

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Pedro Augusto Ribeiro Da Fonseca

**ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE**  
**ESTRUTURAS EM CONCRETO: EXEMPLOS E INTERPRETAÇÃO DE**  
**RESULTADOS**

Santa Maria, RS

2024

Pedro Augusto Ribeiro Da Fonseca

**ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO: EXEMPLOS E INTERPRETAÇÕES DE  
RESULTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS

2024

**Pedro Augusto Ribeiro Da Fonseca**

**ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO: EXEMPLOS E INTERPRETAÇÕES DE  
RESULTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2024.

---

**André Lübeck, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)**

---

**Eduardo Steffler Werner, Eng. civil**

Santa Maria, RS  
2024

Dedico este trabalho à minha mãe, Francieli Aparecida Klein.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Francieli Aparecida Klein e Ademir Ribeiro Da Fonseca, que nunca deixaram de me incentivar e me proporcionar possibilidades para seguir em busca dos meus sonhos.

Um agradecimento em especial à minha mãe Francieli por todo o apoio, incentivo e ajuda para chegar até aqui, por ser meu maior exemplo de caráter e princípios.

À minha namorada Carolina Dacroce Dariva pelas cobranças diárias, apoio, compreensão e companheirismo nessa jornada.

Aos meus sogros, Élcio e Maristela pelos ensinamentos, conselhos e apoio.

Aos meus colegas e amigos de engenharia, pela amizade e parceria ao longo desses anos de graduação. Em especial ao Ricardo, Marcel, Marafiga, Bruna e Pavinato.

Ao meu orientador, professor André Lübeck que tenho grande admiração, obrigado pela disponibilidade, incentivo e ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria que me proporcionou muito mais do que eu esperava, superou minhas expectativas em todos os sentidos.

Finalmente, só tenho a agradecer à Deus por toda essa jornada, por me guiar nos momentos difíceis para estar aqui hoje.

## RESUMO

### ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO: EXEMPLOS E INTERPRETAÇÕES DE RESULTADOS

AUTOR: Pedro Augusto Ribeiro Da Fonseca

ORIENTADOR: André Lübeck

Este trabalho apresenta alguns métodos de avaliação de estruturas de concreto armado, com foco nos ensaios destrutivos e não destrutivos. O principal objetivo é fornecer um entendimento abrangente sobre a caracterização estrutural do concreto armado, destacando a importância de técnicas de inspeção eficazes para garantir a durabilidade e a segurança das construções. A justificativa do estudo enfatiza a necessidade de metodologias precisas para identificar problemas estruturais e implementar medidas corretivas eficazes. Dessa maneira, abordam-se aqui os principais ensaios utilizados para caracterização de estruturas com foco na conservação e outros fatores que causam deterioração ao longo dos anos. A fundamentação teórica explora os principais conceitos e técnicas utilizadas na avaliação de estruturas de concreto armado. Na apresentação e discussão dos dados, o estudo baseou-se em referências de diversos autores, que realizaram ensaios em diferentes estruturas, analisando e interpretando os resultados de acordo com os parâmetros estabelecidos nas normas. Este trabalho apresenta exemplos práticos da aplicação de procedimentos e técnicas, explicando como e onde utilizá-los, além de detalhar a finalidade de cada ensaio, ilustrados de forma clara e precisa com estudos de caso concretos.

**Palavras-chave:** Avaliação de estruturas de concreto. Ensaio destrutivo. Ensaio não destrutivo.

## **ABSTRACT**

### **DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS FOR CHARACTERIZING CONCRETE STRUCTURES: EXAMPLES AND INTERPRETATIONS OF RESULTS**

AUTHOR: Pedro Augusto Ribeiro Da Fonseca

ADVISOR: André Lübeck

This paper presents some methods for evaluating reinforced concrete structures, focusing on destructive and non-destructive tests. The main objective is to provide a comprehensive understanding of the structural characterization of reinforced concrete, highlighting the importance of effective inspection techniques to ensure the durability and safety of buildings. The justification for the study emphasizes the need for accurate methodologies to identify structural problems and implement effective corrective measures. It addresses the main tests used to characterize structures with a focus on conservation and other factors that cause deterioration over the years. The theoretical basis explores the main concepts and techniques used in the evaluation of reinforced concrete structures. In the presentation and discussion of the data, the study was based on references from several authors, who performed tests on different structures, analyzing and interpreting the results according to the parameters established in the standards. This paper presents practical examples of the application of procedures and techniques, explaining how and where to use them, in addition to detailing the purpose of each test, illustrated clearly and precisely with concrete case studies.

**Keywords:** Evaluation of concrete structures. Destructive tests. Non-destructive tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Realização de extração de testemunho do pilar da edificação principal antiga.....	23
Figura 2 - Realização de extração de testemunho do pilar .....	24
Figura 3 - Local de extração de testemunho reconstituído .....	24
Figura 4 - Testemunho em prensa hidráulica pronto para ser rompido.....	26
Figura 5 - Máquina SATEC com o extensômetro posicionado no corpo de prova.....	28
Figura 6 - Configuração do ensaio .....	28
Figura 7 - Ensaio de módulo de elasticidade .....	32
Figura 8 - Abertura de janelas no pilar .....	35
Figura 9 - Aspecto geral da Edificação após o Incêndio .....	36
Figura 10 - Reservatório de água de Água Santa – Tabuleiro do Norte (CE).....	37
Figura 11 - Reservatório de Água da Lagoa do Peixe – Tabuleiro do Norte (CE) .....	37
Figura 12 - Abertura de janela de inspeção .....	38
Figura 13 - Controle de Fissuras na janela de Inspeção .....	38
Figura 14 - Aplicação de Esclerômetro .....	39
Figura 15 - Esclerômetro Manual.....	40
Figura 16 - Exemplo de área de ensaio.....	41
Figura 17 - Realização de ensaio de esclerometria em Pilar de Concreto Armado.....	42
Figura 18 - Organograma do procedimento de avaliação de estruturas de concreto armado...	43
Figura 19 - Diagrama de operação do esclerômetro de reflexão .....	44
Figura 20 - Edificação estudada .....	45
Figura 21 - Ensaio de pacometria em pilar de concreto .....	46
Figura 22 - Organograma de ensaio de pacometria .....	47
Figura 23 - Instrução do Ensaio de Pacometria através da figura .....	48
Figura 24 - Ensaio de pacometria em pilares .....	49
Figura 25 - Organograma de ensaio de pacometria .....	49
Figura 26 - Organograma de ensaio de pacometria .....	50
Figura 27 - Execução do ensaio de penetração de pino.....	52
Figura 28 - Ensaio realizado na viga e na laje da obra B .....	53
Figura 29 - Preparação das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar.....	54
Figura 30 - Modelo de aparelho utilizado para os ensaios .....	55
Figura 31 - Aparelho de ensaio de absorção de água por capilaridade .....	56
Figura 32 - Equação utilizada para cálculo do índice de absorção de água por capilaridade ..	57

Figura 33 - Ponte Juscelino Kubitschek, Aracati, Ceará .....	58
Figura 34 - Observação e identificação das anomalias, e corrosão visível do aço.....	59
Figura 35 - Esquema da medida do potencial de corrosão .....	59
Figura 36 - Resultado do Ensaio de Potencial de Corrosão .....	61
Figura 37 - Organograma de ensaio de potencial de corrosão .....	62
Figura 38 - Aplicação de fenolftaleína em testemunhos .....	64
Figura 39 - Medição da frente de carbonatação em testemunhos de concreto .....	65
Figura 40 - “Pull Off” Test: (a) Ensaio de arrancamento e (b) equipamento de ensaio .....	66
Figura 41 - Correlação entre os ensaios de “Pull Off” e resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos .....	67
Figura 42 - Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica .....	68
Figura 43 - Câmera termográfica FLIR P65.....	69
Figura 44 - Detecção de uma infiltração não visível .....	70
Figura 45 - Realização de ensaio de ultrassonografia em Pilar de Concreto Armado .....	73
Figura 46 - Representação de um circuito de um pulso ultrassônico .....	74
Figura 47 - Organograma do procedimento de avaliação de estruturas de concreto armado...	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de $k_2$ em função do efeito do broqueamento em função do diâmetro do testemunho.....	21
Tabela 2 - Valores de $k_1$ .....	21
Tabela 3 - Classificação de condição no Ensaio de Potencial de Corrosão .....	60

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standart</i>
CEN	<i>Comitê Europeu de Normalização</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
dt	Diâmetro do Testemunho
ED	Ensaio Destrutivo
EN	<i>Norme Européenne</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrognênico
TI	Termografia por Infravermelho
<i>f<sub>ck</sub></i>	Resistência Característica à Compressão do Concreto
<i>f<sub>ck, est</sub></i>	Resistência Característica Estimada à Compressão do Concreto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	15
<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO ARMADO.....	17
<b>2.1.1 Resistência Mecânica.....</b>	<b>17</b>
2.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS .....	19
<b>2.2.1 Fatores de correção .....</b>	<b>19</b>
2.2.1.1 Fator de Correção para Diâmetro .....	20
2.2.1.2 Fator de Correção para Danos de Extração .....	20
2.2.1.3 Fator de Correção para Relação Dimensional .....	21
2.2.1.4 Consideração da Resistência Medida em Relação ao $f_{ck}$ .....	22
<b>2.2.2 Extração de testemunhos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Compressão .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4 Tração.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.5 Módulo de elasticidade.....</b>	<b>29</b>
2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	32
<b>2.3.1 Abertura de Janelas de Inspeção .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2 Esclerometria .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.3 Pacometria.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.4 Ensaio de Penetração (Windsor).....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.5 Ensaio de Permeabilidade ao Ar ou à Água.....</b>	<b>53</b>
2.3.5.1 Ensaio de Permeabilidade ao Ar.....	53
2.3.5.2 Absorção de água por capilaridade.....	56
<b>2.3.6 Potencial de Corrosão .....</b>	<b>57</b>
<b>2.3.7 Ensaio de Profundidade de Carbonatação.....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.8 Ensaio de Puxamento (Pull-off).....</b>	<b>65</b>
<b>2.3.9 Ensaio de Resistividade Elétrica .....</b>	<b>67</b>
<b>2.3.10 Ensaio de Termografia.....</b>	<b>69</b>
<b>2.3.11 Ultrassonografia .....</b>	<b>71</b>

<b>3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>
<b>3.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizados em estruturas dada a versatilidade, durabilidade e relativo baixo custo. Em virtude disso, tornou-se um material onipresente na construção civil, sendo especialmente importante em projetos de edifícios altos e complexos. Porém, com o aumento do uso dessa tecnologia, surgiram desafios relacionados a novos carregamentos, à integridade, à longevidade das estruturas (Chies, 2014; Pires, 2023).

