

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CORROSÃO EM ESTACA PROTENDIDA NO PÍER DO PORTO DO AÇU – RJ

Por

LEONARDO FERNANDES BARRETO
VITÓRIA SANTOS GOMES

Campos dos Goytacazes – RJ

Junho/2025

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CORROSÃO EM ESTACA PROTENDIDA NO PÍER DO PORTO DO AÇU – RJ

Por

LEONARDO FERNANDES BARRETO
VITÓRIA SANTOS GOMES

Projeto Final de Curso apresentado em
cumprimento às exigências para a obtenção
do grau no Curso de Graduação em
Engenharia Civil nos Institutos Superiores
de Ensino do CENSA.

Orientador: Diogo Pereira dos Santos Kropf, Dsc.

Campos dos Goytacazes – RJ
Junho/2025

Barreto, Leonardo Fernandes

Corrosão em estruturas de concreto protendido – estudo de caso
/ Leonardo Fernandes Barreto; Vitória Santos Gomes. - Campos dos
Goytacazes (RJ), 2025.

36 f.: il.

Orientador: Dsc. Diogo Pereira dos Santos Kropf
Graduação em (Engenharia Civil) - Institutos Superiores de
Ensino do CENSA, 2025.

1. Corrosão. 2. Protensão. 3. Recuperação. II. Gomes, Vitória
Santos.

CDD 624.183.2

Bibliotecária responsável Glauce Virgínia M. Régis CRB7 - 5799.
Biblioteca Dom Bosco.

CORROSÃO EM ESTACA PROTENDIDA NO PÍER DO PORTO DO AÇU - RJ

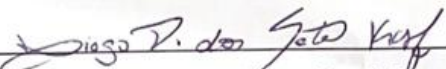
Por

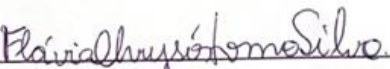
LEONARDO FERNANDES BARRETO
VITÓRIA SANTOS GOMES

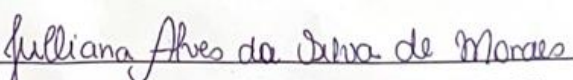
Projeto Final de Curso apresentado em
cumprimento às exigências para a obtenção
do grau no Curso de Graduação em
Engenharia Civil os Institutos Superiores de
Ensino do CENSA.

Aprovado em 25 de junho de 2025

BANCA EXAMINADORA


Diogo Pereira dos Santos Kropf, Dsc. – Isecensa


Flávia Chrysostomo Silva, Msc. – Isecensa


Julliana Alves da Silva Moraes, Esp. – UCAM

DEDICATÓRIA

Eu Leonardo, dedico este trabalho ao estudo e evolução da engenharia e também aos professores, orientadores e amigos que sempre estiveram presentes, incansáveis em nossas dúvidas e angústia durante a execução deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Eu, Vitória, agradeço primeiramente a Deus, por me dar força, sabedoria e resiliência ao longo desta caminhada, iluminando cada passo que trilhei.

À minha filha, que é minha maior motivação, meu amor incondicional e a razão pela qual busco sempre evoluir. Seu sorriso e carinho tornaram cada desafio mais leve.

À minha família, pelo apoio incondicional, pelo amor que me fortaleceram em momentos difíceis. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, oferecendo palavras de incentivo e compartilhando alegrias e desafios. Obrigado por tornarem essa jornada mais especial.

Aos meus professores, que compartilharam conhecimento e orientaram-me com dedicação e sabedoria, contribuindo significativamente para meu aprendizado e crescimento.

À instituição de ensino, pelo espaço de aprendizado e pelas oportunidades oferecidas para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

E, por fim, a mim mesma, por acreditar, persistir e superar cada obstáculo com determinação e coragem.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

NBR – Norma Brasileira;

CP – Concreto protendido;

CA – Concreto armado;

CST – Corrosão sob tensão;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de cordoalha engraxada.....	18
Figura 2: Formação de fissuras com corrosão.	19
Figura 3: Formação de fissuras sem corrosão.	19
Figura 4: Morfologia e processos desencadeantes.	20
Figura 5: Processo de corrosão localizada do aço em presença de cloretos.....	22
Figura 6: Deslocamento da camada de revestimento com cordoalha exposta.	24
Figura 7: Corte em planta da estaca.	25
Figura 8: Mergulhador realizando o processo de limpeza da estrutura.	26
Figura 9: Registro realizado pelo mergulhador na região emersa.....	26
Figura 10: Registro realizado pelo mergulhador-100 cm de profundidade.....	26
Figura 11: Desbaste controlado da região afetada, laterais.	27
Figura 12: Desbaste controlado da região afetada, sulcos.....	27
Figura 13: Armadura ativa após a limpeza.	28
Figura 14: Armadura ativa oxidada.	28
Figura 15: Recomposição da camada de revestimento.	29
Figura 16: Recomposição da camada de revestimento finalizada.....	29
Figura 17: Aplicação do impermeabilizante.....	30
Figura 18: Aplicação do impermeabilizante.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. JUSTIFICATIVA	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 CONCRETO PROTENDIDO	16
3.2 UTILIZAÇÃO DA PROTENSÃO E PATOLOGIAS.....	17
3.3 CORROSÃO NA CORDOALHA E SUA PROTEÇÃO	18
3.4 TIPOS DE CORROSÃO NO CONCRETO	20
3.5 CORROSÃO POR ATAQUE DE ÍONS DE CLORETO.....	21
4. METODOLOGIA.....	22
4.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	23
4.1.1 ESPECIFICAÇÕES DAS ARMADURAS	24
4.2 MÉTODOS DE REPAROS	25
4.3 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6. CONCLUSÃO.....	31
7. REFERÊNCIAS	33

