



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
JHONATTAN LEITE CORDOVIL

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ANÁLISE E INSPEÇÃO DE
UMA PONTE HÍBRIDA DE CONCRETO ARMADO E MADEIRA LOCALIZADA NA
CIDADE DE ESTÂNCIA-SE

ESTÂNCIA
2021

JHONATTAN LEITE CORDOVIL

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ANÁLISE E INSPEÇÃO DE
UMA PONTE HÍBRIDA DE CONCRETO ARMADO E MADEIRA LOCALIZADA NA
CIDADE DE ESTÂNCIA-SE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Sergipe como pré-requisito para
a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Gilberto Messias dos Santos
Junior

ESTÂNCIA
2021

C796u Cordovil, Jhonattan Leite.
Utilização de ensaios não destrutivos para análise e inspeção de uma ponte híbrida de concreto armado e madeira localizada na cidade de Estância-SE. / Jhonattan Leite Cordovil. - Estância, 2022.
55 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2022.

Orientador: Prof. Esp. Gilberto Messias dos Santos Júnior.

1. Manifestações patológicas. 2. Ensaios não destrutivos. 3. Ponte híbrida. 4. Coeficiente de variação. 5. Desvio padrão. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Santos Júnior, Gilberto Messias dos. III. Título.

CDU: 624:624.21

JHONATTAN LEITE CORDOVIL

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ANÁLISE E INSPEÇÃO DE
UMA PONTE HÍBRIDA DE CONCRETO ARMADO E MADEIRA LOCALIZADA NA
CIDADE DE ESTÂNCIA-SE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Sergipe como pré-requisito para
a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Gilberto Messias dos Santos Junior
Instituto Federal de Sergipe - IFS

Prof. M.Sc. Adysson André Fortuna de Souza
Instituto Federal de Sergipe - IFS

Prof. M.Sc. Fábio Wendell da Graça Nunes
Instituto Federal de Sergipe - IFS

Dedicatória

Eu dedico este trabalho aos meus pais Patricia e Werbson, por me ensinarem o valor da honestidade, pelo apoio e incentivo durante toda a minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio e incentivo durante toda a minha vida, por darem o exemplo mostrando que somente com muito esforço e dedicação é possível alcançar os objetivos que almejamos.

Aos meus colegas pela ajuda durante a graduação e pelos bons momentos que passamos juntos estes anos.

Ao Gilberto Messias pelas orientações durante esta monografia, mas também pela paciência para tirar dúvidas em algumas matérias que foi o docente durante a minha graduação.

À empresa proprietária da ponte e aos seus colaboradores por permitirem que eu fizesse a análise dos elementos da obra de arte

Aos professores por não medirem esforços para passar o conteúdo da melhor forma possível para os alunos, mesmo durante o período de pandemia.

Às técnicas do laboratório e servidores do IFS por me auxiliarem e orientarem durante a execução do trabalho de conclusão de curso e durante toda a minha graduação.

E agradeço a todos os envolvidos de maneira direta e indireta para que eu concluísse o curso de engenharia civil.

Muito obrigado!

RESUMO

O conhecimento acerca de patologia é de extrema importância para o âmbito da engenharia civil. E um dos temas que essa aborda são as manifestações patológicas. A familiaridade sobre os tipos de manifestações patológicas, os mecanismos de degradação e terapias, são ferramentas por meios das quais o engenheiro pode realizar com maior acurácia a inspeção nas estruturas. Existem vários tipos de manifestações patológicas como a carbonatação do concreto, processo corrosivo sobre o aço e o ataque de insetos xilófagos nas peças de madeira. Diante disto foi realizada uma inspeção visual nos elementos de concreto armado e de madeira que constituíam uma ponte localizada no município de Estância-SE e foram identificadas as manifestações patológicas que degradavam os seus elementos estruturais. Em outro momento alguns pilares da ponte foram submetidos a ensaios não destrutivos, como o ensaio de esclerometria e o ensaio de carbonatação que foi realizado em algumas fraturas pré-existentes nos pilares da ponte. Após a análise dos resultados do ensaio de esclerometria, constatou-se que os pilares P1, P13, P19 e P21 obtiveram valores de desvio padrão superiores a 2,50 unidades, o que está em desacordo com a norma ASTM C 805 – 2018. Mas também se apurou que os pilares P1 e P19 mostraram-se com coeficiente de variação fora do intervalo recomendado pela norma BS EN 12504-2: 2012. Já o ensaio de carbonatação comprovou que alguns pilares estavam carbonatados. A partir destas informações pode-se concluir que a utilização de ensaios não destrutivos são ferramentas úteis para obtenção de dados para diagnosticar estruturas, verificou-se que alguns pilares da estrutura estavam em um estágio avançado de corrosão e disgregação e algumas peças de madeira tiveram reduções significativas de seção resistente, por conta de ataque de insetos.

Palavras-chave: Manifestações Patológicas. Ensaios não destrutivos. Ponte Híbrida. Coeficiente de Variação. Desvio Padrão.

ABSTRACT

In civil engineering, knowledge of pathology is considered to be extremely important. One of the topics to be addressed concerns pathological manifestations. The familiarity about the types of pathological manifestations, their degradation mechanisms, and their corresponding therapies, are tools that allow an engineer to inspect the structures with greater accuracy. Several types of pathological manifestations have been observed, such as concrete carbonation, steel corrosion, and the attack of xylophagous insects on wooden parts. In this study, we performed a visual inspection of the reinforced concrete and wooden elements of a bridge located in the municipality of Estância-SE to identify the pathological manifestations that resulted in the degradation of its structural elements. Subsequently, some of the bridge columns were subjected to non-destructive testing, such as the sclerometer and carbonation tests, which were performed on some pre-existing fractures. We analyzed the sclerometer test results and found that the columns P1, P13, P19, and P21 had standard deviation values greater than 2.50 units, which is in disagreement with the ASTM C 805 - 2018 standards. Moreover, the columns P1 and P19 showed a coefficient of variation outside the range recommended by BS EN 12504-2: 2012. The carbonation test results showed that some columns were carbonated. Based on these results, it was concluded that non-destructive testing can be used to obtain information for structural analysis. It was found that some pillars of the structure were in an advanced stage of corrosion and disgregation and that the resistant sections of some wooden parts had reduced significantly due to insect attack

Keywords: Pathological Manifestations. Non-Destructive Testing. Bridge. Coefficient of Variation. Standard Deviation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Vista transversal de um ponte	21
Figura 2 -Viaduto com extremidades em balanço	21
Figura 3 -Ponte em laje	22
Figura 4 -Ponte em viga reta de alma cheia	22
Figura 5 -Ponte em viga reta de treliça	22
Figura 6 -Ponte em quadro rígido	22
Figura 7 -Ponte em abóbada	22
Figura 8 -Ponte em arco superior	23
Figura 9 -Ponte pensil	23
Figura 10 -Face inferior da laje superior: Infiltração e eflorescência	25
Figura 11 -Corrosão causada pela carbonatação	26
Figura 12 -Reação álcali-agregado em bloco de fundação	27
Figura 13 -Fissuração de Torção	29
Figura 14 -Fissuração de Flexão e Cisalhamento	29
Figura 15 -Representação de uma pilha de corrosão	30
Figura 16 -Corrosão generalizada, atinge pilar em zona industrial	31
Figura 17 -Corrosão generalizada desencadeada pela carbonatação do concreto (a) e da corrosão puntiforme desencadeada pela ação dos íons cloreto (b)	31
Figura 18 -Danos causados por ataque de cupins em madeira	33
Figura 19 -Ensaio esclerométrico	35
Figura 20 -Ensaio de profundidade de carbonatação	36
Figura 21 -Emprego de pacômetro em estrutura	37
Figura 22 -Ponte que será objeto de estudo	38
Figura 23 -Esclerômetro analógico schmidt – tipo N	40
Figura 24 -Desenho reticulado	41
Figura 25 -Locais recomendados para a execução do ensaio	42
Figura 26 -Ponte objeto de estudo	43
Figura 27 -Esquema, em planta, dos elementos de fundação	44
Figura 28 -Sapata corrida EF3	44
Figura 29 -Água parada entre sapata 04 e 05	45
Figura 30 -Esquema de mesoestrutura	45
Figura 31 -Exposição de armadura e corrosão, pilar P11 (A), pilar P12 (B) e pilar P9 (C)	46

Figura 32 -Ataque de insetos xilófagos em peças de madeira, longarina sobre o P5 (A), longarina sobre o P7 (B) e transversina sobre o EF 01 (C)	46
Figura 33 -Ataque de fungos empoladores	47
Figura 34 -Croqui de mesoestrutura com faces A e B	47
Figura 35 -Realização de ensaio	48
Figura 36 -Gráfico de correlação	48
Figura 37 -Ensaio de carbonatação	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -Quadro para inspeção da estrutura

39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Resultados de ensaio de esclerometria

49

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

BS - British Standards

CAA - Classe de Agressividade Ambiental

DNIT -Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EF -Elemento de Fundação

END - Ensaios Não Destrutivos

IFS -Instituto Federal de Sergipe

NBR - Norma Brasileira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	17
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1. INSPEÇÃO, DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DE ESTRUTURAS	19
2.2. CONCEITOS GERAIS SOBRE PONTES	20
2.2.1. Elementos constituintes das pontes	20
2.2.2. Classificação de pontes	21
2.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	23
2.3.1. Ataque de Sulfatos	23
2.3.2. Ataque de cloretos	24
2.3.3. Lixiviação	25
2.4. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	25
2.4.1. Carbonatação do concreto	26
2.4.2. Reação álcali- agregado	27
2.4.3. Fissuração	28
2.4.4. Corrosão das armaduras	29
2.4.4.1. Tipos de corrosão	30
2.4.5. Eflorescência	32
2.5. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM MADEIRA	33
2.5.1. Ataque de Insetos	33
2.5.1. Ataque de Fungos	33
2.5.1. Ataque de Bactérias	34
2.6. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	34
2.6.1. Ensaio de Esclerometria	34
2.6.2. Ensaio de Profundidade de Carbonatação	35
2.6.3. Ensaio de ultrassom	36
2.6.4. Ensaio com pacômetro	36
3. METODOLOGIA	37
3.1. CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	37
3.2. OBJETO DE ANÁLISE	38

3.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	38
3.3.1. Inspeção	39
3.3.2. Esclerometria	40
3.3.3. Ensaio de carbonatação	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. INSPEÇÃO	43
4.1.1. Infraestrutura	43
4.1.2. Mesoestrutura	45
4.1.3. Elementos de madeira	46
4.2. ENSAIO DE ESCLEROMETRIA	47
4.3. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO	50
5. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
APENDICE A – Quadro para a inspeção visual	55

1. INTRODUÇÃO

Tornou-se notória a importância do conhecimento acerca de mecanismos de degradação, manifestações patológicas e da realização de manutenção nas estruturas de concreto simples, armado e protendido. Para que as estruturas durem todo o período de vida útil planejado estes aspectos devem ser observados.