Outrossim, segundo o estudo de Candian (2017), os problemas relacionados à caracterização de estruturas de concreto, corrosão das armaduras, fissuração, deslocamento, perda de massa do concreto e; ainda, melhorias e ampliações das estruturas, são questões frequentes enfrentadas por engenheiros ao longo do ciclo de vida das construções e que tem crescido muito nos últimos anos. Do mesmo modo, esses problemas são frequentemente observados em regiões menos desenvolvidas, muito em virtude da falta de monitoramento e de estudos para realizar avaliação estrutural, seja para nova ampliação ou manutenção preventiva não realizada, o que pode comprometer a estrutura, segurança, funcionalidade e a longevidade das edificações, destacando a importância de se realizar ensaios destrutivos (ED) e ensaios não destrutivos (END) para caracterização e diagnóstico precisos.

Ensaio destrutivos, como a extração de testemunhos ou ensaios de carregamento, permitem uma análise aprofundada das propriedades físicas e mecânicas do concreto (Reis, 2001). Por outro lado, ensaios não destrutivos, como índice esclerométrico, pacometria, ultrassom ou medição de potencial de corrosão, possibilitam avaliações menos invasivas e mais rápidas das condições das estruturas (Breysse, 2012). Esses métodos de avaliação são cruciais para a determinação da melhor técnica de reforço, reparo estrutural ou para caracterização das estruturas, garantindo a segurança e longevidade das construções.

Ademais, ainda Breysse (2012), afirma que a correta aplicação de ensaios em estruturas de concreto armado degradadas pode ser a chave para auxiliar profissionais de engenharia na manutenção e reforço dessas estruturas, oferecendo dados precisos para tomada de decisão. Portanto, estabelecer uma metodologia de ensaios eficaz é fundamental para o sucesso de intervenções, manutenções e melhorias em edifícios existentes.

Neste presente trabalho, serão descritos alguns dos ensaios destrutivos e não destrutivos disponíveis para aplicação em estruturas de concreto armado, enfatizando as melhores práticas para avaliação e diagnóstico de manifestações patológicas comuns, como corrosão das armaduras, fissuração e estudos para demanda de melhorias ou manutenções e inspeções. Este trabalho será dividido em duas seções: a primeira fornecerá uma revisão da literatura sobre as

técnicas de ensaios disponíveis, enquanto a segunda apresentará estudos de caso para ilustrar a aplicação prática dos métodos de análises discutidos.

O objetivo deste trabalho é descrever a sistemática para avaliar estruturas de concreto armado, visando otimizar o processo de diagnóstico e seleção de técnicas de reforço, reparo e caracterização estrutural. As principais questões de pesquisa a serem abordadas incluem: quais ensaios são mais eficazes para identificar patologias específicas e caracterização? Como os dados obtidos podem orientar nas decisões de reparo e ampliações, e ainda contribuir para o desenvolvimento de práticas mais eficazes na manutenção e melhorias de estruturas de concreto armado?

## 1.1 OBJETIVOS

De acordo com a contextualização e problemática exposta na introdução, serão apresentados a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os ensaios mais comumente utilizados para avaliar estruturas de concreto armado, visando otimizar o processo de diagnóstico e seleção de técnicas de caracterização estrutural.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar os testes mais utilizados para analisar estruturas de concreto armado;
- b) Apresentar estudos bibliográficos de como os dados obtidos a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos podem ser utilizados para orientar decisões de reparo e caracterização estrutural;
- c) Analisar de que forma essas metodologias podem contribuir para práticas mais eficazes na construção e caracterização de estruturas de concreto armado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo busca apresentar de forma simples e objetiva a importância de analisar as estruturas de concreto armado, tanto para caracterização estrutural quanto para identificar patologias e; assim, promover o acesso à informação, de modo a incentivar a aplicação de todas as técnicas de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Desta forma, a presente pesquisa aborda análises e diagnósticos para uma manifestação patológica, a fim de solucionar problemas em estruturas de concreto armado, para minimizar gastos e desconfortos, de modo a evitar riscos à integridade física dos usuários da edificação. Os estudos de patologia em concreto armado nas edificações ainda não recebem a atenção adequada para que profissionais possam atuar nessa área com conhecimento suficiente para desempenhar tais atividades, como analisar o problema e ainda apresentar laudos dos procedimentos corretos a serem realizados, sendo este um dos motivos que justifica este estudo.

Os objetivos desta pesquisa são descrever os ensaios comumente utilizados para a caracterização de estruturas de concreto, fornecer subsídios para avaliações mais assertivas por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, identificar manifestações patológicas e propor soluções para garantir a segurança e o conforto dos usuários das edificações. Atualmente, há uma carência de estudos que descrevam a melhor forma de realizar a caracterização estrutural ou a análise de patologias por meio desses ensaios. Esta pesquisa visa preencher essa lacuna, fornecendo diretrizes claras e práticas para os profissionais do setor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto armado é formado pela combinação de concreto e aço. O concreto é uma mistura dosada de cimento, areia, água e agregados (grãos e miúdos), e é projetado para atender às exigências específicas do seu uso, destacando-se pela sua resistência à compressão. As barras de aço são incorporadas ao concreto devido à sua alta resistência à tração, o que torna a combinação desses materiais eficiente, criando estruturas resistentes e versáteis em termos de forma (De Rezende, 2019).

### 2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um material de construção amplamente utilizado, cuja composição e propriedades mecânicas são essenciais para a segurança e durabilidade das estruturas. Pesquisas de Anam (2023) e Kim (2022) ressaltam que a resistência mecânica do concreto armado é vital para suportar carregamentos, enquanto o módulo de elasticidade influencia a deformação sob carga, afetando a rigidez e a capacidade de resistir às forças aplicadas. Além disso, Smith *et al.* (2021) e Brown & Lee (2023) enfatizam que o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade transversal também são importantes, pois determinam a relação entre as deformações laterais e longitudinais e a resistência ao corte, respectivamente.

#### 2.1.1 Resistência Mecânica

A resistência do concreto é um fator importante que afeta seu desempenho e segurança em edifícios, sendo um recurso essencial para um bom desempenho estrutural. A resistência à compressão é a mais usada para controle dos materiais, enquanto a resistência à tração e à flexão também desempenha um papel significativo na análise de como o concreto se comporta sob diferentes cargas.

Desse modo, para a obtenção da resistência à compressão do concreto, é necessário utilizar ensaios com corpos de prova cilíndricos que são submetidos a cargas axiais até sua ruptura. Para isso, seguem-se as diretrizes da NBR 5739 (ABNT, 2018), que especifica os procedimentos para a realização desse ensaio, dimensões do molde, métodos de ensaio e condições de cura para realizar a ruptura do corpo de prova. Além disso, outro fator importante para a resistência à compressão é a relação água/cimento, sendo um dos fatores mais críticos,

pois uma baixa relação geralmente resulta em um concreto de maior resistência, tendo como resultado uma matriz de cimento mais densa e com menos porosidade (Mehta e Monteiro, 2014; Mindess *et al.*, 2003).

A norma NBR 7680-2 (ABNT, 2015) estabelece os procedimentos para a extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto, visando determinar a resistência e outras propriedades do material em estruturas existentes. A extração de testemunhos deve ser aprovada por um engenheiro responsável e atender aos requisitos específicos para os equipamentos utilizados, garantindo a integridade e a representatividade dos corpos de prova. Esse processo é fundamental para avaliar a qualidade e a segurança das estruturas de concreto, fornecendo dados essenciais para a manutenção e reabilitação de edificações.

A correlação da dureza superficial do concreto com sua resistência à compressão através do índice esclerométrico é definido conforme a norma NBR 7584 (ABNT, 2012), que estabelece os procedimentos para o ensaio de esclerometria, que avalia a dureza superficial do concreto e sua correlação com a resistência à compressão. Este ensaio, realizado com o esclerômetro, é fundamental para determinar a uniformidade e a qualidade do concreto em estruturas existentes de maneira não destrutiva. A norma fornece diretrizes detalhadas para a execução do ensaio, a interpretação dos resultados e a correlação dos índices esclerométricos com a resistência do concreto, sendo essencial para a avaliação e manutenção de edificações de concreto.

Outrossim, além da resistência à compressão do concreto a resistência à tração é uma propriedade importante, principalmente na previsão de fissuras e desempenho estrutural na flexão. Assim, para a obtenção da resistência à tração, é necessário a realização de ensaios indiretos como o ensaio de tração por compressão diametral e o ensaio de flexão em viga (Neville, 2016).

A variabilidade na resistência do concreto é uma consideração importante no projeto estrutural. A resistência do concreto pode variar significativamente devido a diferenças na qualidade dos materiais, nos métodos de mistura, na forma de aplicação e cura do concreto. Por isso, a prática de projetar para uma resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), que é a resistência abaixo da qual uma apenas pequena proporção (geralmente 5%) dos resultados de ensaio pode ser esperada, é comum (ACI 318-14, 2014). Esta abordagem assegura que a maioria do concreto em uma estrutura terá resistência suficiente para cumprir os requisitos de segurança. No entanto, em estruturas onde há dúvidas quanto ao seu desempenho a aferição da resistência à compressão do concreto é uma das primeiras medidas a serem realizadas.

## 2.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Ensaio ditos destrutivos são aqueles que danificam a estrutura a fim de gerar os resultados necessários na avaliação. Por exemplo, a retirada de porções ou testemunhos da estrutura para avaliar a sua resistência.