CORROSÃO EM ESTACA PROTENDIDA NO PÍER DO PORTO DO AÇU - RJ

Leonardo Fernandes Barreto, Vitória Santos Gomes, Diogo Pereira dos Santos Kropf

RESUMO

A protensão é uma técnica essencial na engenharia estrutural, garantindo maior resistência e durabilidade das construções, principalmente em ambientes portuários. Este estudo analisa a intervenção na estaca E41-A, localizada no píer do Terminal de Minério no Porto do Açu, destacando a aplicação de técnicas de reabilitação estrutural. O processo começou com a inspeção preliminar e diagnóstico da corrosão, seguido pela remoção mecânica das áreas comprometidas e aplicação de inibidores para minimizar futuros danos. A recomposição estrutural foi realizada com argamassa específica, proporcionando a integridade necessária para a estaca. Para a proteção final, impermeabilizantes foram aplicados, reduzindo os efeitos da ação dos íons de cloreto, presentes no ambiente marítimo. Os resultados demonstraram que, embora a corrosão impacte a aderência entre armadura e concreto, o sistema de protensão garantiu que a perda de resistência mecânica se restringisse à área afetada, sem comprometer a estabilidade geral da estrutura. O estudo reforça a importância da adoção de métodos eficazes de recuperação e proteção para estruturas costeiras, contribuindo para práticas mais avançadas na engenharia portuária e incentivando novas pesquisas para aprimorar a vida útil dessas infraestruturas essenciais.

Palavras-chave: Corrosão; Protensão; Recuperação.

¹Institutos Superiores de Ensino do CENSA - ISECENSA - Laboratório de Química e Biomoléculas – LAQUIBIO - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Laboratório de Entomologia e Fitopatologia - LEF/CCTA - Av. Alberto Lamago, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil.

(*) e-mail: leonardobarreto@isecensa.edu.br

CORROSÃO EM ESTACA PROTENDIDA NO PÍER DO PORTO DO AÇU - RJ

Leonardo Fernandes Barreto, Vitória Santos Gomes, Diogo Pereira dos Santos Kropf

ABSTRACT

Prestressing is an essential technique in structural engineering, ensuring greater strength and durability of constructions, particularly in port environments. This study analyzes the intervention in pile E41-A, located at the pier of the Ore Terminal at the Port of Açú, highlighting the application of structural rehabilitation techniques. The process began with a preliminary inspection and corrosion diagnosis, followed by mechanical removal of compromised areas and application of inhibitors to minimize future damage. Structural recomposition was carried out with a specific mortar, providing the necessary integrity for the pile. For final protection, waterproofing agents were applied to reduce the effects of chloride ions present in the marine environment. The results demonstrated that, although corrosion impacts the bond between reinforcement and concrete, the prestressing system ensured that the loss of mechanical strength was restricted to the affected area, without compromising the overall stability of the structure. The study reinforces the importance of adopting effective recovery and protection methods for coastal structures, contributing to more advanced practices in port engineering and encouraging further research to enhance the lifespan of these essential infrastructures.

Keywords: Corrosion; Prestressing; Recovery.

¹Institutos Superiores de Ensino do CENSA - ISECENSA - Laboratório de Química e Biomoléculas – LAQUIBIO - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Laboratório de Entomologia e Fitopatologia - LEF/CCTA - Av. Alberto Lamago, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil

(*) e-mail: leonardobarreto@isecensa.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A protensão tem se tornado uma prática cada vez mais comum no Brasil, especialmente em projetos de construção que se beneficiam de suas vantagens estruturais. A técnica é conhecida por melhorar a eficiência das lajes e permitir maiores vãos livres, reduzindo a necessidade de apoios intermediários e possibilitando estruturas mais esbeltas e econômicas (Cunha, 2018).

A protensão é uma técnica de engenharia estrutural que revolucionou a construção civil desde sua introdução no Brasil em 1949, quando foi aplicada pela primeira vez na construção de uma ponte no Rio de Janeiro. Desde então, o uso da protensão tem crescido substancialmente, especialmente na concepção e construção de lajes. Esta técnica se destaca por sua capacidade de otimizar o desempenho das estruturas, consequentemente oferecendo controle efetivo das flechas e minimizando a formação de fissuras (Bastos; Paulo, 2019).

Segundo Carvalho (2017), o concreto protendido pode ser classificado de três maneiras: pós-tracionado com aderência; pós-tracionado sem aderência e pré-tracionado, sendo a principal delas baseada no mecanismo de aderência entre o aço protendido e o concreto.

Estruturas protendidas com presença de corrosão na armadura é um problema crítico que compromete a durabilidade e a segurança das edificações. De acordo com Böhni (2005), para que a corrosão da armadura ocorra, é necessário que uma série de condições se combine. Primeiramente, deve haver uma diferença de potencial suficiente entre dois pontos da armadura, o que permite o fluxo de elétrons, ideal para que o processo corrosivo ocorra. No entanto, o concreto deve apresentar umidade, fornecendo o eletrólito necessário para a reação eletroquímica.

Outro fator importante destacado por Böhni (2005), é a presença de oxigênio, que é necessário para a reação catódica da corrosão. Por outro lado, a corrosão só pode se iniciar se a camada passivadora da armadura, que protege o metal contra a corrosão, for rompida devido a fatores externos.

O concreto contém componentes que inibem a corrosão do material metálico e bloqueiam a entrada de contaminantes. Portanto, quanto mais inalterado o concreto permanecer, mais protegida estará a armadura. Em muitos casos, a armadura resiste a agentes corrosivos por longos períodos. No entanto, isso não é uma regra infalível, pois há situações em que a corrosão da armadura ocorre de forma rápida e progressiva (Bruna; Moura; Del Pino, 2024).

De acordo com Kropf (2021), a corrosão das armaduras é um dos principais mecanismos de deterioração que comprometem o desempenho das estruturas de concreto armado, devido à sua frequência e severidade. Esse fenômeno é predominantemente eletroquímico, ocorrendo na presença de água, íons e oxigênio, porém a corrosão pode ser acelerada por diversos fatores intrínsecos, como a espessura do cobrimento, a permeabilidade do concreto, a resistividade elétrica, e o tipo de cimento, areia e brita utilizados.

