190	0,48	0,38	22%	59,50	20	JUS	
3610000	202500000 0	0,2190	0,48	0,38	22%	59,50	20	MON	
3610000	210000000 0	0,2190	0,47	0,38	19%	59,50	21	JUS	
3610000	201600000 0	0,2190	0,49	0,38	23%	59,50	21	MON	
3610000	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	24%	70,00	22	JUS	
3610000	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	24%	70,00	22	MON	
3610000	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	25%	70,00	23	JUS	FEV
3610000	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	25%	70,00	23	MON	
3610000	202500000 0	0,2190	0,71	0,54	24%	87,00	24	JUS	
3610000	202500000 0	0,2190	0,71	0,54	24%	87,00	24	MON	
3610000	202500000 0	0,2190	0,71	0,53	25%	87,00	25	JUS	
3610000	202500000 0	0,2190	0,71	0,53	25%	87,00	26	MON	
3610000	210000000 0	0,2190	0,23	0,19	15%	29,00	7	JUS	MARÇ
3610000	210000000 0	0,2190	0,23	0,19	15%	29,00	7	MON	
3610000	196000000 0	0,2190	0,16	0,13	17%	19,00	8	JUS	
3610000	196000000 0	0,2190	0,16	0,13	17%	19,00	8	MON	
3610000	202500000 0	0,2190	0,40	0,32	21%	49,00	9	JUS	
3610000	202500000 0	0,2190	0,40	0,32	21%	49,00	9	MON	

361000 0	202500000 0	0,2190	0,32	0,26	17%	39,00	26	JUS	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,32	0,26	17%	39,00	26	MON	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,12	0,10	13%	14,50	10	JUS	ABR
361000 0	202600000 0	0,2190	0,12	0,10	13%	14,50	10	MON	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,12	0,10	13%	14,50	11	JUS	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,12	0,10	13%	14,50	11	MON	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,18	0,15	15%	22,00	12	JUS	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,18	0,15	15%	22,00	12	MON	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,19	0,15	17%	22,00	13	JUS	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,19	0,15	17%	22,00	13	MON	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,24	0,21	16%	30,00	14	JUS	
361000 0	202600000 0	0,2190	0,24	0,21	16%	30,00	14	MON	
361000 0	201100000 0	0,2190	0,25	0,21	16%	30,00	15	JUS	MAIO
361000 0	201100000 0	0,2190	0,25	0,21	16%	30,00	15	MON	
361000 0	210000000 0	0,2190	0,30	0,26	14%	38,00	16	JUS	
361000 0	210000000 0	0,2190	0,30	0,26	14%	38,00	16	MON	
361000 0	201100000 0	0,2190	0,31	0,26	17%	38,00	17	JUS	
361000 0	201100000 0	0,2190	0,31	0,26	17%	38,00	17	MON	
361000 0	201700000 0	0,2190	0,38	0,30	20%	46,50	18	JUS	
361000 0	205850000 0	0,2190	0,37	0,30	19%	46,50	18	MON	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,38	0,30	20%	46,50	19	JUS	
361000 0	201800000 0	0,2190	0,38	0,30	20%	46,50	19	MON	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,47	0,38	19%	57,50	20	JUS	JUN
361000 0	202500000 0	0,2190	0,47	0,38	19%	57,50	20	MON	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,47	0,38	19%	57,50	21	JUS	

361000 0	202500000 0	0,2190	0,47	0,38	19%	57,50	21	MON	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,57	0,43	25%	70,00	22	JUS	
361000 0	202500000 0	0,2190	0,57	0,43	25%	70,00	22	MON	
361000 0	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	24%	70,00	23	JUS	
361000 0	203700000 0	0,2190	0,57	0,43	24%	70,00	23	MON	
361000 0	206850000 0	0,2190	0,69	0,54	23%	87,00	24	JUS	
361000 0	201000000 0	0,2190	0,71	0,54	25%	87,00	24	MON	
361000 0	196100000 0	0,2190	0,73	0,54	27%	87,00	25	JUS	
361000 0	197150000 0	0,2190	0,73	0,54	26%	87,00	25	MON	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,23	0,19	15%	27,00	7	JUS	JUL
361000 0	196000000 0	0,2190	0,23	0,19	15%	27,00	7	MON	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,14	0,13	8%	17,00	8	JUS	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,14	0,13	8%	17,00	8	MON	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,40	0,32	20%	47,00	9	JUS	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,40	0,32	20%	47,00	9	MON	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,31	0,26	15%	37,00	26	JUS	
361000 0	196000000 0	0,2190	0,31	0,26	15%	37,00	26	MON	