Esses ensaios são cruciais para garantir a segurança e a confiabilidade das estruturas, permitindo a identificação de possíveis falhas e a tomada de medidas corretivas apropriadas. Servem para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais e são fundamentais para analisar a resistência, durabilidade e comportamento dos materiais sob diferentes tipos de esforços, garantindo a obtenção da caracterização e reparo estrutural de forma adequada.

São técnicas amplamente utilizadas na indústria para análise de falhas, com o objetivo de detectar características e verificar propriedades mecânicas. Os tipos mais comuns de ensaios destrutivos em concreto armado incluem:

- a) **Extração de Testemunhos:** Envolve a extração de amostras cilíndricas de concreto da estrutura existente para análise laboratorial, permitindo a avaliação da resistência, densidade, permeabilidade e outras propriedades.

### 2.2.1 Fatores de correção

A norma NBR 7680-1 (ABNT, 2015) estabelece que a extração de testemunhos de concreto deve ser realizada com furadeira de coroa diamantada, evitando danos ao concreto adjacente. Os testemunhos devem ter diâmetro preferencial de 100 mm, com relação diâmetro-altura de 2:1. A extração deve ocorrer em áreas representativas da estrutura, longe de bordas, juntas e armaduras de aço. Os testemunhos devem ser retificados para garantir superfícies planas e paralelas, curados em água saturada de cal a  $23 \pm 2$  °C por 48 horas e mantidos em condições de umidade controlada. O ensaio de compressão é realizado em prensa hidráulica calibrada, aplicando carga contínua até a ruptura. Esses procedimentos asseguram uma avaliação precisa das propriedades mecânicas do concreto, essencial para a inspeção e manutenção de estruturas, garantindo segurança e durabilidade.

Quando a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) não é atingida conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022) deve-se verificar a segurança estrutural utilizando a resistência característica estimada ( $f_{ck, est}$ ). Se essa análise indicar que a segurança é mantida, a estrutura é aceita sem necessidade de extração de testemunhos. Caso contrário, deve-se

planejar a extração de testemunhos conforme a (NBR 7680, ABNT, 2015). Em casos específicos podem ser utilizados testemunhos com diâmetro menor que 75 mm ou igual a 50 mm, desde que o número mínimo de testemunhos seja o dobro do estabelecido pela norma.

#### 2.2.1.1 Fator de Correção para Diâmetro

O diâmetro dos testemunhos é um dos principais fatores que afetam a resistência à compressão do concreto. A norma NBR 7680-1 (ABNT, 2015) estabelece que, para testemunhos com diâmetro diferente do padrão de 150 mm, é necessário aplicar um fator de correção. Este fator é obtido por meio de tabelas específicas, Tabela 1 e 2 que relacionam o diâmetro do testemunho com a resistência esperada. Por exemplo, um testemunho com diâmetro de 100 mm, e resistência medida de 25 MPa, possuiria um fator de correção de 1,05. Isso significa que a resistência real do concreto, após a correção, deve ser calculada como  $25 \text{ MPa} \times 1,05 = 26,25 \text{ MPa}$ . Essa correção é vital, pois testemunhos com diâmetros menores tendem a apresentar resistência inferior devido ao maior efeito da superfície exposta e à diminuição da quantidade de material que suporta a carga.

#### 2.2.1.2 Fator de Correção para Danos de Extração

Durante a extração dos testemunhos, podem ocorrer danos que comprometem a integridade do concreto, como microfissuras ou delaminações. Esses danos podem ser causados pela utilização de equipamentos inadequados ou pela falta de cuidados durante o processo. A norma NBR 7680 (ABNT, 2015) recomenda a aplicação de um fator de correção que compense a perda de resistência decorrente desses danos. Esse fator pode ser determinado empiricamente, com base em estudos anteriores, ou por meio de ensaios adicionais que avaliem a extensão dos danos. Se for identificado que os danos reduziram a resistência do testemunho em 10%, um fator de correção de 1,10 pode ser aplicado, ajustando a resistência medida para refletir a verdadeira capacidade do concreto.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração, é o efeito de broqueamento ao avaliar a resistência de testemunhos de concreto, sendo mais significativo para testemunhos com diâmetros menores. Para ajustar esse efeito, utiliza-se o fator  $k_2$  conforme indicado na Tabela 1. O valor de  $k_2$  varia de acordo com o diâmetro do testemunho ( $dt$ ):

Tabela 1 - Valores de  $k_2$  em função do efeito do broqueamento em função do diâmetro do testemunho

Diâmetro do testemunho ( $dt$ ) mm	$\leq 25$	50 (a)	75	100	$\geq 150$
$k_2$	Não permitido	0,12	0,09	0,06	0,04

(a) Neste o número de testemunhos deve ser o dobro daquele estabelecido pela norma.

Fonte: ABNT NBR 7680:2015.

### 2.2.1.3 Fator de Correção para Relação Dimensional

A relação entre a altura e o diâmetro dos testemunhos, conhecida como relação  $h/d$ , influencia significativamente os resultados dos ensaios de compressão. A norma estabelece que a relação ideal deve ser em torno de 2, onde a altura do testemunho é o dobro do seu diâmetro. Quando essa proporção é alterada, a resistência pode ser afetada. A norma fornece fatores de correção para relações  $h/d$  que diferem do ideal. Um testemunho com uma relação  $h/d$  de 1,75 poderá necessitar de um fator de correção de 0,95, que deverá ser aplicado à resistência medida. Isso significa que, se a resistência inicial registrada foi de 30 MPa, após a correção, o valor ajustado seria  $30 \text{ MPa} \times 0,95 = 28,5 \text{ MPa}$ . Esta correção é crucial para garantir que a resistência obtida seja representativa do comportamento do concreto nas condições reais de utilização.

Para valores com relação altura/diâmetro definidos entre os constantes na Tabela 2, os demais coeficientes de correção podem ser obtidos por interpolação linear.

Tabela 2 - Valores de  $k_1$

<b>h/d</b>	2,00	1,88	1,75	1,63	1,50	1,42	1,33	1,25	1,21	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1,0
<b>k1</b>	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,08	-0,09	-0,10	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14

Fonte: ABNT NBR 7680:2015.

O responsável pela extração deve informar ao laboratório de ensaio a direção de extração em relação ao lançamento do concreto. Os corpos de prova devem ser ensaiados, preferencialmente, na mesma direção do lançamento do concreto. Se a extração for feita em direção ortogonal ao lançamento (como em pilares, cortinas e paredes), aplica-se um fator de correção  $k_3 = 0,05$ . Para extrações na mesma direção do lançamento (como em lajes),  $k_3 = 0$ .

Antes do ensaio de ruptura, os testemunhos devem ser preparados conforme a norma, e a umidade dos testemunhos deve ser considerada. Para testemunhos saturados (mantidos em tanque de cura ou câmara úmida), não há correção ( $k_4 = 0$ ). Para ensaios de testemunhos secos ao ar, aplica-se um fator de correção ( $k_4 = -0,04$ ). Esta correção deve ser aplicada aos resultados de ruptura e informada no relatório do ensaio.

#### 2.2.1.4 Consideração da Resistência Medida em Relação ao $f_{ck}$

Após a aplicação dos fatores de correção, a norma NBR 7680 (ABNT, 2015) estabelece que a resistência final do testemunho corrigido deve ser comparada ao valor característico de resistência à compressão do concreto, conhecido como  $f_{ck}$ . O  $f_{ck}$  é um parâmetro fundamental no projeto estrutural, pois representa a resistência mínima que o concreto deve apresentar, de acordo com as especificações do projeto.

Se a resistência medida corrigida do testemunho for igual ou superior ao  $f_{ck}$  especificado para a classe de resistência do concreto, pode-se considerar que o concreto atende às exigências de qualidade e segurança estabelecidas no projeto. Por outro lado, se a resistência medida corrigida estiver abaixo do  $f_{ck}$ , isso pode indicar problemas na execução ou na mistura do concreto, levando a uma reavaliação das condições de projeto e a possíveis intervenções na estrutura. Assim, a comparação entre a resistência medida e o  $f_{ck}$  é crucial para a validação da qualidade do concreto utilizado na obra, assegurando a integridade e a segurança da estrutura.

#### 2.2.2 Extração de testemunhos

Segundo Tosetto (2017), a extração de testemunhos, é um método destrutivo onde se retiram corpos de prova cilíndricos de concreto da estrutura existente para posterior rompimento e verificação da resistência à compressão axial, tração e/ou módulo de elasticidade do concreto. A execução do método segue os procedimentos descritos na norma NBR 7680 (ABNT, 2015), que trata dos métodos de ensaio de concreto, com foco especial na extração, preparo, ensaio e interpretação dos resultados de testemunhos de concreto.

Portanto, a NBR 7680 (ABNT, 2015) é essencial para a verificação da resistência e qualidade do concreto em estruturas, desempenhando um papel crucial aos usuários da construção civil na garantia de segurança e durabilidade das construções. Para os ensaios de compressão, a norma estabelece métodos rigorosos, incluindo a velocidade de aplicação da carga e os critérios de aceitação dos resultados. A precisão nos métodos de ensaio garante que

os resultados sejam confiáveis e representativos das condições reais do concreto na estrutura.

Prepara-se o equipamento de corte, uma serra ou broca diamantada Figura 1, garantindo que esteja em boas condições (Tosetto, 2017). É importante utilizar um meio de resfriamento, como água, para evitar o superaquecimento da ferramenta. O corte deve ser realizado de forma cuidadosa e controlada, aplicando força constante e evitando vibrações excessivas, com resfriamento contínuo, se necessário. Após o corte completo, conforme Figura 2, o testemunho deve ser removido com cuidado para evitar danos, então é identificado com um número ou código exclusivo e registrado com informações detalhadas sobre a extração.

Figura 1 - Realização de extração de testemunho do pilar da edificação principal antiga



Fonte: Tosetto (2017).