Caso o projetista e o responsável pela execução não estejam familiarizados com os parâmetros, recomendações normativas e boas práticas construtivas a estrutura que está sob a supervisão deles pode apresentar manifestações patológicas que poderiam ser facilmente evitadas.

Uma destas manifestações patológicas é a carbonatação do concreto que é definida DNIT (2010) como a reação entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio $[Ca (OH)_2]$ do concreto. O que causa uma diminuição da alcalinidade, e consequentemente no valor do pH que fica próximo de 9. O pH neste valor não possibilita uma proteção à armadura contra a corrosão.

Com o início do processo corrosivo acontecem reações químicas na região de separação entre o metal e o meio corrosivo. O aço atua como o redutor cede elétrons que são capturados pela substância oxidante. (DNIT, 2004)

Relativo às manifestações patológicas em madeira podemos citar o ataque de insetos xilófagos que de acordo com Montana (2000, apud Winkel, 2019) estes insetos degradam as peças por meio de construção de galerias que diminuem a área que resistirá a solicitações o que pode acarretar colapso abrupto da estrutura.

Estas manifestações patológicas se não forem diagnosticadas de maneira prematura podem levar a estados os quais os usuários não se sintam confortáveis em estarem diante de elementos estruturais com estas manifestações patológicas, e em situações mais graves ao colapso da estrutura. Portanto torna-se clara a relevância de inspeções periódicas nas estruturas, e uma metodologia que pode ser bastante útil para a coleta de dados são os ensaios não destrutivos (END).

De acordo com Lorenzi et al (2019) os END auxiliam a coleta de dados sobre as características efetivas dos componentes de uma estrutura, de maneira que o objeto ensaiado não é prejudicado pela realização do ensaio. Um exemplo é a obtenção de estimativas da resistência a compressão.

O presente trabalho tem como objetivo utilizar END para realizar inspeção e análise de uma ponte híbrida, que possui componentes de concreto armado e madeira, localizada na cidade de Estância-SE, a fim de determinar as manifestações patológicas existentes na estrutura.

1.1. JUSTIFICATIVA

De acordo com Mitre (2005) a interação entre a estrutura de obras de arte especiais e agentes agressivos do ambiente somada a natureza dinâmica das solicitações, intensificam o desenvolvimento de manifestações patológicas, o que resulta em perda do seu desempenho e de seus componentes, logo inspeções periódicas são necessárias para manter sua segurança e capacidade operacional.

Consoante Tutikian e Pacheco (2013) para que a intervenção seja menos onerosa e mais eficiente devem ser detectados as anomalias o mais cedo possível. Os autores também relatam que quando se projeta, constrói e utiliza uma edificação, diversos cuidados não são tomados, o que tem consequências negativas para a vida útil e o desempenho da estrutura.

Segundo Lorenzi et al (2012) o emprego de END é uma estratégia promissora para analisar o estado dos elementos estruturais de concreto armado. Por meio do uso desse evita-se que o estudo da resistência acarrete malefícios com alto custo de correção, ou que tenha como resultado um reparo que a interface do componente original tornar-se-á uma área mais suscetível à degradação. Diminuição da vida útil da estrutura é uma consequência da má correção de danos.

Observando estes pormenores pode ser constatada a importância da realização de END a fim de serem obtidos dados quantitativos que caracterizem o nível de deterioração que as estruturas estão expostas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é utilizar Ensaios Não Destrutivos para a analisar e inspecionar uma ponte híbrida de concreto armado e madeira localizada na cidade de Estância-SE.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar os mecanismos de degradação e quais manifestações patologias a estrutura está exposta;
- Realizar ensaios não destrutivos para a verificação da qualidade do concreto, da sua dureza e profundidade de carbonatação nos elementos estruturais;
- Construir um prognóstico a partir dos dados obtidos dos ensaios não destrutivos;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão abordados os temas e tópicos relevantes ao âmbito do trabalho, será discutido acerca de inspeção de estruturas, conceitos de pontes, manifestações patológicas e Ensaios Não-Destrutivos. Os dados foram obtidos por meio de pesquisa bibliográfica em teses, livros e artigos.

2.1. INSPEÇÃO, DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DE ESTRUTURAS

De acordo com NBR 15575-1 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais (ABNT, 2013), desempenho pode ser definido como o comportamento que a edificação e seus sistemas apresentam quando é utilizada. A norma também defini vida útil (VU) como o período no qual a estrutura e seus sistemas cumprem a finalidade para que estes foram projetados e construídos, com atendimento níveis normatizados de desempenho, considerando que tenha ocorrido periodicamente e de forma correta os processos manutenção especificados no manual de uso, operação e manutenção.

Consoante Tutikian e Pacheco (2013) para que a intervenção seja menos onerosa e mais eficiente devem ser detectados as anomalias o mais cedo possível. Os autores também relatam que quando se projeta, constrói e utiliza uma edificação, diversos cuidados não são tomados, o que tem consequências negativas para a vida útil e o desempenho da estrutura.

De acordo com a NBR 5674 - Manutenção de edificações - Requisitos para o sistema de gestão de manutenção (ABNT, 2012), a manutenção deve ser orientada por um conglomerado de diretrizes que preservem o desempenho previsto em projeto durante da estrutura, a fim de minimizar a depreciação do patrimônio.

Quando uma edificação fica “doente”, ou apresenta algum problema em sua integridade, podem surgir sinais externos, sintomas, indicando que algo não está correto. Algumas vezes esses sinais externos demoram a aparecer e outras podem ser imperceptíveis à maioria dos leigos. A sintomatologia se preocupa em estudar estes sinais com o objetivo de diagnosticar aquela manifestação ou problema patológico. (TUTIKIAN, PACHECO, 2013)

A primeira atividade é a Inspeção de concreto armado que segundo NBR 16230 - Inspeção de estruturas de concreto - Qualificação e certificação de pessoal – Requisitos (ABNT, 2013) pode ser entendida como um conglomerado de processos técnicos e especializados que são constituídos pela coleta de dados e a construção de diagnóstico e prognóstico da estrutura,

com o objetivo de manter ou restaurar os requisitos de segurança estrutural, funcionais e de durabilidade.

O próximo passo é o diagnóstico o qual segundo Helene (1993) pode ser definido como a identificação e descrição minuciosa dos mecanismos, origens e das causas que culminaram no problema patológico, através de um ou mais manifestações patológicas de uma estrutura.

Ainda de acordo com Helene (1993) prognóstico é a conjectura de evolução dos problemas no decorrer do tempo. Além desta estimativa, deve ser feita a análise da evolução do custo de intervenção no tempo, e deve ser determinado qual o momento mais adequado para a realização desta. Após o prognóstico deve ser definida a conduta, por meio da explicação da terapia.

2.2. CONCEITOS GERAIS SOBRE PONTES

Segundo Marchetti (2018) pontes são obras com a finalidade de transpor obstáculos para a continuidade de uma via. As barreiras podem ser rios, vales profundos, braços de mar, outras vias etc. Por outro lado, quando a barreira é um vale ou outra via a estrutura é denominada Viaduto.

De acordo com a NBR 9452 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento (ABNT, 2019) uma ponte ou viaduto que tenha um único vão e comprimento menor ou igual a 6 metros é chamada de pontilhão.

2.2.1. Elementos constituintes das pontes

Segundo Pfeil (1979) a maioria das pontes têm a parte funcional dividida em infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. A primeira parte é constituída por blocos, sapatas, estacas, tubulões, as peças que ligam os elementos entre si e conta mesoestrutura. A infraestrutura é responsável por transmitir ao terreno de implantação os esforços provenientes da mesoestrutura. A segunda parte é composta pelos pilares e tem a função de receber os esforços da superestrutura e os transmitir à infraestrutura, juntamente com outros esforços que também solicitam as pontes como cargas eólicas e da água em movimento. A terceira parte é composta por lajes e vigas principais e secundárias, é o elemento apoio do estrado, o qual cumpre a finalidade da ponte, como pode ser visto na figura 1.

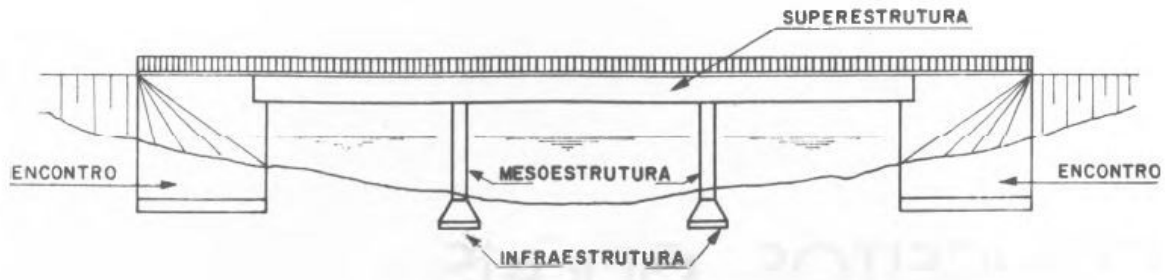


Figura 1 -Vista transversal de uma ponte
Fonte: Pfeil (1979)

Ainda de acordo com Pfeil (1979) existe uma divergência entre alguns engenheiros, para determinar se os encontros fazem parte da mesoestrutura ou da infraestrutura. Estes elementos têm função de receber o empuxo dos aterros de acesso, mas também evitar sua transmissão aos outros elementos estruturais da ponte. Em casos de viadutos e pontes cujos aterros de acesso não apresentam risco de erosão devido o curso de água, pode ser dispensado o uso de encontros. Nesta conjuntura o estrado apresenta extremidades em balanço, e os pilares são solicitados pelo empuxo dos aterros de acesso, como pode ser visto na figura 2.