Entre as diversas falhas no processo construtivo, a relação água/cimento inadequado é um dos principais fatores que contribui para um concreto de baixa qualidade. Conforme destacado por Gjorv (2014), essa proporção afeta diretamente a porosidade e a permeabilidade do concreto. Uma relação água/cimento adequada resulta em um concreto menos poroso e mais resistente à penetração de cloretos, isso contribui para a durabilidade e a integridade das estruturas de concreto, reduzindo o risco de corrosão das armaduras e prolongando a vida útil da construção.

A corrosão é uma das condições mais prejudiciais à segurança das estruturas de concreto armado. Este fenômeno causa a redução da seção transversal das barras de aço, o que compromete a aderência entre o aço e o concreto. Quando isso ocorre, toda a integridade estrutural é afetada. Sob a aplicação de cargas, a corrosão provoca um aumento na abertura de fissuras no concreto, o que leva a uma perda significativa da capacidade de carga da estrutura (Rodriguez, Ortega e Casal, 1997).

A principal causa de fissuração em elementos estruturais é a atuação de sobrecargas não especificadas nos projetos estruturais. Quando elas já estão

previstas, as fissuras podem surgir durante a execução devido a ajustes imprevistos ou a solicitações superiores às projetadas (Hoffmann; Scariot, 2020).

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto se baseia no entendimento do processo corrosivo nas estruturas de concreto protendido a partir do estudo de caso realizado na estaca protendida do píer de minério localizado no porto do aço RJ.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Identificar os fatores que promovem a ocorrência de oxidação em estruturas de concreto protendido.
- b) Comportamento da corrosão em sistema de protensão
- c) Recuperação de estruturas afetadas pela corrosão.
- d) Analisar a formação de fissuras e deformações.

2. JUSTIFICATIVA

A corrosão em estruturas de concreto protendido é uma patologia que pode comprometer a integridade estrutural, resultando em altos custos de manutenção e reparo, além de representar riscos significativos para a segurança pública.

A necessidade de investigar a corrosão em concreto protendido é impulsionada pela crescente urbanização e pela exposição das construções a ambientes agressivos, como áreas costeiras e industriais.

A penetração de cloretos e a carbonatação são os principais agentes que contribuem para a corrosão das armaduras de protensão. Estes processos reduzem a alcalinidade do concreto, comprometendo a camada passiva que protege o aço e iniciando o processo corrosivo. Além disso, a presença de fissuras no concreto e a qualidade dos materiais utilizados são fatores que podem acelerar a corrosão. Portanto, é essencial desenvolver métodos eficazes de monitoramento e técnicas de prevenção e mitigação para garantir a longevidade e a segurança das estruturas de concreto protendido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCRETO PROTENDIDO

Em estruturas de concreto convencional, a resistência à tração é significativamente menor do que a resistência à compressão. No concreto protendido, a armadura adicional gera um esforço de compressão no concreto, que será tracionado quando submetido às cargas sobre a estrutura (Santos; Pinheiro 2021).

Conforme Giovanaz; Fransozi (2017), na construção civil urbana, as lajes protendidas são as estruturas de protensão mais utilizadas em casas, prédios e pavilhões, independentemente do tipo. O uso de vigas protendidas é geralmente inviável nesses contextos, pois as lajes protendidas já fornecem a resistência necessária para vencer os vãos. As vigas de concreto armado, sejam elas moldadas in loco ou pré-moldadas, geralmente satisfazem a resistência de projeto nessas construções. Por outro lado, as vigas protendidas são mais comuns em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos, barragens e outras construções de grande porte que exigem maior resistência ao carregamento e corrosão.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), a intensidade da protensão pode ser classificada conforme a durabilidade das peças e a prevenção contra corrosão. A escolha dos tipos de protensão depende do tipo de construção e da agressividade do meio ambiente. Em ambientes de agressividade fraca ou moderada, com aderência posterior, recomenda-se a protensão parcial. Em locais com alta agressividade, é recomendada a protensão limitada. Para ambientes de fraca agressividade e aderência inicial, também é indicada a protensão parcial.

Uma das principais vantagens do concreto protendido é a possibilidade de criar vãos maiores em comparação ao concreto armado convencional. Enquanto pontes com vigas de concreto armado são limitadas a vãos de 30 a 40 metros, pontes com vigas de concreto protendido podem alcançar vãos de até 250 metros. Além disso, as estruturas de concreto protendido possuem resistência de duas a três vezes superior à do concreto armado convencional, e os aços de protensão

apresentam resistência de três a cinco vezes maior que a do concreto convencional (Pfeil, 1984).

Outra grande vantagem do concreto protendido é a capacidade de reduzir as fissuras na estrutura. Para isso, aplica-se uma força de compressão à peça de concreto por meio de armaduras de aço pré-tracionadas, o que minimiza as forças de tração e contribui para a diminuição ou eliminação das fissuras (Santos; Pinheiro, 2021).

Entre as desvantagens do concreto protendido estão o efeito da corrosão nas armaduras ativas, que pode comprometer a segurança da estrutura; erros no projeto ou na execução, que podem resultar na ruína da estrutura; a complexidade dos projetos, que devem ser mais bem detalhados; e a necessidade de controle de qualidade rigoroso, uso de equipamentos especiais e mão de obra especializada (Alves; Santos, 2020).

A corrosão em estruturas de aço, especialmente em concreto protendido, é uma questão crítica devido a fatores como o pequeno diâmetro dos fios (entre 4 e 9 mm) e as altas tensões a que estão submetidos. Esses aspectos aumentam a suscetibilidade à corrosão. A presença de umidade e agentes corrosivos, pode levar ao fenômeno da corrosão sob tensão. Nesse processo, o aço tensionado inicia uma degradação que pode resultar em ruptura frágil, potencialmente causando o colapso da estrutura final (Alves; Santos, 2020).

3.2 UTILIZAÇÃO DA PROTENSÃO E PATOLOGIAS

A aplicação da técnica do concreto protendido requer um alto nível de especialização, demandando profissionais experientes em projetos estruturais de protensão e empresas especializadas nesse tipo de serviço. Os equipamentos e acessórios utilizados na protensão do aço devem atender a rigorosos padrões de controle tecnológico, assegurando a execução correta do processo. Além disso, é essencial integrar as instalações elétricas e hidrossanitárias à estrutura durante a fase de planejamento, evitando a necessidade de perfurações nas cordoalhas posteriormente (Bekaert, 2018).