Após a extração, a NBR 7680 (ABNT, 2015) descreve os métodos de preparo dos testemunhos, incluindo corte, planificação e acondicionamento. Estes passos são cruciais para garantir a integridade dos testemunhos antes dos ensaios. Os pontos de extração devem ser selecionados com cuidado, de modo a representar fielmente a qualidade do concreto e evitar áreas problemáticas, como bordas, juntas de concretagem. A norma especifica as dimensões e as condições adequadas para essa operação, que devem ser seguidas rigorosamente para evitar danos tanto aos testemunhos quanto à estrutura de onde são retirados.

Figura 2 - Realização de extração de testemunho do pilar



Fonte: Tosetto (2017).

Após a extração de testemunhos de concreto, a reconstituição da estrutura deve ser realizada utilizando materiais como argamassa de reparo estrutural, resina epóxi ou concreto de reparo, garantindo a compatibilidade com o concreto original Figura 3. O procedimento envolve a limpeza e preparação da superfície, o preenchimento cuidadoso do furo para evitar bolhas de ar e a cura adequada do material aplicado. A inspeção final assegura que o reparo foi bem-sucedido, preservando a integridade da estrutura conforme as diretrizes da (NBR 7680-1, ABNT, 2015).

Figura 3 - Local de extração de testemunho reconstituído



Fonte: Tosetto (2017).

No caso de transporte para um laboratório, o testemunho deve ser acondicionado de forma segura para evitar danos. Durante o armazenamento, deve-se proteger o testemunho de impactos, umidade excessiva e contaminação. Seguindo esses passos, garante-se a extração segura e eficaz de testemunhos de concreto, proporcionando amostras representativas para avaliação da resistência e qualidade do concreto.

Deve-se seguir a norma NBR 7680 (ABNT, 2015) para a elaboração dos relatórios de ensaio, que devem incluir informações como as dimensões dos testemunhos, as condições de extração, os resultados dos ensaios e qualquer observação relevante. Esses relatórios são documentos essenciais para a rastreabilidade e validação da qualidade do concreto utilizado nas construções.

### **2.2.3 Compressão**

Conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018) que especifica o método para determinar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto, este ensaio é essencial para avaliar a qualidade do concreto. Os corpos de prova, geralmente de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, são moldados e curados em condições controladas. No caso de estruturas de concreto endurecido, deve-se atender as dimensões e condições de extração determinados na (NBR 7680-1, ABNT, 2015). Durante o ensaio, eles são submetidos a uma carga axial contínua até a ruptura, e sua resistência à compressão é calculada dividindo-se a carga máxima pela área da seção transversal do cilindro.

Esse ensaio é fundamental para garantir que o concreto atenda às especificações do projeto estrutural, assegurando a segurança e durabilidade das construções. A conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018) padroniza o procedimento, proporcionando resultados precisos e confiáveis, essenciais para a qualidade e a integridade das obras de engenharia civil.

Para realizar o ensaio de compressão de concreto, é crucial garantir a configuração adequada da máquina de ensaio. Primeiramente, deve-se certificar de que a máquina está calibrada e em bom estado de funcionamento. O alinhamento do corpo de prova é essencial, devendo ser posicionado de forma que a carga seja aplicada axialmente, sem inclinação. Um exemplo é a análise realizada e ilustrada na Figura 4 por Tosetto (2010). As superfícies de contato devem ser preparadas utilizando discos ou placas de metal, para assegurar uma distribuição uniforme da carga sobre o corpo de prova.

Figura 4 - Testemunho em prensa hidráulica pronto para ser rompido



Fonte: Tosetto (2017).

Durante o procedimento de ensaio, o corpo de prova deve ser corretamente posicionado entre as placas de carregamento da máquina. A carga deve ser aplicada de maneira contínua e uniforme, seguindo a taxa especificada pela norma, geralmente entre 0,2 MPa/s e 0,4 MPa/s, e a carga máxima suportada deve ser monitorada e registrada. A resistência à compressão é calculada dividindo a carga máxima suportada pelo corpo de prova pela área da seção transversal.

A interpretação dos resultados dos ensaios de compressão é uma parte crítica da avaliação da qualidade do concreto. A norma NBR 7680 (ABNT, 2015), fornece diretrizes sobre como os resultados dos ensaios de compressão devem ser analisados e interpretados em relação às exigências de projeto e outras normas técnicas aplicáveis. A interpretação adequada desses resultados é essencial para a tomada de decisões sobre a conformidade do concreto com os padrões de qualidade exigidos.

Todos os dados do ensaio devem ser registrados, incluindo dimensões do corpo de prova, carga máxima aplicada e resistência calculada, e um relatório detalhado deve ser elaborado conforme os requisitos da NBR 5739 (ABNT, 2018), incluindo a descrição dos

corpos de prova, condições do ensaio e resultados obtidos. Para garantir a precisão dos resultados, é recomendada a realização de vários ensaios com corpos de prova diferentes e a análise estatística dos dados. A análise do tipo de falha no corpo de prova também é importante para avaliar a qualidade do concreto. Seguindo esses procedimentos, é possível assegurar que o ensaio de compressão seja realizado de maneira adequada e que os resultados reflitam a resistência real do concreto.

#### **2.2.4 Tração**

A resistência à tração do concreto pode ser determinada em estruturas existentes por meio do ensaio de tração por compressão diametral, conforme a (NBR 7222, ABNT, 2011). Este método utiliza corpos de prova cilíndricos, moldados e curados de acordo com a (NBR 5738, ABNT, 2015). Durante o ensaio, o corpo de prova é posicionado horizontalmente na máquina de ensaio e submetido a uma carga ao longo de seu diâmetro até a ruptura. A resistência à tração é calculada com base na carga máxima aplicada, altura e diâmetro do corpo de prova.

A execução adequada do ensaio é crucial para obter resultados precisos e confiáveis, que são fundamentais para avaliar a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. A resistência à tração é uma propriedade importante que influencia a capacidade do concreto de resistir a fissuras e outros danos, contribuindo para a segurança e longevidade das estruturas de engenharia civil. A conformidade com a NBR 7222 (ABNT, 2011) garante a padronização do procedimento, permitindo uma avaliação consistente e comparável entre diferentes amostras e projetos.

Flores (2018) realizou ensaios de tração, com velocidade de 0,01 mm/mm, na mesma máquina em que realizou ensaios de compressão. A máquina SATEC™ Series Static Hydraulic Test Systems da marca INSTRON pode ser vista na Figura 5 já com o corpo de prova prismático pronto para ser ensaiado.

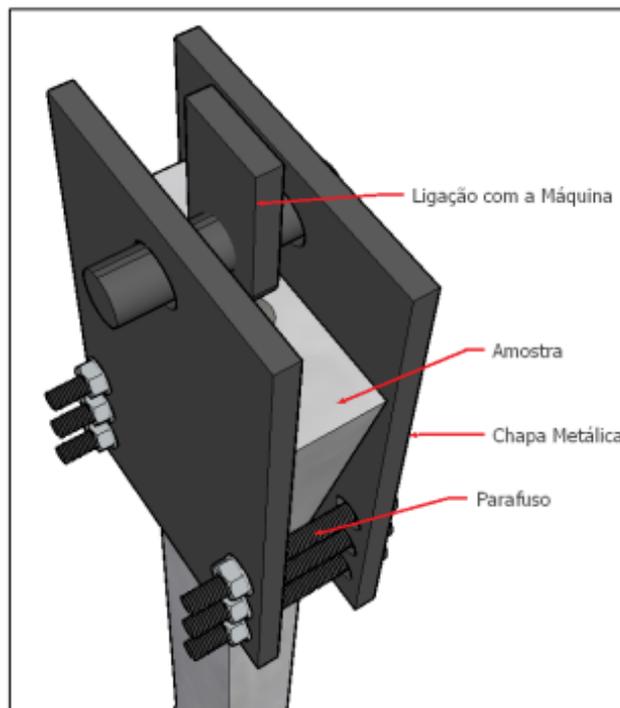
Na Figura 6 pode-se observar a instrumentação do ensaio onde as 2 chapas metálicas que são responsáveis por transmitir a tração para o corpo de prova fazem a ligação entre a amostra e a máquina por meio de um pino, que é inserido no orifício centralizado da placa metálica. A acoplagem do corpo de prova na máquina é o principal determinante deste ensaio, pois uma ligação excêntrica pode gerar momentos na amostra fazendo com que o corpo de prova seja solicitado a flexo-tração. Linhas foram traçadas ao longo do corpo de prova centralizadas para auxiliar na centralização das chapas.

Figura 5 - Máquina SATEC com o extensômetro posicionado no corpo de prova



Fonte: Flores (2018).

Figura 6 - Configuração do ensaio



Fonte: Flores (2018).

### 2.2.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é uma propriedade essencial do concreto que descreve a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea na região elástica do material. Este parâmetro é fundamental para a análise estrutural, pois influencia a deflexão e a distribuição de tensões em elementos de concreto armado. Do Carmo Paiva (2017), também destaca que, de maneira simplificada, os fatores que influenciam no seu desenvolvimento ao longo do tempo são, em sua maioria, os mesmos que influenciam a resistência à compressão.

Segundo Neville (2016), a presença de agregados tem influência significativa no módulo de elasticidade. Agregados rígidos, como granito e basalto, aumentam o módulo de elasticidade do concreto, enquanto agregados menos rígidos, como calcário e arenito, resultam em um módulo mais baixo. Além disso, granulometria e a compactação dos agregados também afetam a densidade e a homogeneidade do concreto, influenciando seu comportamento elástico.

A NBR 8522 (ABNT, 2021), estabelece os métodos para a determinação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico e do coeficiente de Poisson em concreto endurecido. Esses ensaios são essenciais para a avaliação da qualidade e da deformabilidade do concreto, sendo fundamentais para projetos de engenharia que requerem precisão e segurança. A norma define os procedimentos de ensaio, os equipamentos necessários e os métodos de cálculo, garantindo a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos.

A determinação do módulo estático de elasticidade e do coeficiente de Poisson é fundamental para entender o comportamento do concreto sob cargas. O módulo de elasticidade mede a rigidez do concreto, indicando sua capacidade de deformar elasticamente sob uma carga aplicada. Já o coeficiente de Poisson avalia a relação entre a deformação longitudinal (ao longo da direção da carga) e a deformação transversal (perpendicular à carga) quando o material é submetido a esforço. Esses parâmetros são essenciais para projetistas e engenheiros, pois influenciam diretamente no dimensionamento e na análise estrutural das construções de concreto.