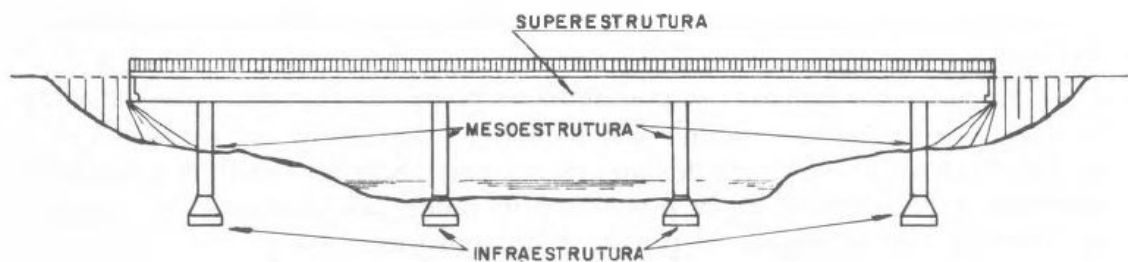


Figura 2 -Viaduto com extremidades em balanço
Fonte: Pfeil (1979)

2.2.2. Classificação de pontes

Consoante Marchetti (2018) pontes podem ser classificadas segundo a extensão do seu vão, durabilidade, natureza do tráfego, desenvolvimento planimétrico, desenvolvimento altimétrico, sistema estrutural da superestrutura, material da superestrutura, mobilidade dos tramos etc. Em relação ao tipo estrutural, adiante será mostrado a seção transversal de alguns tipos, vide figuras 3 a 9.

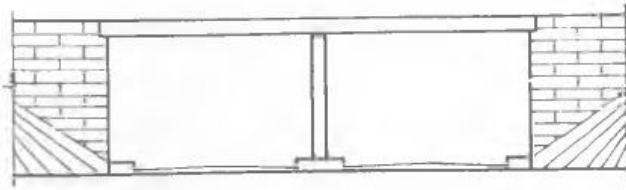


Figura 3 -Ponte em laje
Fonte: Pfeil (1979)

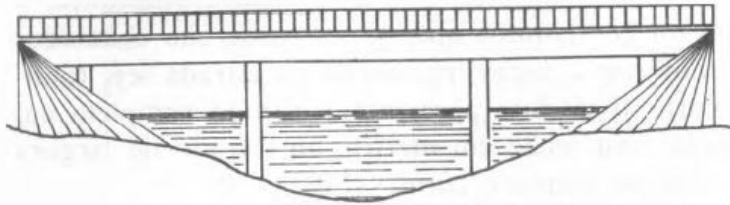


Figura 4 -Ponte em viga reta de alma cheia
Fonte: Pfeil (1979)

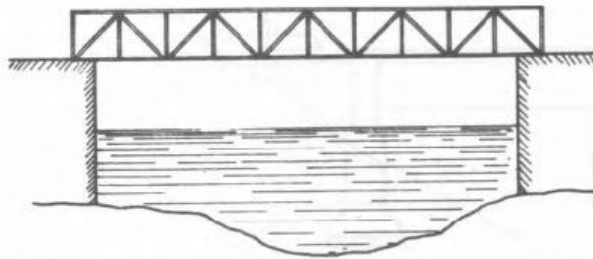


Figura 5 -Ponte em viga reta de treliça
Fonte: Pfeil (1979)

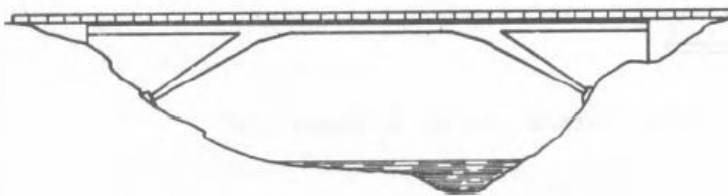


Figura 6 -Ponte em quadro rígido
Fonte: Pfeil (1979)

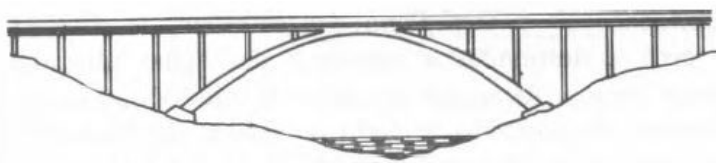


Figura 7 -Ponte em abóbada
Fonte: Pfeil (1979)

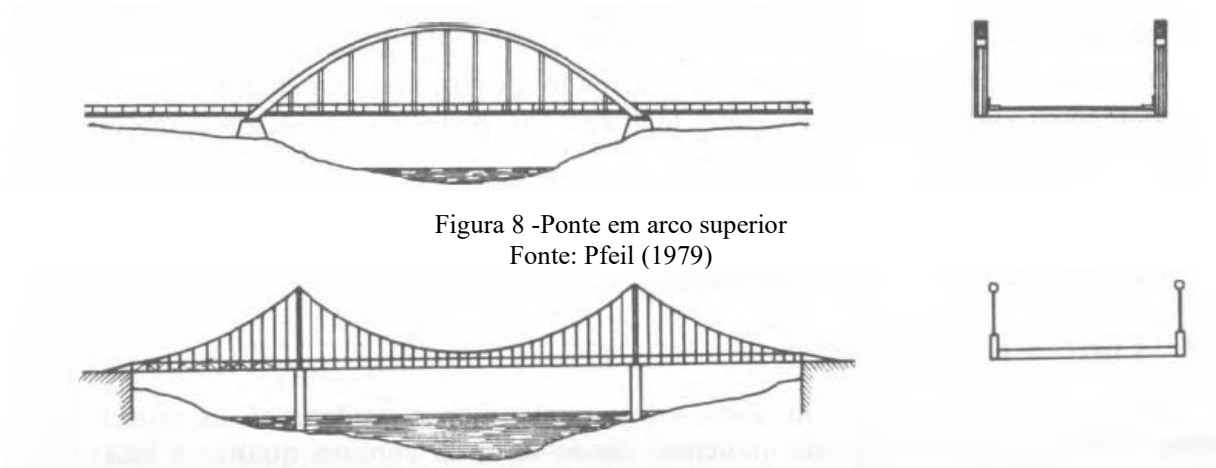


Figura 8 -Ponte em arco superior
Fonte: Pfeil (1979)

Figura 9 -Ponte pensil
Fonte: Pfeil (1979)

2.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

De acordo com Sahuinco (2011) a partir dos mecanismos de deterioração surgem as manifestações patológicas. A fim de que profissionais possam avaliar as estruturas e compreender o desenvolvimento dos mecanismos de degradação, estes devem ser conhecidos e entendidos.

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011) mecanismos de degradação podem ser definidos como,

ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação, e outros considerados em qualquer norma ou código regional, nacional ou internacional, mas que não fazem parte de uma análise de vida útil e durabilidade tradicional.

Consoante Bertolini (2010) concretos e tijolos, são materiais porosos, logo têm nas suas microestruturas presença de um sistema de poros de variadas dimensões, que são usados por substâncias as quais se encontram no ambiente para penetrar os materiais. O transporte destas substâncias líquidas ou gasosas é a base para a degradação que caracterizam os materiais.

2.3.1. Ataque de Sulfatos

De acordo com Sahuinco (2011) os sulfatos podem ser encontrados no solo, na água do mar ou pode estar constituindo o concreto. A degradação resultante do ataque de sulfatos acontece na medida que esta substância expande-se e acarreta a formação de fissuras.

Segundo Aguiar (2006) todos os sulfatos podem causar danos ao concreto, por conta da sua reação com a pasta de cimento hidratado. O processo químico pode ser descrito como, reação de íons de sulfato com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e o aluminato tri-cálcico C_3A , o produto desta reação é a entrigita e o gesso. Os produtos têm o seu volume aumentado e causam uma tensão na pasta de cimento que a desintegra.

Emmos (1993, apud Sahuinco, 2011) relata que o aumento da resistência do concreto ao ataque de sulfatos é inversamente proporcional ao fator a/c, portanto este deve ser reduzido, outras medidas pode ser o uso de cimento resistente a sulfatos, com baixo teor de aluminato tri-cálcico, e implementação de proporções adequadas de sílica ativa e cinzas volantes.

2.3.2. Ataque de cloretos

Segundo Figueiredo e Meira (2013) no momento que os íons cloreto (Cl^-) penetram nos poros do concreto, junto com a água e oxigênio, e encontram a película passivadora da armadura, causam desestabilizações pontuais na película.

Segundo Aguiar (2006) existem diversas formas que os íons cloreto podem chegar no concreto, como o uso de aceleradores de pega que contenham Cloreto de cálcio CaCl_2 , impurezas na água de amassamento e nos agregados, fluido do mar e maresia, sais de degelo e processos relacionados com a indústria.

De acordo com Figueiredo (2005, apud Aguiar, 2006) é recomendado pelas Normas Européias CEB (1991), ENV 206 (1991) e a BS 8110:1 (1985) o teor de cloreto máximo de 0,40% em relação a massa do cimento, já a ACI 318-21 (2003) restringe a 0,15% em ambientes com presença de cloretos, 0,3% em ambientes normais, 1% em ambientes secos 0,06% em concreto protendidos.

No momento que a camada protetora é rompida, a armadura pode sofrer corrosão, que tem como produto óxido de ferro (Fe_2O_3) e hidróxido de ferro (Fe(OH)_3), os quais têm um volume maior que a armadura que não sofreu ataque, o aumento do volume ocasiona tensões radiais em torno da armadura, que produzem trincas radiais no concreto, as trincas podem propagar-se pela extensão da armadura, e em um conjunto de barras paralelas, o que pode ter como consequência a delaminação do concreto. (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), 2010)

2.3.3. Lixiviação

De acordo com DNIT (2004), ação da água pura, água carbônica agressiva ou de águas ácidas podem dissolver os compostos hidratados do cimento. A princípio toda a areia do cobrimento é carregada, o que dá uma aparência bastante conhecida ao elemento estrutural, o que caracteriza a lixiviação, vide figura 10.