De acordo com Cauduro (2002), a cordoalha engraxada surgiu no final da década de 50, atendendo à necessidade de um sistema de protensão que fosse econômico e bem executado. A primeira patente de protensão utilizava bainhas individuais de plástico cobrindo a cordoalha. Para evitar a corrosão da armadura, era aplicada uma graxa especial ao redor da cordoalha antes da inserção da bainha plástica. Essa graxa proporcionava uma elevada lubrificação entre a bainha plástica e a cordoalha, reduzindo significativamente o coeficiente de atrito de 0,24 em bainhas metálicas para 0,07 em bainhas plásticas.

As cordoalhas engraxadas têm conquistado popularidade na construção de edifícios devido à sua economia e eficiência. Essas cordoalhas são protegidas contra corrosão pela graxa e têm uma bainha plástica resistente que facilita o manuseio, conforme mostrada na Figura 1. Leves e de fácil posicionamento, elas são fixadas em peças plásticas ou de aço, usando ancoragens pequenas e econômicas de ferro fundido. O processo é facilitado por nichos padronizados e descartáveis para o uso do macaco na tração dos cabos, resultando em obras mais organizadas e com menos desperdício (Vasconcelos, 2010).

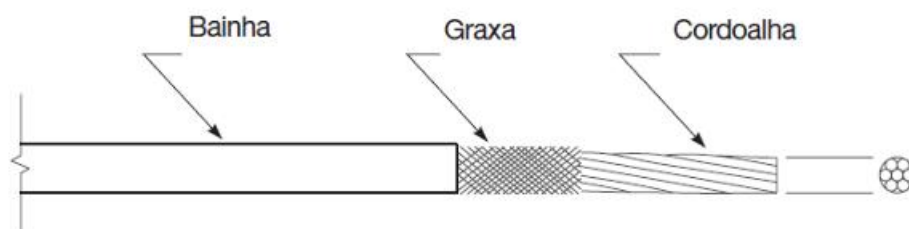


Figura 1: Esquema de cordoalha engraxada.

Fonte: Vasconcelos, 2010.

3.3 CORROSÃO NA CORDOALHA E SUA PROTEÇÃO

A oxidação das cordoalhas de aço utilizadas na protensão é um mecanismo relevante em estruturas de concreto protendido. Segundo Rodriguez, Ortega e Casal (1997), as cordoalhas podem sofrer oxidação quando expostas a ambientes altamente úmidos ou quimicamente agressivos, consequentemente afetando negativamente a performance das vigas. Além de diminuir a seção transversal do aço, o que reduz sua capacidade de carga, a corrosão compromete a aderência

entre o concreto e o aço. Isso resulta em um aumento na abertura de fissuras sob carga, além de uma diminuição na carga máxima que as vigas conseguem suportar. Esses fatores tornam essencial a manutenção e a proteção das estruturas para garantir sua durabilidade e segurança.

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Kropf (2021), quando a perda de massa devido à corrosão excede 6%, como ilustra a Figura 2 observa-se um aumento significativo no número de fissuras, que se distribuem por toda a região de flexão. Em contraste, nas vigas sem corrosão, as fissuras tendem a se concentrar principalmente no centro do vão, propagando-se para a zona de compressão, conforme a Figura 3. Essa mudança na distribuição das fissuras demonstra como a corrosão compromete a integridade estrutural das vigas, resultando em um desempenho inferior e aumentando o risco de falhas.

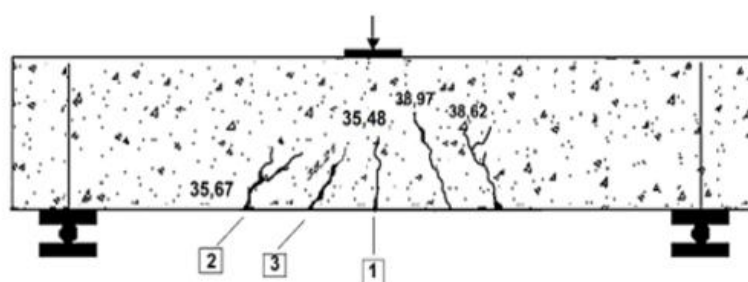


Figura 2: Formação de fissuras com corrosão.

Fonte: Kropf, 2021.

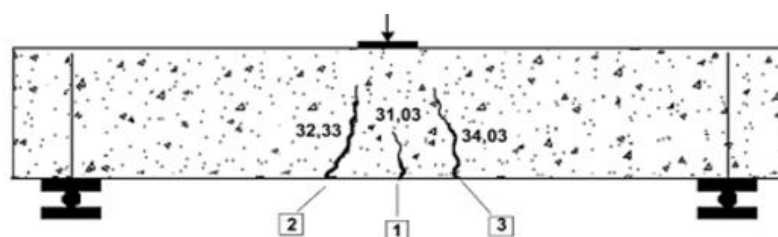


Figura 3: Formação de fissuras sem corrosão.

Fonte: Kropf, 2021.

A análise dos principais mecanismos de oxidação em concreto protendido enfatiza a necessidade de compreender e controlar os processos de corrosão. Autores como Oliveira e Lima (2017) e Silva *et al.* (2019), reforçam a importância de medidas de proteção e prevenção, materiais duráveis, aditivos inibidores de corrosão, revestimento protetores, sistemas de drenagem eficientes para reduzir a exposição a ambientes agressivos e técnicas construtivas adequadas. Implementar

essas estratégias é vital para a segurança, durabilidade e desempenho das estruturas de concreto protendido ao longo do tempo.

3.4 TIPOS DE CORROSÃO NO CONCRETO

De acordo com Andrade (1992), a corrosão em estruturas de concreto ocorre devido à diminuição da alcalinidade do concreto. Essa redução pode ser causada pela lixiviação, que é a circulação de água pura ou levemente ácida, ou pela reação dos compostos alcalinos presentes no concreto (como NaOH, KOH e Ca(OH)_2) com componentes ácidos da atmosfera, como dióxido de carbono (CO_2) e enxofre (SO_2).