A norma especifica o método de ensaio para o uso de corpos de prova cilíndricos, extraídos de acordo com a NBR 7680-1 (ABNT, 2015), geralmente com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, moldados e curados em condições controladas. Durante o ensaio, esses corpos de prova são submetidos a uma carga axial crescente de 0,5 MPa/s a 0,6 MPa/s até atingir o carregamento final. As deformações longitudinais e transversais são medidas utilizando equipamentos precisos, permitindo o cálculo do módulo de elasticidade e do

coeficiente de Poisson. Esses ensaios fornecem dados críticos sobre a deformabilidade do concreto, necessários para garantir a conformidade com as especificações de projeto e normas técnicas.

A realização dos módulos estáticos à compressão, requer o uso de uma máquina de compressão capaz de aplicar cargas controladas de forma contínua. Extensômetros ou transdutores de deslocamento são utilizados para medir as deformações longitudinais e transversais dos corpos de prova. Um sistema de aquisição de dados é necessário para registrar e analisar as medições obtidas. A calibração e a precisão desses equipamentos são cruciais para obter resultados confiáveis, assegurando que as medições refletiam com exatidão o comportamento do concreto.

Os corpos de prova devem ser preparados com superfícies planas e paralelas, garantindo um contato uniforme durante o ensaio. Antes do ensaio, é necessário verificar se os corpos de prova estão isentos de danos que possam influenciar os resultados. A aplicação de um pré-carregamento é recomendada para acomodar possíveis ajustes no equipamento e nos corpos de prova, eliminando folgas e irregularidades que possam afetar as medições.

Durante o ensaio, a carga é aplicada de forma contínua e controlada, e as deformações são medidas em intervalos regulares. A partir dessas medições, calcula-se o módulo de elasticidade, que é a razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante na região linear da curva tensão-deformação que é geralmente considerada entre 0,5 MPa e 30% da carga máxima aplicada ao corpo de prova. Esse cálculo fornece uma medida da rigidez do concreto na sua fase elástica, essencial para a análise estrutural.

A NBR 8522-2 (ABNT, 2021), desempenha um papel fundamental na avaliação das propriedades elásticas de concretos, sendo amplamente utilizada na engenharia civil para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas. Este método normatizado permite a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto através das frequências naturais de vibração, uma técnica que se destaca por sua precisão e caráter não destrutivo.

O princípio do método baseia-se na relação entre as frequências naturais de vibração de um corpo de prova e suas propriedades elásticas e densidade. Quando um corpo de prova de concreto é excitado, ele vibra em frequências naturais que são características de suas propriedades materiais. A medição dessas frequências, seguida pelo cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, permite uma avaliação rigorosa da rigidez do concreto. Este método proporciona uma alternativa valiosa aos ensaios destrutivos tradicionais, oferecendo uma análise detalhada sem comprometer a integridade do material.

Para a execução do ensaio, a norma especifica o uso de um suporte ajustável que garante

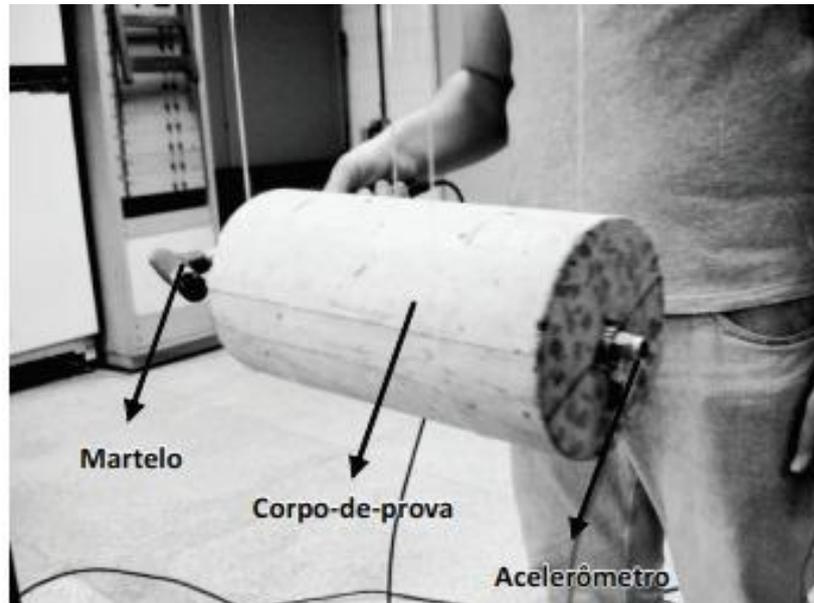
a estabilidade do corpo de prova, minimizando interferências externas que possam afetar a precisão das medições. O martelo de impacto é utilizado para excitar o corpo de prova, gerando as vibrações necessárias para o ensaio. As vibrações são captadas por um sensor acústico, que deve ser suficientemente sensível para detectar as frequências naturais. Os dados coletados são então processados por uma unidade de processamento, que calcula as frequências naturais e, a partir delas, determina o módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

A execução do ensaio envolve uma série de etapas cuidadosamente delineadas para garantir a precisão das medições. Inicialmente, os corpos de prova são preparados e fixados no suporte ajustável. Em seguida, o martelo de impacto é utilizado para excitar o corpo de prova, e as vibrações resultantes são medidas pelo sensor acústico. Os dados de frequência obtidos são processados pela unidade de processamento para calcular o módulo de elasticidade dinâmico. Este procedimento rigoroso assegura a repetibilidade e a precisão dos resultados, conforme exigido pela norma.

A utilização da NBR 8522-2 (ABNT, 2021) na determinação do módulo de elasticidade dinâmico é de grande relevância para a engenharia civil, pois permite uma avaliação detalhada das propriedades elásticas do concreto de forma não destrutiva. Este método contribui significativamente para o monitoramento da integridade estrutural, controle de qualidade e manutenção preventiva das estruturas de concreto, promovendo a segurança e a durabilidade das construções.

Diógenes *et al.* (2011), realizou ensaios de cilindros e prismas de concreto simples com o intuito de determinar o módulo de elasticidade dinâmico. A Figura 7 ilustra a realização desse ensaio utilizando um corpo de prova de concreto, em formato cilíndrico.

Figura 7 - Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Diógenes *et al.* (2011).

A combinação dos ensaios estático e dinâmico oferece uma visão abrangente das propriedades mecânicas do concreto. O ensaio estático avalia a resposta do concreto a cargas aplicadas de forma constante e crescente até a ruptura, determinando propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Já o ensaio dinâmico mede a resposta do concreto a cargas cíclicas ou variáveis ao longo do tempo, fornecendo dados sobre resistência à fadiga, amortecimento e rigidez dinâmica, essenciais para estruturas sujeitas a vibrações e impactos repetitivos. Juntos, esses ensaios permitem uma avaliação completa do desempenho do concreto em diversas condições de uso, melhorando a precisão do dimensionamento estrutural, a segurança das construções e a eficácia das estratégias de manutenção e inspeção.

### 2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Estes ensaios podem ser utilizados em estruturas novas ou antigas. No caso de estruturas novas, eles podem ser empregados para monitoramento da evolução da resistência ou para esclarecer dúvidas sobre a qualidade do concreto. Os ensaios em estruturas já existentes visam avaliar a sua integridade e capacidade de resistir às solicitações (Evangelista, 2002).

Ainda de acordo com Evangelista (2002), para a utilização adequada dos ensaios não destrutivos é preciso conhecer suas limitações, vantagens e desvantagens, acurácia e os fatores que influem nas grandezas neles medidas, com a relação entre a resistência à compressão e as grandezas medidas nesses ensaios.

Os ensaios não destrutivos (END) são métodos de teste que não danificam o material ou estrutura testada. Eles são amplamente utilizados no concreto armado para avaliar suas propriedades e detectar possíveis falhas ou deteriorações sem comprometer a integridade da estrutura. Os tipos mais comuns de ensaios não destrutivos utilizados no concreto armado incluem:

- a) **Abertura de Janelas de Inspeção:** A abertura de janelas de inspeção é um procedimento utilizado para analisar a estrutura interna de elementos de concreto, facilitando a realização de ensaios de pacometria;
- b) **Ensaio de Esclerometria:** Mede a dureza superficial do concreto com base no índice de rebote de um martelo de esclerômetro, que pode ser correlacionado com a resistência à compressão do concreto;
- c) **Ensaio de Pacometria:** Este método é essencial para inspeções, reparos e a avaliação do posicionamento e diâmetro das armaduras de edifícios e outras estruturas de concreto armado;
- d) **Ensaio de Penetração (Windsor):** Avalia a resistência do concreto pela medição da profundidade de penetração de um pino de aço lançado contra a superfície do concreto;
- e) **Ensaio de Permeabilidade ao Ar ou à Água:** Avalia a permeabilidade do concreto ao ar ou à água, o que é um indicador importante da durabilidade e da resistência à penetração de agentes agressivos;
- f) **Ensaio de Potencial de Corrosão:** Tem como objetivo avaliar o potencial de corrosão das armaduras, mede a diferença de potencial elétrico entre a armadura e um eletrodo de referência;
- g) **Ensaio de Profundidade de Carbonatação:** Mede a profundidade de penetração do dióxido de carbono no concreto, o que pode indicar a progressão da carbonatação, um processo que pode reduzir a durabilidade do concreto;
- h) **Ensaio de Puxamento (Pull-off):** Mede a aderência entre o concreto e uma camada aplicada, como um revestimento, sem causar danos significativos ao concreto base;
- i) **Ensaio de Resistividade Elétrica:** Mede a resistividade elétrica do concreto, o que pode ser utilizado para avaliar a probabilidade de corrosão das armaduras;
- j) **Ensaio de Termografia:** É uma ferramenta poderosa para a manutenção preventiva e a inspeção de estruturas de concreto armado, permitindo a detecção precoce de problemas;

- k) **Ensaio de Ultrassonografia:** Utiliza ondas ultrassônicas para detectar falhas internas, fissuras, delaminações e outras irregularidades no concreto.