Figura 10 -Face inferior da laje superior: Infiltração e eflorescência
Fonte: DNIT (2010)

Segundo Cánovas (1988, apud Aguiar, 2006),

os carbonatos depositados na superfície do concreto são chamados de eflorescências, que é uma manifestação patológica do mecanismo de lixiviação. A inspeção da lixiviação é visual e deve ser confrontada com outras observações, pois ela está interrelacionada a outros mecanismos, tais como a corrosão e a presença de fissuras. A lixiviação denuncia a porosidade e permeabilidade do concreto.

2.4. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

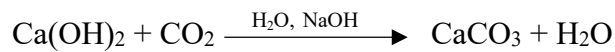
De acordo com Sahuinco (2011) “a patologia das estruturas é o campo da engenharia das construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sintomas de degradação das estruturas.”

Conforme DNIT (2010) as motivações químicas das manifestações patológicas do concreto têm sua gênese em falhas de natureza humana, as quais acontecem já na fase inicial de projeto, perduram na fase de execução do empreendimento e no decorrer de sua vida útil. Erros na análise da agressividade ambiental, escolha do cimento, dosagem e a falta de designação de aditivos, no âmbito de projeto e especificações; problemas com rigidez de

formas, inadequação na vibração e no adensamento e período de cura insuficiente, na fase de construção; a falta de manutenção preventiva e corretiva, no momento de uso, são fatores que isolados ou conjuntamente cooperam para que o concreto torne-se poroso, permeável e fragilizado.

2.4.1. Carbonatação do concreto

Consoante Bertolini (2010) o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera pode combinar-se com os compostos alcalinos que se encontram na solução dos poros do concreto (NaOH , KOH), e na matriz do cimento na forma de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e de silicatos hidratados. Essa reação é chamada de reação de carbonatação.



Segundo Aguiar (2006) a causa do pH do concreto ser de 12,5 é por conta da presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Contudo o pH da solução de equilíbrio é diminuída de 12,5 para 9,4 na medida em que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é consumido pela reação no interior dos poros da pasta de cimento hidratado e é transformado em carbonato de cálcio (CaCO_3). Esta redução tem como consequência o início da corrosão das armaduras.

Ainda de acordo com Aguiar (2006) a espessura do cobrimento de concreto em um elemento estrutural influencia a intensidade de corrosão por carbonatação, portanto esta ataca primeiramente as armaduras em que a camada de cobrimento tem espessura menor, como na figura 11.



Figura 11 -Corrosão causada pela carbonatação
Fonte: Aguiar (2006)

Segundo Branco, Paulo e Garrido (2013) o avanço da frente de carbonatação “d” pode ser estimada pela equação abaixo na qual a variável t é o tempo (anos) e a K é o coeficiente de carbonatação que é dependente da efetiva difusão do CO₂ através do concreto.

$$D = K (t)^{0.5}$$

2.4.2. Reação álcali- agregado

Consoante Bertolini (2010) a reação entre alguns tipos de agregados com íons Na⁺, K⁺ e OH⁻ que estejam dissolvidos na solução dos poros da matriz do cimento resultam em produtos expansivos, os quais deterioram o concreto. O ataque pode acontecer em agregados contendo formas de sílica amorfa, que é chamada de reação álcali-sílica, e agregados com natureza dolomítica, o qual é denominado de reação álcali-carbonatos.

Conforme DNIT (2010) existem bastantes evidencias que podem denunciar que a reação álcali-agregado está acontecendo, contudo, a identificação positiva só pode ser realizada em testes laboratoriais, com o uso de testemunhos extraídos do elemento estrutural analisado. Entre estes indícios podem ser citados, a presença de gel exudando de trincas; umidade persistente e a descoloração do concreto; fragmento em formato de cone, quebrados da superfície do elemento devido a sollicitação advindas da reação e movimentação das partes fraturadas do concreto, que será intensificada com o agravamento do ataque, vide figura 12.



Figura 12 -Reação álcali-agregado em bloco de fundação
Fonte: DNIT (2010)

2.4.3. Fissuração

Conforme DNIT (2010) as trincas e fissuras são formas de evidenciar as manifestações patológicas das estruturas de concreto. Essas são comuns em estruturas de concreto e são consequência da fragilidade do concreto, o qual não resiste a solicitações de tração e colapsa de maneira repentina e explosiva. No entanto características das fissuras como seu número, localização e abertura são pontos relevantes para a deterioração dos elementos estruturais.

DNIT (2004) classifica as fissuras como capilares, médias ou grandes, esta se a sua dimensão da abertura exceder 0,5 mm, será denominada trinca. A fissuras capilares que não afetam a capacidade estrutural do elemento, não necessitam ser registradas, entretanto todas as fissuras em concreto protendido e as fissuras médias, que podem ser distinguidas sem instrumentação, devem ser mapeadas em relação ao comprimento, largura, locação e orientação. Também deve ser observada existência de ferrugem, eflorescência e movimentação das fissuras as quais não estão estabilizadas ou vivas devem ser registradas, em contraposição aquelas que estão estabilizadas ou mortas.

Segundo NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014), na tabela 13.4 são apresentados as Exigências de Durabilidade Relacionadas à Fissuração e à Proteção da Armadura em Função das Classes de Agressividade Ambiental, nessa tabela é relatado que o concreto simples em um ambiente com classe de agressividade ambiental I (CAA I) ou classe de agressividade ambiental IV (CAA IV), não há exigências relativas à fissuração. Por outro lado, o concreto armado em um ambiente com CAA I e no estado-limite de abertura de fissuras (ELS-W), as fissuras devem ser menores ou iguais a 0,4 mm, no entanto em um ambiente com classe de agressividade ambiental II (CAA II) e com classe de agressividade ambiental III (CAA III) no ELS-W, as fissuras devem ser menores ou iguais a 0,3 mm, já em um ambiente com CAA IV e no ELS-W as fissuras devem ser menores ou iguais a 0,2 mm.

DNIT (2004) relata que as fissuras de origem estrutural, são causadas por tensões oriundas de solicitações do carregamento permanente e por carregamento móvel, essas são as Fissuras de Flexão, de Forção Cortante e de Torção. O primeiro é caracterizado por serem verticais, iniciarem na zona de tração máxima e prosseguirem até a área comprimida, em conjunturas em que há deficiência de armaduras, este tipo de fissura pode estender-se além do início da área comprimida. As fissuras de flexão podem ser localizadas nas faces inferiores de vigas contíguas aos centros dos vãos, prolongando-se por meios das superfícies laterais, por outro lado nos apoios, elas geralmente são visíveis nas faces superiores, também se prolongado

nas superfícies laterais. O segundo tipo de fissuras é caracterizado por ter inclinação evidente e por ocorrerem nas almas das vigas, próximo aos apoios, este tipo é mais perigoso que as fissuras de flexão porque podem ser um prenúncio de uma ruptura frágil. O terceiro tipo é semelhante a anterior, todavia com direções contrárias nas faces opostas, vide figuras 13 e 14.

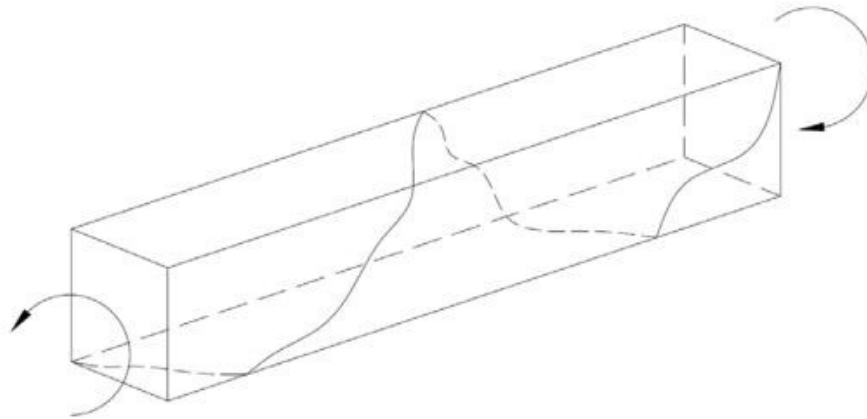
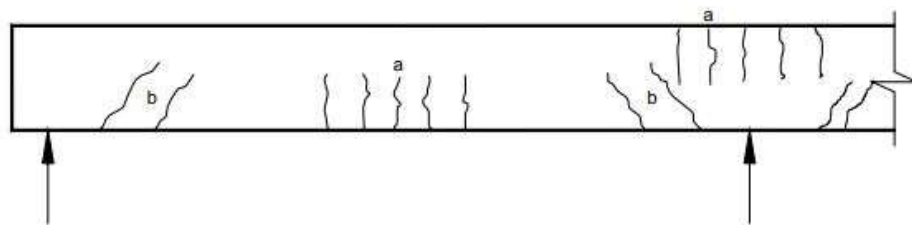


Figura 13 -Fissuração de Torção
Fonte: DNIT (2010)



a - Fissuras de Flexão
b - Fissuras de Cisalhamento

Figura 14 -Fissuração de Flexão e Cisalhamento
Fonte: DNIT (2004)

2.4.4. Corrosão das armaduras

De acordo com DNIT (2004) a corrosão é a deterioração das armaduras das estruturas de concreto como consequência de um processo químico ou eletroquímico, e essas estão protegidas e passivadas contra esta manifestação patológica pelo cobrimento, o qual forma uma barreira física a entrada de agentes externos, e por uma proteção química que ocorre devido à alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto.