Conforme Gentil (2020), a corrosão uniforme afeta toda a extensão da armadura quando esta está exposta a um ambiente corrosivo. Já a corrosão puntiforme é caracterizada por desgastes localizados na armadura, manifestando-se sob a forma de pites ou alvéolos.

A corrosão localizada se divide em corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante, sendo esta última mais comum em estruturas de concreto protendido. A corrosão generalizada é desencadeada pela carbonatação, enquanto na corrosão localizada, os cloretos são os principais agentes. Esses contaminantes penetram no concreto e iniciam o processo de corrosão das armaduras. A Figura 4 ilustra os diferentes aspectos morfológicos de cada tipo de corrosão (Fernandes Filho; Brito Filho, 2002).

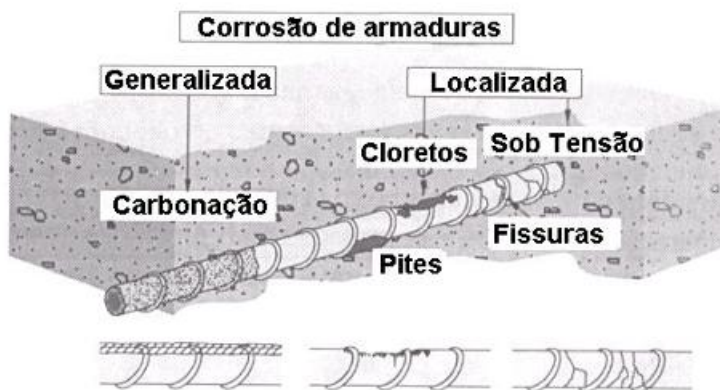


Figura 4: Morfologia e processos desencadeantes.

Fonte: Cascudo, 1997.

De acordo com Kropf (2021), a corrosão sob tensão (CST) é um fenômeno complexo que envolve a deterioração de materiais devido à ação conjunta de tensões mecânicas e um meio corrosivo. Esse processo resulta na formação de trincas que podem levar à falha do material.

A tensão necessária para iniciar a CST é geralmente menor que a tensão de escoamento e a tensão de tração do material. Essas tensões podem ser aplicadas externamente ou ser tensões residuais resultantes de processos como tratamento térmico e soldagem (Schön, 2013).

A corrosão por pite, também conhecida como *pitting corrosion*, é um tipo de corrosão localizada que forma pequenos pontos de desgaste na superfície do metal. Esses pontos se desenvolvem e aprofundam, podendo causar rupturas pontuais. A intensidade e o perigo da corrosão por pite aumentam com a razão entre a área do cátodo e a área do ânodo (Cascudo, 1997).

3.5 CORROSÃO POR ATAQUE DE ÍONS DE CLORETO

Os íons cloretos podem penetrar no concreto através do uso de aceleradores de pega contendo cloreto de cálcio, impurezas nos agregados e na água de amassamento, exposição à atmosfera marítima, contato com água do mar em estruturas submersas, uso de sais de degelo em regiões frias e processos industriais (Lodi, 2024).

Em algumas situações, a corrosão da armadura ocorre de maneira rápida e progressiva, especialmente em estruturas situadas na orla marítima, onde a névoa marinha é intensa. A presença de íons de cloreto torna a atmosfera marinha altamente agressiva (Bruna; Moura; Del Pino, 2024).

Os íons de cloreto, em presença de umidade, penetram na camada externa do concreto e alcançam a superfície do aço, resultando na despassivação local do metal. Esse processo provoca um ataque de corrosão na área afetada, que atua como ânodo. Simultaneamente, a corrosão é facilitada pela reação catódica que ocorre na área circundante, caracterizando um sistema eletroquímico onde diferentes regiões do aço desempenham papéis distintos, a Figura 5 ilustra esse

tipo de reação. Esse mecanismo de corrosão é intensificado em ambientes marinhos tornando essencial entender a interação entre os agentes agressivos e os materiais de construção (Kropf, 2021).

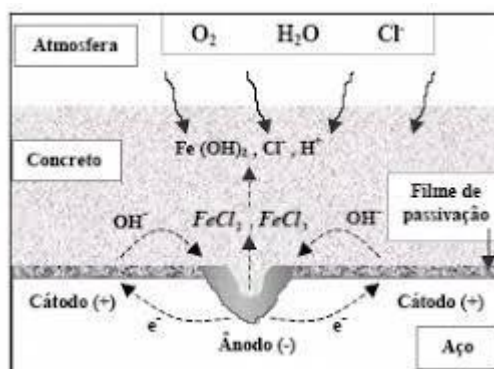


Figura 5: Processo de corrosão localizada do aço em presença de cloretos.

Fonte: Ollivier, 1998.

Saremi *et al.* (2002) explicam que, ao alcançar a camada passivadora do aço, os íons de cloreto (Cl^-) reagem com os íons de ferro (Fe^{2+}) da camada dupla de *Helmholtz*, formando FeCl_2 . Essa reação consome íons de ferro, impedindo a reconstrução da camada passiva. Entretanto, enquanto a concentração de oxigênio na forma de hidroxila (OH^-) permanecer elevada, as falhas pontuais na passivação podem ser reparadas, resultando na formação de óxidos de ferro, como Fe_2O_3 e Fe_3O_4 .

4. METODOLOGIA

Este trabalho adotará uma abordagem aplicada, com foco na recuperação estrutural de estacas em concreto protendido em ambientes portuários, utilizando como estudo de caso a estaca localizada no píer do Terminal de Minério, situado no Porto do Açu, no município de São João da Barra, estado do Rio de Janeiro.