Esses ensaios são essenciais para a manutenção preventiva e avaliação da integridade estrutural do concreto armado, permitindo a detecção precoce de problemas e a implementação de medidas corretivas apropriadas.

### **2.3.1 Abertura de Janelas de Inspeção**

A abertura de janelas de inspeção refere-se ao processo de criar uma abertura controlada em uma estrutura, como concreto, para permitir acesso visual ou físico para inspeção, manutenção ou reparo. Essas janelas são projetadas para proporcionar um ponto de entrada seguro e acessível para profissionais realizarem verificações periódicas ou intervenções necessárias em estruturas de concreto.

As aberturas de janelas de inspeção, como demonstrado na Figura 8, ilustra uma janela de inspeção realizada em um pilar de concreto armado. Geralmente, são realizadas com molduras ou estruturas que permitem a vedação adequada após a inspeção, garantindo assim a integridade estrutural e a segurança operacional das instalações.

Essas aberturas são importantes porque permitem que técnicos e engenheiros realizem inspeções visuais detalhadas, monitoramento de condições internas, testes não destrutivos ou mesmo a realização de reparos sem a necessidade de desmontar estruturas maiores. Isso economiza tempo e recursos, ao mesmo tempo que mantém a eficiência e a segurança.

Figura 8 - Abertura de janelas no pilar



Fonte: Ferarri (2023).

Conforme o estudo de Ferrari (2023), demonstra o uso de janelas de inspeção, realizando-as em vigas e em pilares, utilizando de disco de corte acoplado a equipamento de demarcação de trecho, ponteira e marreta.

Ferrari (2023) investigou uma edificação, ilustrada na Figura 9, que sofreu um incêndio em meados de 2019, com foco no Ambiente Interno, que destruiu todos os objetos e quase colapsou a cobertura de madeira e telhas de barro. A inspeção, realizada quatro anos após o incêndio, revelou que a estrutura de concreto armado (pilares e vigas da cobertura) não foi afetada pelo incêndio, não apresentando fissuras ou deslocamentos.

Figura 9 - Aspecto geral da Edificação após o Incêndio



Fonte: Ferarri (2023).

O estudo de Ferarri (2023) revelou que as trincas e fissuras nas vigas e pilares não estão relacionadas ao incêndio, mas sim a mecanismos intrínsecos de degradação do material, como a corrosão das armaduras de aço devido à carbonatação do concreto. A corrosão foi identificada em vigas e pilares específicos, causando trincas e redução da seção do aço em até 5%. O autor recomendou um método de reparo específico para a recuperação dessas estruturas.

Também, Noronha (2018) realizou ensaios de abertura de janelas de inspeção em uma pesquisa no município de Água Santa e Lagoa do Peixe, localizadas na zona rural de Tabuleiro do Norte, CE, conforme Figuras 10 e 11. O estudo avaliou, dois reservatórios de concreto armado na cidade, incluindo a realização de ensaios, analisando as causas mais prováveis da falta de água na distribuição aos moradores pela condição estrutural dos reservatórios e buscando as possíveis soluções para os problemas observados.

Figura 10 - Reservatório de água de Água Santa – Tabuleiro do Norte (CE)



Fonte: Noronha (2018).

Figura 11 - Reservatório de Água da Lagoa do Peixe – Tabuleiro do Norte (CE)



Fonte: Noronha (2018).

A abertura da janela de inspeção, conforme mencionado por Noronha (2018), foi realizada para verificar se as fissuras atingiram apenas a parte do revestimento e proteção ou se já afetaram os elementos estruturais dos reservatórios de água. Essa abertura como demonstra na Figura 12, foi realizada na fissura mais adequada para as técnicas de monitoramento utilizadas posteriormente.

Figura 12 - Abertura de janela de inspeção



Fonte: Noronha (2018).

A janela foi usada para fazer um monitoramento com lâmina de vidro, como mostra a Figura 13, onde durante o período analisado entre 22/08/2018 e 09/09/2018 não houve mudanças significativas, apresentando apenas uma leve alteração entre as linhas de menos de um centímetro.

Figura 13 - Controle de Fissuras na janela de Inspeção



Fonte: Noronha (2018).

Neste estudo, Noronha (2018) realizou um levantamento de dados, onde foram colhidas todas as informações possíveis sobre o problema observado, a partir de arquivos, laudos, fotos e conversas com pessoas envolvidas. Também realizou exames complementares, análises de esclerometria e carbonatação, para entender as origens e sintomas da manifestação patológica.

Conforme a Figura 14, foi realizada a aplicação do esclerômetro para retirada de amostra no reservatório de água. As distâncias usadas para a aplicação do equipamento foram de 6,00 cm da borda, e de 4,00 cm entre os pontos de medição, como mostram as imagens abaixo, atendendo assim as exigências da (NBR 7584, ABNT, 1995). A aplicação foi feita de forma horizontal (perpendicular à estrutura).

Figura 14 - Aplicação de Esclerômetro



Fonte: Noronha (2018).

Após a investigação das patologias, Noronha (2018) indica que as ações de combate e recuperação variam para cada problema observado. Em um dos casos, devido à deterioração avançada e à metodologia construtiva empregada, foi recomendada a demolição da estrutura e a construção de um novo reservatório. A corrosão severa foi um fator determinante para essa decisão, dado seu impacto e custo elevado de reparo. Em outro reservatório, um estudo orçamentário estava em andamento para sua reforma. As práticas comuns de recuperação incluem a remoção da camada superficial de concreto, limpeza e proteção das armaduras corroídas, e recomposição do cobrimento com argamassa polimérica ou graute, além de processos de cura úmida.

### 2.3.2 Esclerometria

A análise de esclerometria em concreto é um método não destrutivo amplamente utilizado para estimar a resistência à compressão do concreto *in situ*. Segundo a norma NBR 7584 (ABNT, 2012), esse método emprega um esclerômetro de reflexão, conforme Figura 15, também conhecido como martelo de Schmidt, que mede a dureza superficial do concreto através do índice de rebote de um martelo de mola. A principal vantagem deste método é a sua simplicidade e rapidez, permitindo uma avaliação preliminar da qualidade do concreto sem causar danos à estrutura.

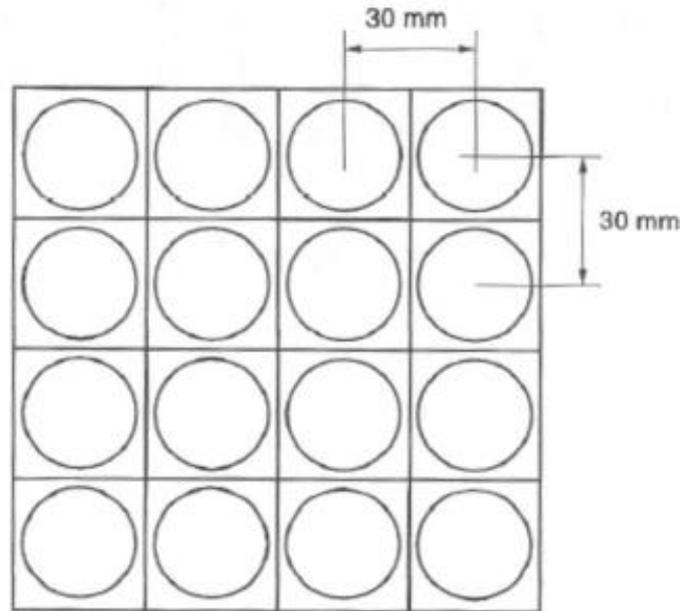
Figura 15 - Esclerômetro Manual



Fonte: Do Carmo Paiva (2017).

O procedimento de ensaio descrito na norma NBR 7584 (ABNT, 2012), começa com a seleção das áreas do concreto a serem testadas. Essas áreas devem ser representativas da estrutura, evitando regiões com defeitos visíveis, bordas ou locais próximos a juntas de construção. Em cada área de ensaio, devem ser efetuados 16 impactos, não sendo permitido mais de um impacto sobre um mesmo ponto. Devem ser evitados impactos sobre armaduras, bolhas e áreas similares, que não representem o concreto em avaliação, o que enfatiza a importância de uma análise prévia e preparo da área com ensaio de pacometria. A área de ensaio é exemplificada na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de área de ensaio



Fonte: ABNT NBR 7584:2012.

Uma vez preparada a superfície, o esclerômetro deve ser posicionado perpendicularmente ao concreto. O operador então aplica o golpe, assegurando que o impacto seja perpendicular à superfície. Para cada área de ensaio, devem ser realizadas pelo menos 16 medições, distribuídas uniformemente e afastadas pelo menos 30 mm entre si.

A NBR 7584 (ABNT, 1995) exige que sejam descartados índices esclerométricos afastados mais de 10% da média inicial. A nova média deve ser calculada com pelo menos cinco valores válidos. Se os valores restantes diferirem mais de 10% da nova média ou não atingirem cinco, o ensaio deve ser desconsiderado.

Figura 17 - Realização de ensaio de esclerometria em Pilar de Concreto Armado



Fonte: Tosetto (2017).

A interpretação dos resultados é feita utilizando curvas de correlação específicas, que relacionam o índice de rebote médio com a resistência à compressão do concreto. Essas curvas podem ser fornecidas pelo fabricante do esclerômetro ou estabelecidas através de ensaios experimentais. É importante notar que os resultados obtidos por esclerometria são indicativos e devem ser interpretados com cautela, considerando fatores que influenciam os resultados, como carbonatação, umidade, idade do concreto, condicionamento superficial e método de execução do ensaio. Sendo assim, esclerometria em estruturas antigas deve ser usada com ressalvas, sendo recomendada a verificação da carbonatação antes do ensaio, e a realização de avaliações complementares com outros métodos, considerando o histórico da estrutura e interpretando os resultados cuidadosamente para garantir uma avaliação precisa e confiável da resistência do concreto.