Segundo Figueiredo e Meira (2013) a corrosão eletroquímica tem como premissa a formação de uma pilha eletroquímica de corrosão, na qual existe um ânodo que passa o material do estado metálico para o iônico através da reação de oxidação; o cátodo que por meio da reação de redução consome os elétrons advindos do ânodo. Também existe uma ligação metálica, a qual pode ser caracterizada pelo mesmo material metálico e uma diferença de potencial entre eles, contudo o ânodo é mais eletronegativo; uma ligação externa caracterizada pela condução iônica por meio do eletrólito. Na figura 15 podem ser vistas as reações parciais que acontecem nas regiões do ânodo e cátodo, características no meio alcalino como o concreto. A equação da direita faz a representação da oxidação, já a da esquerda a reação redução, o processo completo de corrosão eletroquímica é dá-se pelo conjunto destas reações, e pode ser entendido que o controle sobre todo o processo é obtido através do controle das reações parciais.

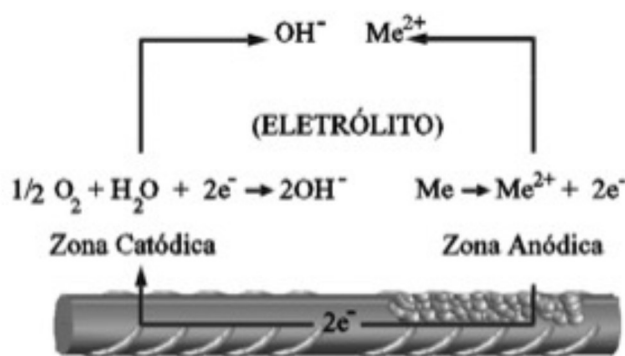


Figura 15 -Representação de uma pilha de corrosão
Fonte: Figueiredo e Meira (2013)

2.4.4.1. Tipos de corrosão

De acordo com Aguiar (2006) a corrosão generalizada ou uniforme acontece porque há perda generalizada da camada passivadora, o que é consequência da frente de carbonatação no concreto e/ou presença em excesso de cloreto. No entanto o efeito de lixiviação resultante da percolação do e/ou lavagem por águas puras ou ligeiramente ácidas, também pode causar este tipo de corrosão.



Figura 16 -Corrosão generalizada, atinge pilar em zona industrial
Fonte: Aguiar (2006)

Já Figueiredo e Meira (2013) relatam outros tipos de corrosão uma delas é a corrosão localizada que é um ataque intermediário entre a corrosão por pites e a corrosão generalizada. Este ataque acontece em áreas mais ou menos extensão do material, que são anódicas se as comparar com as outras. A mudança ou heterogeneidade da composição química do material ou do eletrólito que o circunda podem causar esta manifestação patológica. Outro tipo é a corrosão por pites, a qual tem como característica o seu ataque acontecer em áreas discretas do material, que são mais ativas comparadas as outras partes da superfície. Este tipo acontece comumente devido à atividade de contaminantes que têm a característica de deteriora a camada passivadora em pontos específicos, como o que acontece com a ação de cloretos, vide figura 17.



Figura 17 -Corrosão generalizada desencadeada pela carbonatação do concreto (a) e da corrosão puntiforme desencadeada pela ação dos íons cloreto (b)
Fonte: Figueiredo e Meira (2013)

Outro tipo é a corrosão com formação de fissuras, a qual tem como requisitos para acontecer, além das condições ideais para a corrosão, o metal precisa ser tracionado com tensões importantes. Nesta conjuntura, acontecem fissuras no material que se propagam transversalmente a carga, o que causa rupturas com níveis baixos de tensão. Em estruturas que estejam sob protensão, há a possibilidade de acontecer a corrosão sob tensão, em o surgimento de fissuras no metal (corrosão com fissuração), são favorecidas pela associação de ações eletroquímicas com as mecânicas. (MEIRA, 2017)

DNIT (2010) descreve outros possibilidade de corrosão, a primeira é a corrosão em virtude do ataque de sulfatos, que causam trincas consequentes de reações químicas entre sulfatos, as quais encontram-se no solo, na água marítima ou em elementos que estejam comprometidos no próprio concreto ou cimento, e que penetram em concretos úmidos e permeáveis. O segundo tipo é a corrosão de desgaste por atrito, essa acontece em situações em que há contato e atrito entre dois elementos metálicos sujeitas à vibração, isso pode ser evidenciado em pontes com trechos móveis. O terceiro tipo é a corrosão por corrente errante, também designada por eletrólise, surge em ocasiões em que uma corrente elétrica de uma fonte externa alcança, como exemplo, um elemento estrutural que esteja enterrado. Este tipo que atua de modo muito mais rápido que outros tipos de corrosão, embora seja localizada.

2.4.5. Eflorescência

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, apud DNIT, 2010), “frequentemente, o produto lixiviado interage com o CO₂ presente no ar e forma uma crosta esbranquiçada de carbonato de cálcio na superfície. O fenômeno é conhecido por eflorescência”

2.5. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM MADEIRA

De acordo com Pfeil (2003) vários são os aspectos que podem ser a gênese de degradação de madeira, as quais recebem destaque ataque biológico e ação do fogo. A fragilidade da madeira usada para construção ao atentado de agentes biológicos é influenciada pela camada de tronco em que a peça tem origem, já que o albusno é mais suscetível a biodegradação quando comparado ao cerne; da espécie da madeira; dos fatores do ambiente, relacionada com os ciclos de reuminidação, com o contato com o solo, com a água doce ou água do mar.

Consoante Bertolini (2010) “os mais importantes agentes agressivos para a madeira são os organismos vivos, cujo ataque é chamado de biológico (ou biótico). Estes agentes são fungos, insetos ou bactérias, e sua ação é geralmente possível só na presença de umidade”.

2.5.1. Ataque de Insetos

De acordo com Montana (2000, apud Winkel, 2019) não é raro que peças de madeira que estejam sob a ação de intempéries sofram ataques de insetos xilófagos, os quais retiram nutrientes para sua sobrevivência da madeira, como os besouros e os cupins, que degradam as peças por meio de construção de galerias que diminuem a área que resistirá a solicitações o que pode acarretar colapso abrupto da estrutura.



Figura 18 -Danos causados por ataque de cupins em madeira
Fonte: Castro et al (2016)

2.5.1. Ataque de Fungos

Consoante Bertolini (2010) o ataque fúngico denominado de podridão parda causa uma deterioração em profundidade que primeiramente despolimeriza a celulose, e após este processo, retiram a celulose e a hemicelulose, permanecendo apenas a lignina, a qual oxida-se

na presença de ar e adquire a tonalidade marrom. A deterioração dos polímeros estruturais da madeira acarreta um prejuízo a resistência mecânica e contração da peça.

2.5.1. Ataque de Bactérias

De acordo com Bertolini (2010) o ataque bacteriano, devido ser bastante mais lento do que o ataque de fungos e insetos, é menos relevante. A consequência mais notória é o aumento da permeabilidade da peça devido a deterioração das membranas que existe entre as células. Alguns destes organismos podem viver mesmo em condições anaeróbicas, como uma peça imersa em água.

2.6. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Segundo Lorenzi et al (2012) o emprego de END é uma estratégia promissora para analisar o estado dos elementos estruturais de concreto armado. Por meio do uso desse evita-se que o estudo da resistência acarrete malefícios com alto custo de correção, ou que tenha como resultado um reparo que a interface do componente original tornar-se-á uma área mais suscetível à degradação. Diminuição da vida útil da estrutura é uma consequência da má correção de danos.

De acordo com Sahuinco (2011) os ensaios semi-destrutivos e não destrutivos são usados com o objetivo de colher dados que auxiliem no processo de tomada de decisão, em momentos que não se constata a existência de degradação aparente ou prevista, mas também em situações de alto grau de deterioração, ou em que o desempenho estrutural não seja adequado.

2.6.1. Ensaio de Esclerometria

De acordo com NBR 7584 - Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio (ABNT, 2012),

O princípio do método consiste basicamente em determinar a energia de impactos da massa-martelo sobre a superfície do concreto. A energia de impacto é, em parte, utilizada na deformação permanente provocada na área de ensaio e, em parte, conservada elasticamente, propiciando, ao fim do impacto, o retorno do martelo. Quanto maior a dureza da superfície ensaiada, menor a parcela de energia que se converte em deformação permanente e, por conseguinte, maior deve ser o recuo ou a reflexão do martelo

Segundo Mehta e Monteiro (2008, apud Sahuinco, 2011) o método do esclerômetro de Schmidt tem as características de ser de fácil manuseio, tem baixo custo e é uma forma rápida

para a análise da uniformidade do concreto em estado endurecido in loco e para estimar a resistência, e os danos a estrutura são praticamente inexistentes. Um ponto que deve ser enfatizado é em relação a precisão do ensaio, esta pode variar entre 15% a 20% em ensaios realizados no laboratório, e 25% em ensaios realizados em estruturas de concreto, mas também recomenda-se que o ensaio seja realizado por um profissional capacitado, a fim de que seja mitigada a possibilidade de erros e decisões precipitadas.



Figura 19 -Ensaio esclerométrico
Fonte: Mitre (2005)

2.6.2. Ensaio de Profundidade de Carbonatação

De acordo com Sahuinco (2011) o ensaio de profundidade de carbonatação do concreto é executado em uma superfície que deve ser inicialmente fraturada, em seguida deve ser aspergido indicador químico, o qual é a base de fenolftaleína ou timolftaleína, e posteriormente analisar a coloração que a superfície adquire. Se a cor verificada for violeta o pH é superior a 13, no entanto caso a área não apresente coloração mostrará que o concreto está carbonatado e seu pH é inferior a 9, após a finalização do ensaio é necessário um reparo da área ensaiada. Por meio deste método pode ser evidenciado o avanço da frente de carbonatação, este ensaio é recomendado pelo RILEM 1988 – Recommendation CPC 18.



Figura 20 -Ensaio de profundidade de carbonatação
Fonte: Mitre (2005)

2.6.3. Ensaio de ultrassom

De acordo com NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT, 2019) o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas em concreto pode ser usado a fim de obter estimativas de fissuras; analisar a variação de suas propriedades com o passar dos tempos; mensurar o seu módulo de elasticidade dinâmico, através de ondas longitudinais e/ou transversais e conseguir estimativas da resistência à compressão, por meio o emprego de curva de correlação a qual é obtida por meio de ensaio pormenorizado na ABNT NBR 5739.