A metodologia consiste na realização de intervenções nas regiões emergidas da estaca, compreendendo as seguintes etapas:

- a) Inspeção preliminar e diagnóstico estrutural
Será realizada uma vistoria técnica para identificação do grau de

deterioração da estaca, com ênfase na avaliação do estado de oxidação da cordoalha e da integridade do concreto envolvente, caso existente.

b) Tratamento da oxidação da cordoalha

A cordoalha que apresenta sinais de corrosão será submetida a processos de limpeza mecânica, a fim de remover os produtos da corrosão e preparar a superfície para o tratamento posterior.

c) Aplicação de inibidores de corrosão

Após o tratamento mecânico, serão aplicados inibidores de corrosão específicos, com o objetivo de proteger as armaduras expostas e retardar a reincidência do processo corrosivo.

d) Recomposição com argamassa estrutural

As áreas removidas ou danificadas durante o processo de preparação da superfície serão recompostas com argamassa estrutural, restabelecendo a geometria e a resistência mecânica da estaca.

e) Aplicação de impermeabilizante

Como etapa final, será aplicada uma camada de produto impermeabilizante, com a função de proteger a estaca contra a ação de agentes agressivos presentes no ambiente marinho.

A execução das etapas seguirá as normas técnicas brasileiras pertinentes (como a NBR 6118:2023, NBR 12655:2022 e NBR 14931:2023) e será orientada pelas boas práticas de engenharia, visando garantir a durabilidade da estrutura e a segurança da operação portuária.

4.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

A intervenção objeto deste estudo foi realizada na estaca identificada como *E41-A*, localizada no lado Oeste do Píer do Terminal de Minério, no Porto do Açu, situado no município de São João da Barra – RJ. Devido à sua localização em área alagada e de difícil acesso terrestre, todas as atividades de recuperação foram executadas pelo mar, utilizando embarcações de apoio e infraestrutura especializada.

A estaca *E41-A* é um elemento estrutural circular, de seção vazada, com diâmetro externo de 80 cm. Durante as inspeções técnicas iniciais, foram identificadas patologias relevantes, como deslocamento do cobrimento de concreto, especialmente na região correspondente à janela de moldagem, o que expôs parte da armadura ativa e oxidação da cordoalha de protensão, caracterizada pela presença de corrosão superficial visível, tais manifestações patológicas representam risco à durabilidade e à capacidade resistente do elemento estrutural, especialmente considerando o ambiente marinho agressivo ao qual a estrutura está submetida. A figura 6 demonstra a estaca sendo acometida por tais patologias.



Figura 6: Deslocamento da camada de cobrimento com cordoalha exposta.
Fonte: O autor, 2025.

4.1.1 ESPECIFICAÇÕES DAS ARMADURAS

A estaca em questão é composta por armaduras passivas em aço CA-50 e armaduras ativas constituídas por cordoalhas de protensão do tipo CP-190 RB. Trata-se de um elemento com seção circular, no qual a disposição das armaduras segue critérios angulares específicos. As cordoalhas de protensão estão

distribuídas ao longo da circunferência com angulação de 36° entre si, enquanto as barras de aço passivas apresentam espaçamento angular de 18° . Dessa forma, a alternância entre os dois tipos de armadura ocorre a cada 9° , resultando em uma distribuição uniforme da seção da estaca como é ilustrado pela Figura 6.

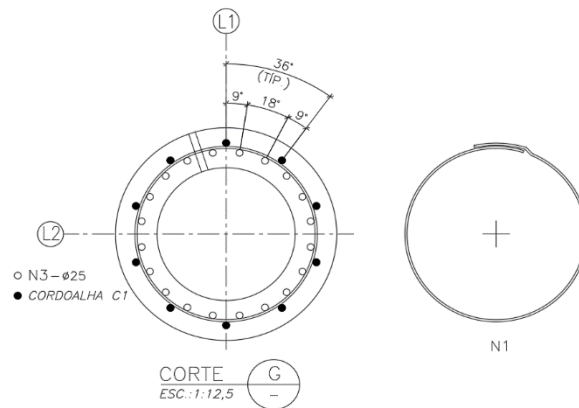


Figura 7: Corte em planta da estaca.

Fonte: O autor, 2025.

4.2 MÉTODOS DE REPAROS

Inicialmente vale destacar, um mergulhador realizou limpeza das regiões imersas e emersas da estaca, com o objetivo de proporcionar melhor visibilidade e facilitar a identificação das patologias estruturais. As manifestações observadas estão documentadas por meio das figuras 8, 9 e 10, a seguir.



Figura 8: Mergulhador realizando o processo de limpeza da estrutura.
Fonte: O autor, 2025.



Figura 9: Registro realizado pelo mergulhador na região emersa.
Fonte: O autor, 2025.

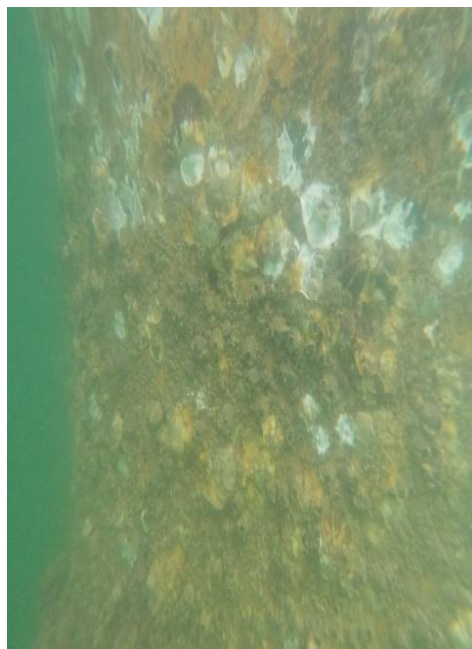


Figura 10: Registro realizado pelo mergulhador-100 cm de profundidade.
Fonte: O autor, 2025.

Após a limpeza da estrutura, foi possível constatar que a patologia identificada estava restrita à região emersa da estaca, não se estendendo para as

áreas submersas. Dessa forma, as atividades de restauração foram direcionadas exclusivamente à parte emersa. Desse modo será montada estrutura de andaime Multidirecional Mecanflex para o início do reparo.

Inicialmente, realizou-se o desbaste manual da área afetada, com o objetivo de remover o concreto deteriorado até alcançar o concreto íntegro. Esse processo foi conduzido de forma criteriosa, de modo a evitar o deslocamento de regiões que não apresentavam comprometimento.