Para documentar o ensaio, o relatório deve incluir a identificação do local e das condições do ensaio, uma descrição do esclerômetro utilizado e a data da última calibração, além dos procedimentos adotados para a preparação da superfície e o número de medições realizadas, conforme o organograma da Figura 18. Os resultados obtidos, incluindo os índices de rebote e a estimativa da resistência à compressão, também devem ser detalhados no relatório. A calibração regular do esclerômetro é essencial para garantir a precisão das medições e a confiabilidade dos resultados.

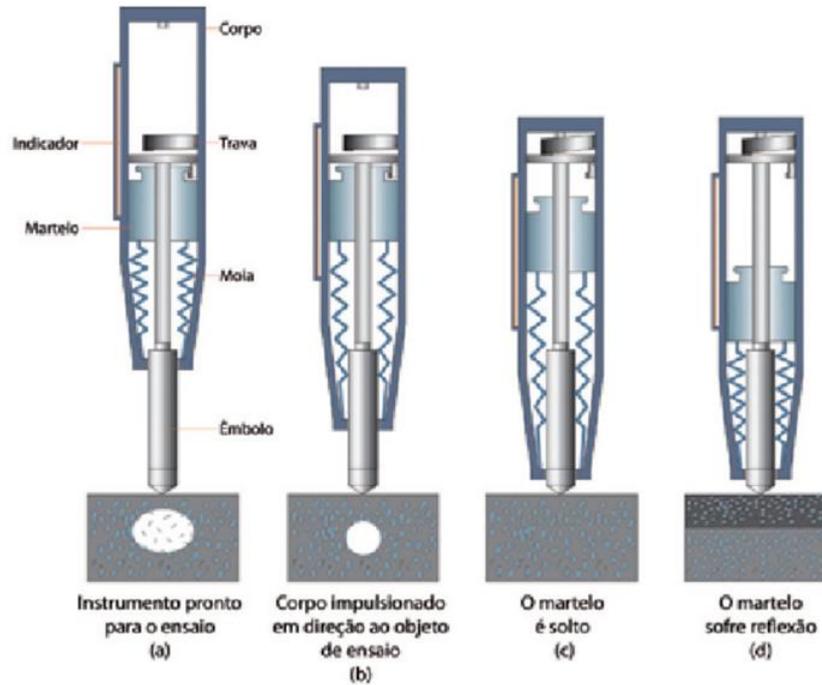
Figura 18 - Organograma do procedimento de avaliação de estruturas de concreto armado



Fonte: Autor (2024).

A norma NBR 7584 (ABNT, 2012) indica que o método esclerométrico consiste basicamente em determinar a energia de impactos da massa-martelo (Figura 19) sobre determinada superfície de concreto. Assim, quanto maior for a resistência da superfície ensaiada, menor será a energia que se converte em deformação permanente, ou seja, maior deverá ser o recuo da deflexão do martelo, pois terá um retorno do martelo mais rápido devido à maior dureza superficial.

Figura 19 - Diagrama de operação do esclerômetro de reflexão



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Tosetto (2017) realizou um estudo com a finalidade de verificar a viabilidade da construção de mais um pavimento sobre uma estrutura já existente. A edificação estudada, ilustrada na Figura 20, é um edifício comercial localizado no Setor de Embaixadas Sul, em Brasília. O estudo incluiu uma inspeção predial detalhada para levantar dados estruturais, de fundação e de solo, essenciais para determinar a viabilidade da obra. Além disso, os dados da edificação foram levantados através de ensaios destrutivos e não destrutivos, afim de conhecer ao máximo as propriedades estruturais da edificação.

Figura 20 - Edificação estudada



Fonte: Tosetto (2017).

Para os ensaios, houve o uso de pacometria, esclerometria, ultrassonografia, aplicação de fenolftaleína e extração de corpos de prova, além da execução da sondagem do solo e verificação do tipo de fundação.

Ao analisar os resultados pôde-se observar que, através do ensaio de esclerometria os concretos dos edifícios apresentam boa dureza superficial. Estes dados foram comparados com os resultados de outros ensaios para se chegar a um diagnóstico mais preciso sobre a qualidade dos concretos utilizados na construção dos edifícios, pois existem fatores que influenciam na correlação dos índices esclerométricos com a resistência à compressão do concreto. Estes resultados são obtidos pelos dados do equipamento, uma vez que a norma fornece os índices esclerométricos.

### 2.3.3 Pacometria

O ensaio de pacometria utiliza-se de um aparelho chamado pacômetro, ilustrado na Figura 21, que localiza barras de aço no concreto por meio de ondas eletromagnéticas de baixa frequência. Esse aparelho portátil pode determinar a posição das barras, a espessura do revestimento e o diâmetro das barras de aço, baseando-se na influência do aço no campo magnético de um eletroímã (Pedroza, 2018). Ainda segundo Candian (2017), por não haver

normalização nacional, os procedimentos aplicados ao ensaio de pacometria devem seguir as orientações de normas internacionais como a *British Standard* (BS) 1881 Part 204:1988 e a ACI 228.2R-21:2004.

Figura 21 - Ensaio de pacômetria em pilar de concreto



Fonte: Tosetto (2017).

A norma ACI 228.2R-21-2004 do American Concrete Institute (ACI) fornece diretrizes detalhadas para o ensaio de pacometria. Este ensaio emprega pacômetros eletromagnéticos, que operam por indução eletromagnética, e exige a calibração prévia do equipamento e a limpeza da superfície do concreto. Durante o ensaio, o pacômetro é movido sobre a superfície do concreto para identificar a posição e o recobrimento das armaduras, com a norma oferecendo orientações sobre a interpretação dos dados e as limitações do método, como interferências e profundidade de detecção. Aplicado em inspeções de rotina, avaliações de conformidade, diagnósticos estruturais e planejamentos de manutenção, o ensaio de pacometria descrito pela ACI 228.2R-21-2004 é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto armado.

O planejamento da inspeção para análise de pacometria envolve várias etapas essenciais para garantir a precisão e a eficácia do procedimento, conforme demonstrado no organograma da Figura 22. Inicialmente, deve-se definir o objetivo da inspeção e selecionar as áreas específicas da estrutura que serão analisadas. Em seguida, é fundamental garantir que a

superfície do concreto esteja preparada adequadamente, removendo qualquer sujeira ou detrito que possa interferir nas leituras.

Figura 22 - Organograma de ensaio de pacometria

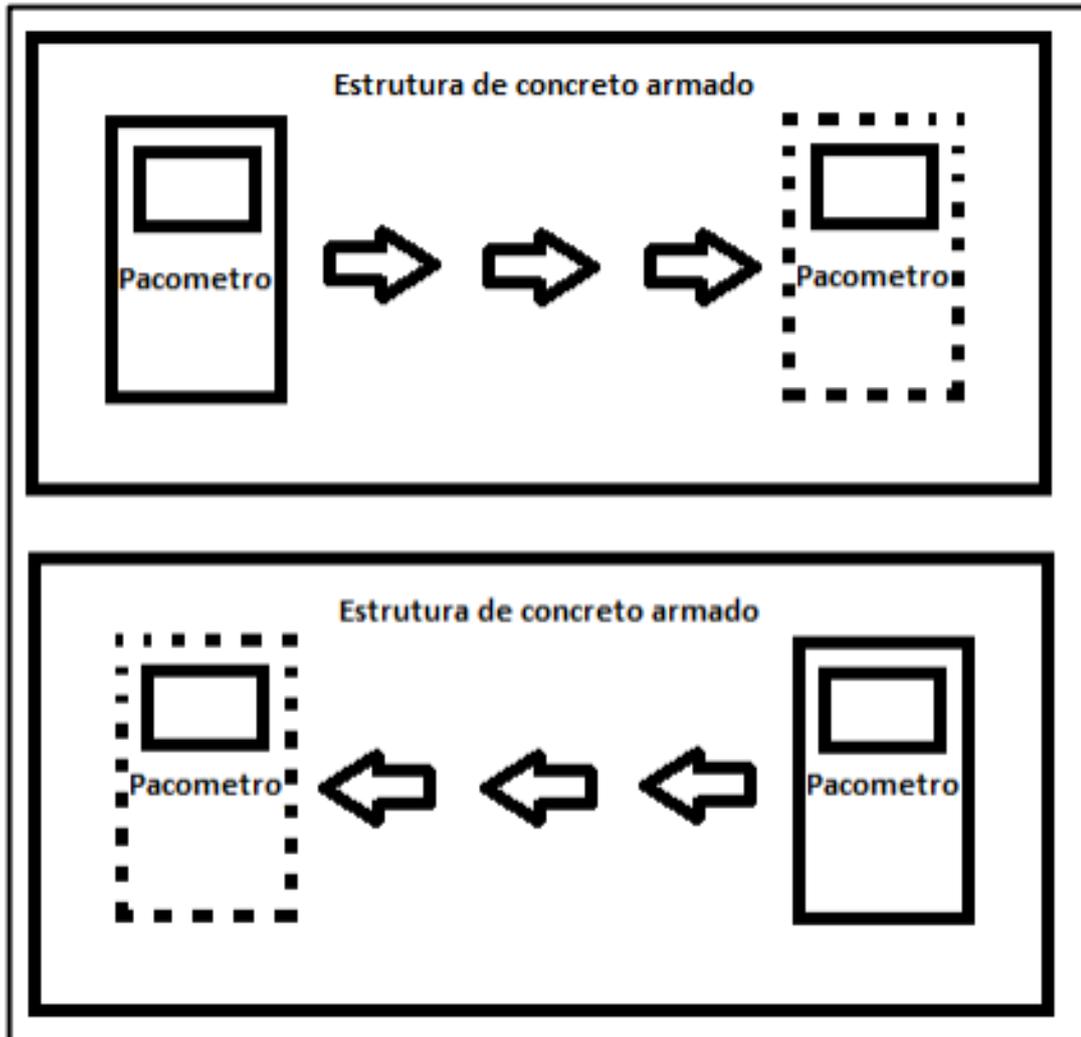


Fonte: Autor (2024)

Para a realização do ensaio, a superfície do molde deve estar lisa, e o aparelho deve ser passado continuamente, sem removê-lo da estrutura até o fim do procedimento. O pacômetro deve ser passado lentamente pela superfície do molde de concreto armado no sentido horizontal, e para fazer com que o equipamento execute a leitura, deve-se executar o movimento contrário, voltando para o início, conforme a Figura 23. Quando estiver voltando com o aparelho, o pacômetro emitirá um alerta sonoro e visual (luz vermelha) no local em que for localizada uma barra de aço. No visor, ele indicará o cobrimento do aço e a posição do aço, e em alguns aparelhos, ele mostrará também o diâmetro da barra. No estudo de Pedroza (2018), por exemplo, o equipamento mostrava apenas o corrimento e a posição da armadura, não

especificando o diâmetro dela.