2.6.4. Ensaio com pacômetro

Consoante Santos (2008) as armaduras podem ser encontradas e a espessura do cobrimento estimada por meio do emprego de aparelhos que detectam as armaduras, os quais recebem a designação de pachometer ou covermeter. Estes têm seu funcionamento atrelado a leitura da interação entre as barras e a frequência de um campo eletromagnético originado pelo aparelho. Através dos dados auferido, como a intensidade e frequência, torna-se possível estimar o diâmetro e o cobrimento das barras, vide figura 21.



Figura 21 -Emprego de pacômetro em estrutura
Fonte: Mitre (2005)

3. METODOLOGIA

Nesta subseção serão abordados os procedimentos metodológicos usados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo de utilizar Ensaios Não Destrutivos para a analisar e inspecionar uma ponte híbrida de concreto armado e madeira. Para tanto será realizado o ensaio avaliação da dureza superficial com a utilização de esclerômetro de reflexão e, também, ensaio de determinação de profundidade de carbonatação. Dessa forma, este trabalho enquadra-se em na categoria de pesquisa quantitativa, na medida em que serão obtidos dados para a caracterização dos elementos estruturais ensaiados.

Por outro lado, foi realizado um levantamento bibliográfico a respeito dos tópicos relacionados com o tema do trabalho, logo, este também pode ser classificado como pesquisa exploratória.

3.2. OBJETO DE ANÁLISE

O objeto analisado é uma ponte híbrida de concreto armado e madeira localizada na travessa Santa Terezinha, em Estância-SE (figura 22), cidade localizada na microrregião do litoral sul do Estado de Sergipe, distante 70 km da capital Aracaju-SE.



Figura 22 -Ponte que será objeto de estudo
Fonte: Próprio autor (2021)

A estrutura tem cerca de 28 metros de comprimento, possui 7 elementos de fundação de concreto armado, com 3 pilares de concreto armado sobre cada um desses elementos. A superestrutura é constituída por peças da madeira e componentes metálicos responsáveis pelas ligações. Por conta de estar em uma propriedade privada, informações como ano de construção da estrutura e dados de projeto não ser obtidos.

3.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho é constituído de um levantamento bibliográfico que abordou os conceitos iniciais sobre pontes; inspeção, diagnóstico e prognóstico de estruturas; os principais mecanismos de degradação do concreto; manifestações patológicas em concreto e madeira e ensaios não destrutivos. Estes tópicos foram relatados a fim de subsidiar o entendimento dos leitores e a realização do trabalho.

Após estes passos iniciais foram realizados os processos de análise em campo do objeto de estudo.

3.3.1. Inspeção

Antes da realização dos ensaios não destrutivos, os elementos estruturais da ponte foram inspecionados a fim de serem determinadas as possíveis manifestações patológicas existentes. Em seguida, foram realizados diagnóstico e prognóstico, como mostra o quadro 1.

SUPERESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
MESOESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
INFRAESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
ELEMENTOS DE MADEIRA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico

Quadro 1 -Quadro para inspeção da estrutura
Fonte: Próprio autor (2021)

3.3.2. Esclerometria

Este ensaio observou os critérios, metodologias e parâmetros impostos pela ABNT NBR 7584:2012 - Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão- Método de ensaio. Para a execução deste ensaio utilizou-se um esclerômetro de reflexão, bigorna especial de aço, dotada de uma guia de aço e um disco ou prisma de carborundum. O aparelho utilizado no ensaio foi disponibilizado pelo Instituto Federal de Sergipe (IFS) – campus Estância, e trata-se de um esclerômetro analógico schmidt – tipo N, vide figura 23.



Figura 23 -Esclerômetro analógico schmidt – tipo N
Fonte: Solotest (2021)

A NBR 7584:2012 estabelece alguns procedimentos que devem ser realizados para que os resultados obtidos sejam mais adequados.

- a. Deve ser realizada uma verificação do esclerômetro em um momento anterior à sua utilização ou a cada 300 impactos realizados em uma mesma inspeção, esta verificação será feita com o uso da bigorna especial de aço, e deve ter dureza Brinell de 5000 MPa e índices esclerométricos de 80. Devem ser imprimidos sobre a bigorna no mínimo 10 impactos, e o aparelho será considerado adequado para o uso se o índice esclerométrico médio aferidos for maior ou igual a 75 e os índices esclerométricos individuais obtidos não devem ter variação de ± 3 em relação ao índice médio, caso um destes eventos ocorra os aparelhos deve ser ajustado;
- b. As superfícies que serão ensaiadas devem ser secas ao ar, limpas e planas. Devem ser evitadas áreas que apresentem irregularidades, aspereza e curvaturas. Em áreas úmidas e carbonatadas recomenda-se que sejam preparadas e caso haja necessidade devem ser usados coeficientes de correlação;

- c. A área do ensaio deve ser adequada através do uso do disco ou prisma de carborundum, que será empregado para polimento com movimentos circulares. Após este processo deve ser retirada a seco os resquícios de poeira e pó;
- d. Deve-se dar preferência a áreas que estejam localizadas em faces verticais dos elementos ensaiados, e afastada das regiões comprometidas por segregação, exsudação, concentração excessiva de armaduras, juntas de concretagem, cantos e arestas, a área de ensaio deve ter distância mínima de 50 mm destes dois últimos;
- e. A área de ensaio deve estar dentro dos intervalos de 8000 mm² (90 mm x 90 mm) e 40000 mm² (200 mm x 200 mm);
- f. Recomenda-se ao menos uma área de ensaio por elemento, contudo caso o elemento apresente grande volume de concreto deve ser analisada no mínimo duas áreas, em faces opostas;
- g. Em cada área deve ser imprimido 16 impactos, e não é permitido realizar mais de um impacto em um mesmo ponto, os impactos devem estar distribuídos de maneira uniforme, logo recomenda-se fazer um desenho reticulado, e identificar os quadrantes, vide figura 24.

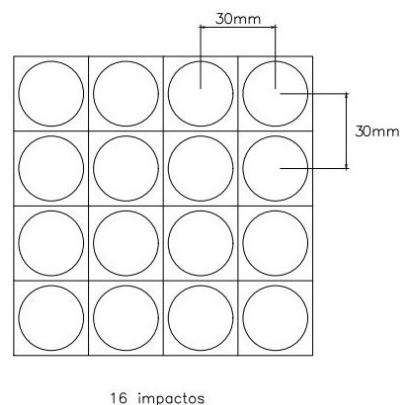


Figura 24 -Desenho reticulado
Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012)

- h. Devem ser evitados elementos com dimensões menores do que 100 mm na direção do golpe, porque provocam ressonância, vibração que dissipam a energia do impacto, contudo caso seja realmente necessário realizar o procedimento em uma peça com dimensão menor que 100 mm, recomenda-se que seja colocado um apoio na face oposta à superfície ensaiada;
- i. O ensaio deve ser realizado no local que tenha maior inércia no elemento, vide figura 25.

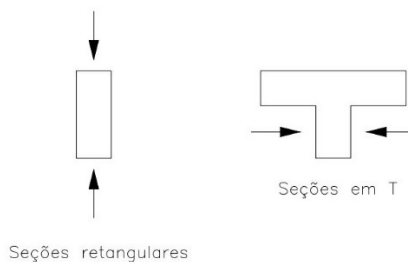


Figura 25 -Locais recomendados para a execução do ensaio
Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012)

- j. O resultado do ensaio será obtido através do cálculo da média aritmética entre os 16 valores de índices esclerométricos relativos à cada área de ensaio, deve ser desconsiderado os valores que diferirem em mais de 10% da média obtida, em seguida é necessário recalcular a média;
- k. O índice esclerométrico médio final deve advir de ao menos valores individuais, se for desconsiderado uma quantidade que impossibilite isto, o ensaio correspondente a área analisada deve ser descartado;
- l. O índice esclerométrico médio efetivo de cada área ensaiada será obtido através da fórmula:

$$I_{E\alpha} = k \cdot I_E$$

$I_{E\alpha}$: Índice esclerométrico médio efetivo

I_E : Índice esclerométrico médio

K: Coeficiente de correção de índice esclerométrico, obtido através da verificação do aparelho.

3.3.3. Ensaio de carbonatação

De acordo com Sahuinco (2011), o ensaio de profundidade de carbonatação do concreto é executado em uma superfície que deve ser inicialmente fraturada, em seguida deve ser aspergido indicador químico, o qual é à base de fenolftaleína ou timolftaleína, e posteriormente analisar a coloração que a superfície adquire. Se a cor verificada for violeta, o pH é superior a 13, no entanto, caso a área não apresente coloração, mostrará que o concreto está carbonatado e seu pH é inferior a 9. Após a finalização do ensaio é necessário um reparo da área ensaiada.

A proporção seguida será da dissertação de Cadore (2008), que utilizou 30 g de álcool etílico absoluto, 70 g de água destilada e 1 g de fenolftaleína em pó, para o preparo da solução.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta subseção serão abordados os resultados da inspeção realizada no objeto de estudo e serão mostrados os dados obtidos no ensaio de esclerometria e carbonatação.

4.1. INSPEÇÃO

A fim de proceder com a coleta inicial de dados, foi realizada uma inspeção visual nos elementos constituintes da estrutura: infraestrutura, mesoestrutura e elementos de madeira. Tais elementos estão mostrado na figura 26 a seguir.



Figura 26 -Ponte objeto de estudo
Fonte: Próprio autor (2021)

4.1.1. Infraestrutura

O comprimento e largura dos elementos de fundação (EF) serão apresentadas a seguir: EF 01 (452x86 cm), EF 02 (445x56 cm), EF 03 (456x56 cm), EF 04 (437x55 cm), EF 05 (440x56 cm), EF 06 (450x85 cm) e EF 07 (476x56 cm), a figura 27 mostra um esquema da posição dos componentes da infraestrutura.