O corte do concreto foi utilizando disco diamantado, com profundidade de aproximadamente 1 cm, ao longo das duas laterais da cordoalha exposta, mantendo uma distância de 1,5 cm da mesma, com o intuito de evitar qualquer risco de contato direto. Após essa etapa, procedeu-se com a remoção criteriosa do concreto localizado entre o sulco criado e a cordoalha, garantindo a integridade da armadura. Posteriormente, realizou-se o rebaixamento da camada de cobrimento em 1,0 cm ao longo de todo o perímetro da área tratada.

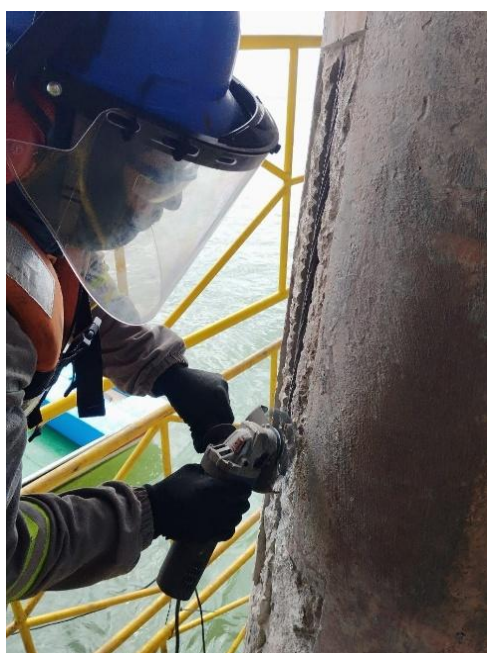


Figura 11: Desbaste controlado da região afetada, laterais.
Fonte: O autor, 2025.



Figura 12: Desbaste controlado da região afetada, sulcos.
Fonte: O autor, 2025.

Após a remoção do concreto deteriorado, foi realizada a limpeza da superfície do concreto remanescente, assim como a limpeza cuidadosa por meio de escovação mecânica rotativa da armadura ativa, que apresentava sinais de corrosão. Esse procedimento teve como objetivo eliminar completamente os resíduos e os produtos da corrosão, assegurando que a superfície ficasse livre de qualquer traço de oxidação. Após a limpeza, foi possível avaliar de forma mais precisa as condições da armadura ativa, garantindo que estivesse em estado adequado para a continuidade das etapas de restauração.



Figura 13: Armadura ativa após a limpeza.
Fonte: O autor, 2025.



Figura 14: Armadura ativa oxidada.
Fonte: O autor, 2025.

A etapa seguinte foi a aplicação do inibidor de corrosão com trincha até obter a espessura aproximada de 0,5 mm em cada demão, logo após foi feita recomposição do recobrimento utilizando-se argamassa estrutural apropriada para ambiente marítimo. A aplicação foi realizada conforme as orientações técnicas recomendadas, garantindo a aderência adequada ao substrato e a eficácia da proteção anticorrosiva.



Figura 15: Recomposição da camada de recobrimento.
Fonte: O autor, 2025.



Figura 16: Recomposição da camada de recobrimento finalizada.
Fonte: O autor, 2025.

Após o recobrimento da armadura e a devida restauração do concreto, procedeu-se com a escovação mecânica rotativa em toda a superfície da estaca. Essa etapa teve como objetivo a remoção completa de fungos, limos e demais impurezas, preparando a superfície para a aplicação do revestimento protetor. Em seguida, foram aplicadas duas demãos de uma solução impermeabilizante desenvolvida para impedir a penetração de água e de agentes agressivos ao concreto, respeitado o intervalo necessário entre as demãos, conforme especificado pelo fabricante. Por fim, foi executada a pintura de acabamento, conferindo proteção adicional à estrutura e melhorando seu aspecto estético.



Figura 17: Aplicação do impermeabilizante.
Fonte: O autor, 2025.



Figura 18: Aplicação do impermeabilizante.
Fonte: O autor, 2025

4.3 CONDIÇÕES METEOCENOGRÁFICAS

Por se tratar de um ambiente marinho, a execução dos reparos na estaca está condicionada à análise das condições meteoceanográficas. Fatores como intensidade e direção dos ventos, correntes marítimas e variação da maré devem ser monitorados e estar dentro de limites seguros para garantir a viabilidade das atividades.

Durante as operações de reparo nas estruturas, a base do deck, que possibilita o acesso dos trabalhadores, não pôde ser desmontada devido às condições desfavoráveis da maré. A rápida variação no nível do mar impossibilitou a realização segura da atividade, que precisou ser interrompida naquele momento.

A grande variação da maré pode ser observada visualmente no ponto de transição entre as regiões emersa e submersa da estaca, onde a presença de incrustações marinhas evidencia os limites atingidos pelo nível do mar ao longo do tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a finalização do serviço, o resultado almejado foi alcançado. Apesar da corrosão interferir na aderência entre armadura e concreto, uma vez que o sistema de protensão utilizado foi o pré tensão, a perda de resistência mecânica ocorreu apenas na região onde apresentou a patologia, mantendo o restante da estaca protendida sem comprometer a estabilidade estrutural. O recobrimento da armadura tratada foi com argamassa polimérica subaquática. O processo de remoção mecânica da corrosão e aplicação do inibidor tornou a região reparada livres de quaisquer índices de oxidação. O revestimento impermeabilizante aplicado na superfície tratada reduz a proliferação de patologias decorrentes da corrosão, pois o mesmo tem poder altamente prejudicial a esse tipo de estrutura.

A corrosão tem alto poder de causar perda de capacidade das estruturas em especial as que contém protensão (Rodriguez, Ortega e Casal 1997), se tratando de um elemento situado em região costeira a agressividade do ambiente se torna ainda mais prejudicial, presença de íons de cloreto uma vez atingida a armadura, os cloretos rompem a camada passivadora de óxido que normalmente protege o aço, iniciando processos corrosivos localizados.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu compreender os mecanismos de corrosão em estruturas de concreto protendido e a importância da manutenção e recuperação para garantir sua durabilidade e segurança. Através do estudo de caso realizado na estaca do píer de minério do Porto do Açu, foi possível analisar a aplicação de métodos eficazes de reparos.