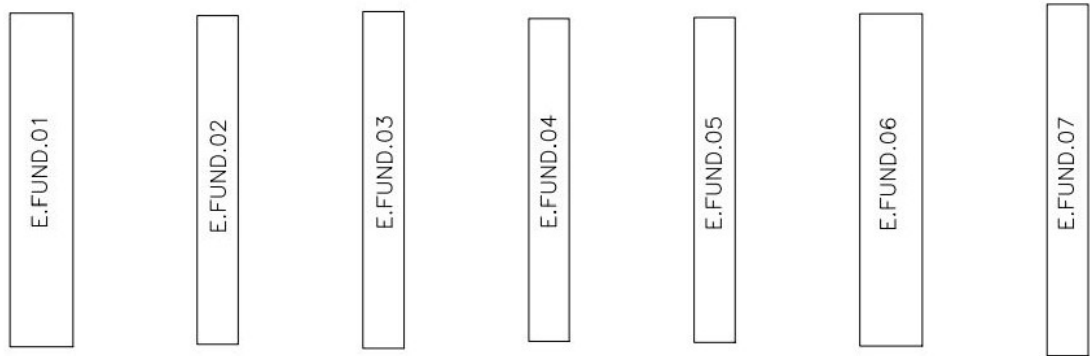


Figura 27 -Esquema, em planta, dos elementos de fundação
Fonte: Próprio autor (2021)

Através da inspeção realizada na infraestrutura da ponte pôde ser constatado que o EF 03 apresenta uma fratura. Esta pode ser resultado de tensões internas provocadas pela camada expansiva de óxido de ferro proveniente da corrosão das armaduras. Além desta fratura existe vegetação crescendo no entorno do elemento. Tal manifestação patológica pode possibilitar a entrada de agentes agressivos no elemento estrutural, vide figura 28



Figura 28 -Sapata corrida EF3
Fonte: Próprio autor (2021)

As demais sapatas apresentam muita sujeira na sua superfície, contudo entre a sapata corrida EF4 e EF5 há acúmulo de água parada e bastante vegetação, como pode ser visto na figura 29.



Figura 29 -Água parada entre sapata 04 e 05
Fonte: Próprio autor (2021)

4.1.2. Mesoestrutura

A figura 30 mostra um esquema detalhando a ordem, posição e as dimensões dos pilares. Pode ser percebido que trata-se de pilares com seções retangulares e que têm a face de maior momento de inércia direcionadas no mesmo sentido.

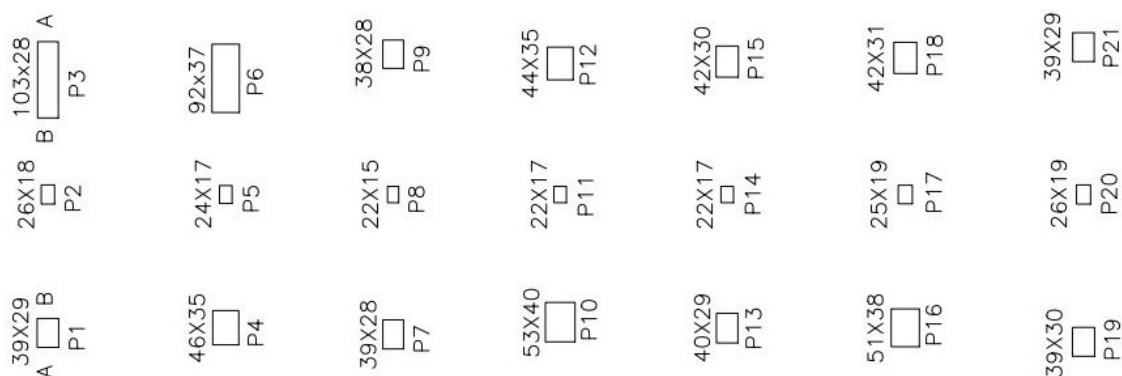


Figura 30 -Esquema de mesoestrutura
Fonte: Próprio autor (2021)

Por meio da inspeção realizada nos elementos da mesoestrutura pôde ser constatado que a maioria dos pilares apresentam exposição de armaduras e corrosão. Na figura 31 é evidenciado nos pilares P9, P11 e P12 disgregação, corrosão e exposição das armaduras. A disgregação ocorre devido a tensões internas causadas pela expansão do óxido de ferro produto da corrosão das armaduras. A pequena camada de cobrimento também pode ter facilitado a entrada de agentes agressivos. Através de uma medição com um paquímetro puderam ser mensurados nos pilares P11, P12 e P9, respectivamente, os cobrimentos de 1,38 cm, 3,97 cm e 1,12 cm. De acordo com a NBR 6118:2014 o cobrimento recomendado para pilares na zona respingos de maré é de 50 mm.



Figura 31 -Exposição de armadura e corrosão, pilar P11 (A), pilar P12 (B) e pilar P9 (C)
Fonte: Próprio autor (2021)

4.1.3. Elementos de madeira

A superestrutura é composta por elementos de madeira os quais são, longarinas, transversinas e vigas de apoio para tabuleiro. Mediante a realização da inspeção nas peças que compõem a superestrutura puderam ser encontradas transversinas, longarinas e outras peças com perda de seção resistente, por conta do ataque de cupins, que são insetos xilófagos. Na figura 32 (A) e (B) é possível verificar uma perda de seção resistente. Caso a perca continue a acontecer a peça não conseguirá resistir às solicitações que foi dimensionada e pode culminar no rompimento da peça.

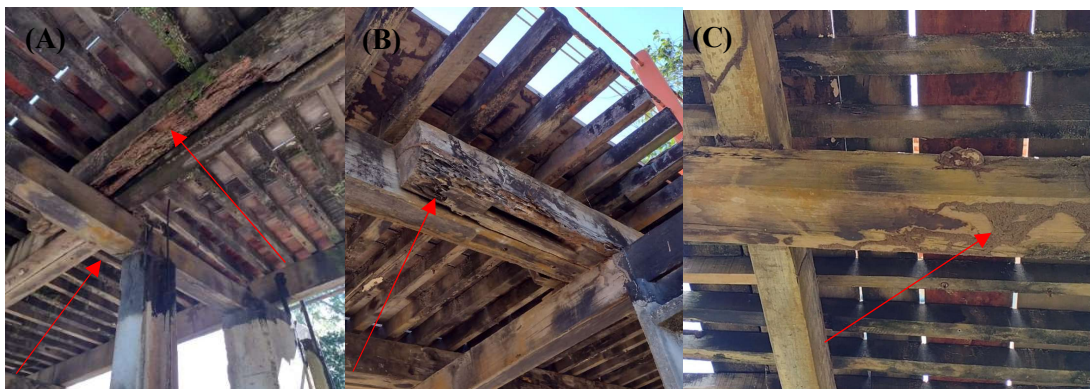


Figura 32 -Ataque de insetos xilófagos em peças de madeira, longarina sobre o P5 (A), longarina sobre o P7 (B) e transversina sobre o EF 01 (C)
Fonte: Próprio autor (2021)

Além disso também foram encontradas, acima do EF 07, vigas que servem de apoio ao tabuleiro com presença de fungos empoladores e peças com ataque de cupins, como pode ser visto na figura 33. Fungos empoladores se proliferam na madeira devido a existência de umidade, contudo eles não deterioram a madeira apenas causam prejuízo estético.



Figura 33 -Ataque de fungos empoladores
Fonte: Próprio autor (2021)

4.2. ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

O ensaio de esclerometria foi realizado de acordo com a metodologia e critérios impostos pela NBR 7584:2012. O aparelho utilizado foi um esclerômetro analógico schmidt – tipo N, o qual imprime sobre a superfície ensaiada uma energia de percussão de 2,207 N.m (0,225kg.m). A escolha das superfícies que foram ensaiadas observou as recomendações da normatização, que orienta que sejam evitadas áreas com irregularidades, aspereza, curvaturas, áreas carbonatadas e outros tipos de comprometimento, logo os pilares P3, P7, P9, P12 e P15 não foram ensaiados por apresentarem irregularidades na sua superfície. Já os pilares centrais, que podem ser vistos na figura 34, também não foram ensaiados por apresentarem dimensões insuficientes para comportar a distância de 50 mm das arestas e o desenho do reticulado que mede 12x12 cm.

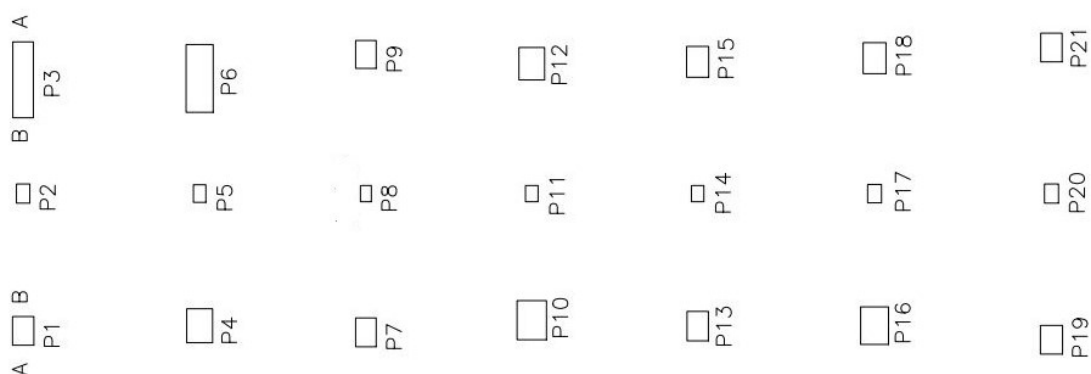


Figura 34 -Croqui de mesoestrutura com faces A e B
Fonte: Próprio autor (2021)

Após selecionar os pilares que seriam ensaiados, foi necessário realizar o polimento da superfície com disco de carborundum com movimentos enérgicos e circulares. Em seguida, os

resquícios de poeira foram retirados a seco. Alguns elementos estruturais selecionados puderam ser ensaiados pelo menos em 3 regiões diferentes, estas sendo a base, o meio e o topo, contudo o topo de alguns pilares não pôde ser ensaiado, por apresentar irregularidades.

A normatização recomenda que sejam imprimidos 16 impactos de forma homogênea em cada área ensaiada, para que isso fosse possível foi desenhado um reticulado com 16 zonas. O ensaio foi realizado na face externa dos pilares, a qual é designada de face A na figura 34. Isto obedece às orientações da norma, a qual recomenda que a face escolhida deve ser a que tenha maior momento de inércia, a figura 35 exemplifica a realização do ensaio.



Figura 35 -Realização de ensaio
Fonte: Próprio autor (2021)

Após a realização de cada golpe na superfície, o aparelho fornece um índice esclerométrico (I_E). Os 16 I_E de cada área foram anotados e foi feita a média aritmética. A norma cita que os valores que diferirem mais do que 10% da média devem ser descartados e, em seguida, deve ser recalculada a média. Com o novo valor I_E médio de cada região foi utilizado o gráfico da figura 36, a fim de obter-se as estimativas das resistências à compressão de cada área ensaiada.

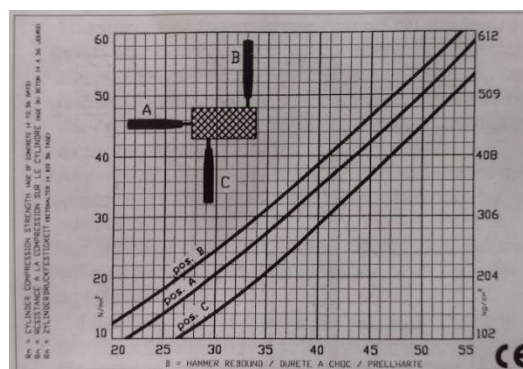


Figura 36 -Gráfico de correlação
Fonte: Proceq SA (2021)

Os resultados dos ensaios podem ser vistos na tabela 1. Nela estão compilados os valores das médias das resistências à compressão, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Foram realizados um total de 23 ensaios, sendo 2 nos pilares P1, P4, P10, P16, P18, P19 e P21; 3 ensaios nos pilares P6 e P13. As outras áreas não foram ensaiadas, por apresentarem irregularidades.

Pilar	Área	Resistência à compressão estimada			
		Fc (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Pilar 1	Base	31	26	5	19,23%
	Meio	21			
Pilar 4	Base	45	44	1	2,27%
	Meio	43			
Pilar 6	Base	38	38,67	2,49	6,45%
	Meio	36			
	Topo	42			
Pilar 10	Meio	60	60	0	0%
	Topo	60			
Pilar 13	Base	47	52	5,72	10,99%
	Meio	49			
	Topo B	60			
Pilar 16	Base	59	59	0	0%
	Meio	59			
Pilar 18	Meio	54	56,50	2,50	4,42%
	Topo	59			
Pilar 19	Base	33	45	12,00	26,67%
	Meio	57			
Pilar 21	Base	54	57,67	2,62	4,55%
	Meio	59			
	Topo	60			

Tabela 1 -Resultados de ensaio de esclerometria
Fonte: Próprio autor (2021)

Através da análise dos resultados pode ser constatado que o pilares que apresentaram menor e maior valor de resistência à compressão foram os pilares P1 e P10 com, respectivamente, os valores de 26 MPa e 60 MPa. Percebe-se que existe uma grande variação de resistência à compressão entre os valores na base, médio e topo dos pilares. No pilar P19 esta discrepância chega a 42% e isso pode ser causado por prováveis percussões terem sido

imprimidas sobre agregados, por diferença na consistência do concreto entre betonadas ou por diferenças de vibração do concreto.

Os dados de dispersão também podem ser analisados de acordo com a norma ASTM C 805 – 2018, que relata que o desvio padrão resultante dos valores de resistência à compressão deve ser de até 2,50 unidades. Através da análise da tabela 1 pode ser visto que os pilares P1, P13, P19 e P21 têm valores superiores a este parâmetro.

Na norma britânica BS EN 12504-2: 2012 há um parâmetro que diz que para um concreto ser considerado homogêneo e de boa qualidade, desse deve advir um coeficiente de variação no intervalo de 2% a 15%, portanto os pilares P1 e P19 não podem ser considerados de boa qualidade.

4.3. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Por conta da estrutura estar em uma propriedade privada, não puderam ser executadas as fraturas iniciais para aspergir a solução de fenolftaleína. Contudo, a solução foi borrifada em fraturas pré-existent nos elementos estruturais, vide figura 37.



Figura 37 -Ensaio de carbonatação
Fonte: Próprio autor (2021)

Após aspersão do indicador químico na área fraturada deve ser analisada a coloração que a superfície adquire. Se a cor verificada for violeta, o pH é superior a 13, no entanto caso a área não apresente coloração mostrará que o concreto está carbonatado e seu pH é inferior a 9. Como pode ser visto na figura 37, as regiões continuaram incolores, portanto, elas estão carbonatadas. Isso era uma possibilidade já que a carbonatação é uma das manifestações patológicas que causa

a despassivação das armaduras, e como consequência ao início da corrosão. Já que os elementos já apresentavam este quadro o ensaio confirmou que a região estava carbonatada.

5. CONCLUSÃO

A partir das informações apresentadas neste trabalho pode-se concluir que a utilização de ensaios não destrutivos se apresenta como ferramenta útil para obtenção de dados quando da necessidade de diagnosticar estruturas. Já que fornecem dados sobre o estado da estrutura e o nível de deterioração, a fim de que medidas sejam adotadas de maneira prematura e as manifestações patológicas não se desenvolvam até um estado mais grave. Os dados qualitativos foram obtidos através de inspeção preliminar e pelo emprego do ensaio de carbonatação. Por outro lado, os dados quantitativos foram obtidos por meio do ensaio de esclerometria.

O ensaio de esclerometria mostrou-se um método bastante simples, rápido e eficiente para a mensuração da resistência à compressão do concreto e da homogeneidade dos elementos da estrutura. Mesmo não possuindo os valores de projeto de resistência à compressão, foi possível determinar que o concreto de alguns pilares não atendeu aos requisitos normativos.

Já ensaio de carbonatação manifestou-se como uma ferramenta confiável para determinar se o elemento está carbonatado. Por meio da inspeção pôde ser constatado que alguns elementos apresentavam grau elevado de deterioração.

Constou-se que para a obtenção de outros parâmetros para a avaliação de estruturas de concreto armado, outros ensaios não destrutivos são necessários. A fim de contribuir com o maior número de dados para a análise da estrutura. Mas também podem ser extraídas amostras para fazer comparação com os resultados dos ensaios destrutivos. Para que o ensaio de carbonatação seja apresentado de uma maneira mais prática, aberturas de fraturas na estrutura se faz necessária, o que não foi possível neste trabalho.

Este trabalho contribui para enfatizar a importância de inspeções periódicas, realização de diagnósticos e manutenção em estruturas. Ele poderá ser utilizado como meio para que outros pesquisadores obtenham informações relativa aos mecanismos de degradação das estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, José Eduardo de. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 2006. Dissertação (Mestre em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C805 / C805M-18**: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais: Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5674**: Manutenção de edificações: Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16230**: Inspeção de estruturas de concreto: Qualificação e certificação de pessoal: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584**: Concreto endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, DNIT, 2004. 253p.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de recuperação de pontes e viadutos rodoviários**. Rio de Janeiro, DNIT, 2010, 159p.
- BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. v. 2. ISBN 978-85-7975-01006
- BRANCO, Fernando; PAULO, Pedro; GARRIDO, Mário. **Vida Útil na Construção Civil**. Boletim Técnico nº 04, Mérida, Mex.: Alconpat Brasil, 2013.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12504-2**: Testing concrete in structures. Non-destructive testing. Determination of rebound number. 2012.

CADORE, William Widmar. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento em protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CASTRO, Vinicius Gomes et al. **Deterioração e preservação da madeira**. Mossoró: Editora Universitária (EdUFERSA), 2018. ISBN 978-85-5757-089-4

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. Boletim Técnico nº 06, Mérida, Mex.: Alconpat Brasil, 2013.

HELENE, Paulo Roberto do Lago . **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Dissertação (Professor livre docente) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

LORENZI, et al. **Diagnóstico de Estruturas de Concreto através da Aplicação de Ensaio Não Destrutivos**. 2012.

Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Luiz-Carlos-Silva-Filho/publication/283795770_Diagnostico_de_estruturas_de_concreto_atraves_da_aplicacao_de_ensaios_nao_destrutivos/links/56477bea08ae451880ac3c7e/Diagnostico-de-estruturas-de-concreto-atraves-da-aplicacao-de-ensaios-nao-destrutivos.pdf. Acesso em: 09 ago. 2021

LORENZI, et al. **Inspeção de obras através da aplicação de ensaios não destrutivos**. 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/337547676_Inspecao_de_obras_atraves_da_aplicacao_de_ensaios_nao_destrutivos. Acesso em: 13 ago. 2021

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.2. ed. ISBN 978-85-212-1279-9

MEDEIROS, Marcelo H. F.; ANDRADE, Jairo José de O.; HELENE, P. R. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2021

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, Diagnóstico e Prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017. ISBN 978-85-63406-62-0

MITRE, Marcos Pedrosa. **Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto**. 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle . **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos editora S.A, 2003. 6 ed.

PFEIL, Walter. **Pontes em concreto armado**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos, 1979. ISBN 85-216-0035-6.

PROCEQ SA. **Operating manual**: concrete test hammer. 2015.

SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **Utilização de métodos não destrutivos e semidestrutivos na avaliação de pontes de concreto**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTOS, José Manuel Martins Neto dos. **Avaliação da integridade estrutural de pontes de Betão- o caso da ponte Nossa Senhora da Guia**. 2008. Dissertação (Mestre Estruturas de Engenharia Civil) –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

SOLOTEST. **Esclerometro tipo schimidt (tipo N)**. 2021.

Disponível em: [https://solotest.com.br/produtos/esclerometro-por-rebote-schimidt-\(tipo-n/3.453.001](https://solotest.com.br/produtos/esclerometro-por-rebote-schimidt-(tipo-n/3.453.001). Acesso em: 15 ago. 2021

TUTIKIAN, Bernando; PACHECO, Marcelo. **Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil**. Boletim Técnico nº 01, Mérida, Mex.: Alconpat Brasil, 2013.

WINKEL, Rodolfo Luis. **Análise das manifestações patológicas em pontes na cidade de Teutônia/RS**. 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

APENDICE A – Quadro para a inspeção visual

SUPERESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
MESOESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
INFRAESTRUTURA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico
ELEMENTOS DE MADEIRA		
Manifestação Patológica	Local	Diagnóstico