Os resultados demonstram que a utilização de técnicas de recuperação do material degradado, aplicação de inibidores, recomposição com argamassa estrutural e revestimento impermeabilizante são fundamentais para minimizar os impactos da corrosão em ambientes marinhos. Além disso, a aderência às normas

técnicas e boas práticas de engenharia assegura que a recuperação estrutural seja eficiente e duradoura.

Conclui-se, portanto, que este estudo representa uma base relevante para futuras intervenções, ao mesmo tempo em que estimula investigações complementares acerca da recuperação desses elementos em ambientes marítimos.

7. REFERÊNCIAS

Andrade, C. Manual Para Diagnóstico De Obras Deterioradas Por Corrosão De Armaduras. São Paulo: Pini, 104p. 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118- Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 2023.

BASTOS, Paulo Sérgio. Fundamentos do concreto protendido. Bauru/SP: Universidade Estadual Paulista–UNESP, 2019.

Böhni, H. (Ed.) Corrosion In Reinforced Concrete Structures. Cambridge: Woodhead, 2005, 248p

BEKAERT, Belgio. A Tecnologia na construção civil e seus desdobramentos, 2018. Disponível em: blog.belgobekaert.com.br/a-tecnologia-na-construcao-civil-e-seusdesdobramentos/

BRUNA, Monique Gomes de Oliveira; MOURA, Paulo Rogério Garcez; DEL PINO, José Cláudio. Corrosão em concreto: fatores aceleradores da deterioração, prevenção e reparos. Universidade de Cruz Alta, UNICRUZ, 2024.

CARVALHO, R. C. DE. Estruturas em concreto protendido: pré-tração, pós-tração, cálculo e detalhamento. [s.l.] Pini, 2017.

Cascudo, O. O Controle Da Corrosão De Armaduras Em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: Pini; Goiania: Editora Ufmg, 1997.

CAUDURO, Eugenio Luiz. Manual para a execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas. 2ª Edição. Disponível em: https://www.rlf.com.br/arquivos/Manual_BoaExecEstruturasPro.pdf

CUNHA, Juscelene Maria Soares. Concreto Protendido. 2018. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelitana Mário Palmério – Fucamp, Monte Carmelo-Mg, 2018. Disponível em: <http://repositorio.fucamp.com.br/jspui/handle/FUCAMP/378/browse?type=author&order=ASC&rpp=20&value=Cunha%2C+Juscelene+Maria+Soares>. Acesso em: 16 out. 2024.

FERNANDES FILHO, Rivaldo; BRITO FILHO, João Pereira de. Detecção de corrosão em estruturas de concreto armado usando sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2022.

GIOVANAZ, Alfredo Henrique; FRANZOZI, Carolina Becker Porto. ESTRUTURAS DE CONCRETO PROTENDIDO: ESTUDO DE CASO NO CONTEXTO DA DISCIPLINA DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO I. Revista Destaques Acadêmicos, [S. l.], v. 9, n. 4, 2017. DOI: 10.22410/issn.2176-3070.v9i4a2017.1672. Disponível em: <https://www.univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/1672>. Acesso em: 16 out. 2024.

Gjorv, Odd E. Durability Design Of Concrete Structures In Severe Environments. 2ª Ed. Boca Raton: Crc Press, 2014.

GONZÁLEZ, J. A.; GÓMEZ, J. S. Corrosion problems in precast prestressed concrete bridge deck girders. Corrosion Engineering, Science and Technology, v. 49, n. 1, p. 54-59, 2014.

HOFFMANN JUNIOR, Lirineu Carlos; SCARIOT, Kênia Araújo de Lima. Verificação de possíveis causadores de manifestações patológicas em elementos protendidos. Sinop: UNIFASIPE Centro Universitário, 2020.

KROPF, D. ESTUDO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA CORROSÃO EM ELEMENTOS PRÉ-TRACIONADOS PRODUZIDOS COM CONCRETO. Campos dos Goytacazes: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF, 2021.

LODI, Victor Hugo. A corrosão das armaduras de concreto. Xanxerê, SC: Basalto Engenharia, 2024.

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

OLIVEIRA, R. L.; LIMA, A. G. Influência da corrosão de armaduras no comportamento de vigas de concreto armado protendido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 10, 2017, Goiânia.

RODRIGUES DE MIRANDA BOTELHO ALVES, Cártes; FRANCISCO CODÁ DOS SANTOS, Amaro. Manifestações patológicas em estruturas pré-moldadas de concreto protendido - comportamento da estrutura e análise de risco. Boletim do Gerenciamento, [S.l.], v. 17, n. 17, p. 61-72, ago. 2020. ISSN 2595-6531. Disponível em: <<https://nppg.org.br/revistas/boletimdoGerenciamento/article/view/459>>. Acesso em: 07 out. 2024.

RODRIGUEZ, J.; ORTEGA, L. M.; CASAL, J. Capacidade de carga de estruturas de concreto com armadura corroída. *Construction and Building Materials*, v. 11, n. 4, p. 239-248, 1997. DOI: 10.1016/S0950-0618(97)00043-3.

Saremi, M.; Mahallati, E. A Study On Chloride-Induced Depassivation Of Mild Steel In Simulated Concrete Pore Solution. *Cement And Concrete Research*, Vol 32, 2002.

SANTOS, Everton Oliveira dos; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. Processo executivo de estruturas em concreto protendido: Estudo de caso em edifícios multifamiliares. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 12, p. 111053-111067, dez. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n12-064.

Schön, C. G. *Mecânica Dos Materiais*. 1ª Ed. Rio De Janeiro: Editora Elsevier. 2013.

SILVA, A. B. et al. Estudo sobre a corrosão em estruturas de concreto armado e

protendido. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 22, n. 1, p. 127-136, 2018.

VASCONCELOS, K. S. Análise comparativa entre lajes nervuradas em concreto armado e concreto protendido. Rio de Janeiro. 2010.