Figura 23 - Instrução do Ensaio de Pacometria através da figura



Fonte: Pedroza (2018).

O estudo realizado por Tosetto (2017) teve como finalidade verificar a viabilidade da construção de mais um pavimento sobre uma estrutura já existente, no edifício comercial localizado no Setor de Embaixadas Sul, em Brasília. A caracterização das armaduras das estruturas tinha como objetivo servir de base para a elaboração do projeto estrutural das edificações e posteriormente análise estrutural. Além de sua importância no levantamento de dados para a análise estrutural, este ensaio teve importância para guiar outros ensaios que foram realizados (esclerometria, ultrassonografia e extração de testemunhos). Da Figura 24 demonstra a utilização do equipamento de pacometria sendo usado no pilar do edifício da Embaixada Sul, em Brasília.

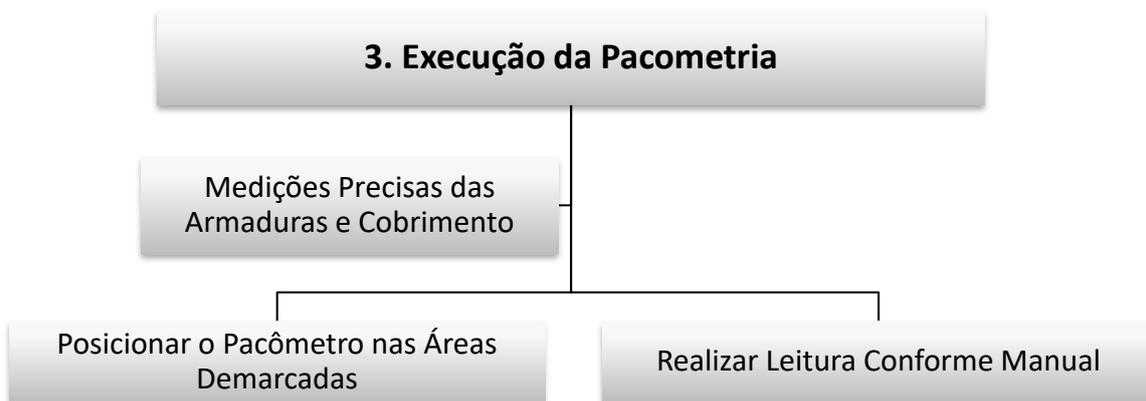
Figura 24 - Ensaio de pacometria em pilares



Fonte: Pedroza (2018).

Com o intuito de ajudar a organizar as etapas do processo de avaliação de estruturas de concreto armado, foi criado um procedimento operacional representado no organograma da Figura 25.

Figura 25 - Organograma de ensaio de pacometria



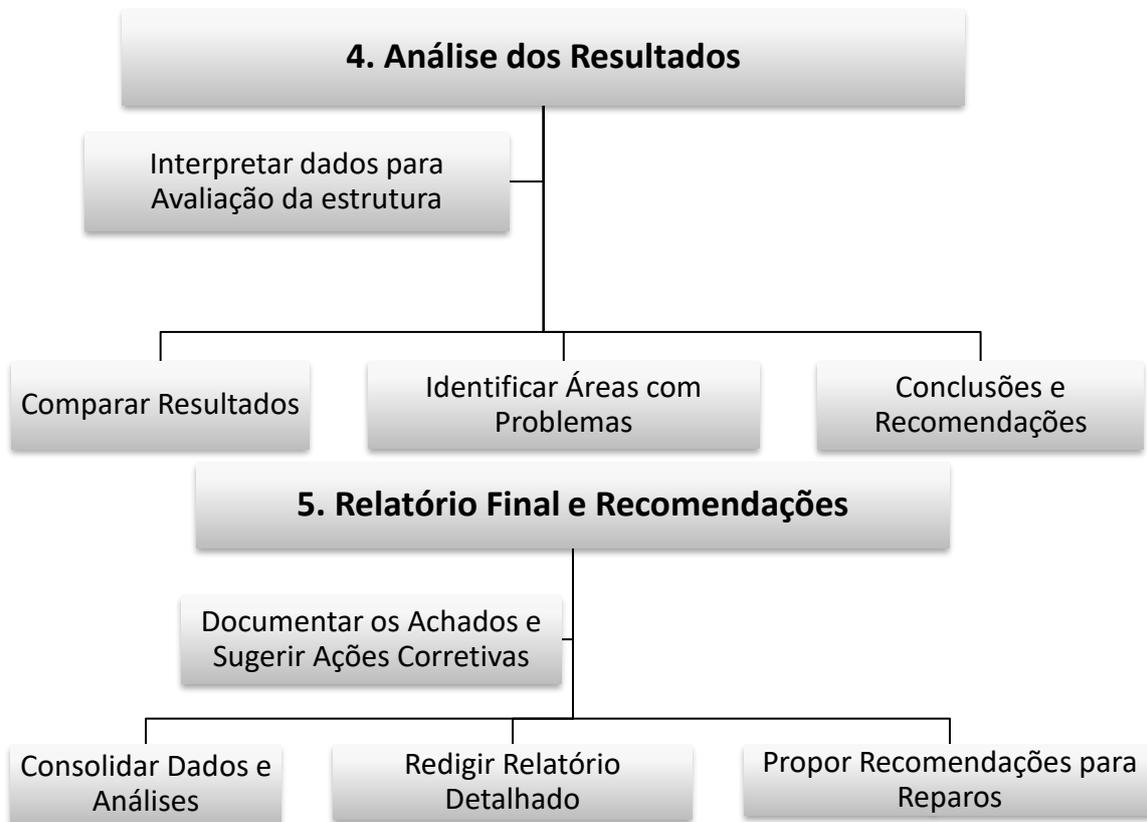
Fonte: Autor (2024).

A interpretação dos resultados de uma medição de pacometria em estrutura de concreto armado começa com a verificação das leituras de cobertura e posicionamento das barras de aço. A cobertura, ou espessura do concreto sobre a armadura, deve ser comparada com os valores especificados no projeto para assegurar que está dentro dos limites aceitáveis. Leituras que indiquem uma cobertura insuficiente podem sugerir riscos de corrosão da armadura, enquanto

uma cobertura excessiva pode comprometer a resistência e a capacidade de carga da estrutura.

Essa estrutura metodológica fornece uma visão clara e detalhada das etapas envolvidas na análise de pacometria, garantindo que todas as fases do processo sejam realizadas de maneira lógica e sequencial. A organização das etapas, desde o planejamento da inspeção até a análise dos resultados e a elaboração do relatório final, assegura que a avaliação seja completa e confiável. Isso é fundamental para identificar problemas estruturais e propor ações corretivas eficazes, ou para acompanhamento e manutenção das estruturas, contribuindo para a longevidade e segurança das edificações.

Figura 26 - Organograma de ensaio de pacometria



Fonte: Autor (2024).

A posição das barras de aço, indicada pelo pacômetro, deve ser analisada para confirmar se as barras estão corretamente espaçadas e posicionadas conforme o projeto. Desvios significativos na posição das barras podem indicar problemas na execução do concreto armado, como deslocamentos durante a concretagem. Se o pacômetro utilizado fornecer o diâmetro das barras, essa informação também deve ser verificada em relação ao projeto para garantir que as barras usadas têm o tamanho adequado. Todos os dados coletados devem ser documentados e comparados com os requisitos do projeto estrutural e as normas técnicas pertinentes, permitindo

a identificação de possíveis falhas e a necessidade de correções ou reforços na estrutura.

Segundo Tosetto (2017), a avaliação da estrutura do edifício em estudo apresenta deformações compatíveis e armaduras suficientes para resistir aos esforços de flexão. Entretanto, ao acrescentar um pavimento superior, verificou-se a necessidade de reforço em diversos elementos. Assim, o autor recomendou a contratação de uma empresa especializada ou um profissional habilitado para a elaboração de projetos estruturais.

No caso de modificações, como a adição de pavimentos, a pacometria é crucial para determinar a necessidade de reforços estruturais, garantindo a segurança e a estabilidade da edificação. O monitoramento contínuo das condições estruturais ajuda a prevenir colapsos e a conservar o valor do imóvel, aumentando a confiança de investidores e compradores na segurança e qualidade da construção.

#### **2.3.4 Ensaio de Penetração (Windsor)**

O ensaio de penetração Windsor, regulamentado pela norma Americana ASTM C803/C803M (ASTM, 2020), é um método não destrutivo utilizado para estimar a resistência à compressão do concreto *in situ*. Este ensaio é realizado utilizando um dispositivo específico que dispara pinos de aço contra a superfície do concreto, conforme demonstra a Figura 27. A profundidade de penetração desses pinos é medida e correlacionada com a resistência à compressão do concreto. Para garantir resultados precisos, é fundamental seguir rigorosamente os procedimentos estabelecidos pela norma. A profundidade de penetração é inversamente proporcional à resistência do concreto, ou seja, quanto menor a penetração, maior a resistência do concreto.

Helene (2009) destaca a importância do ensaio Windsor na avaliação da integridade estrutural de concretos já em serviço. Este ensaio permite detectar variações na resistência do concreto ao longo da estrutura e identificar áreas que possam necessitar de atenção ou reparo. O autor ainda enfatiza que, embora o ensaio Windsor seja útil para fornecer uma estimativa rápida da resistência do concreto, ele deve ser utilizado em conjunto com outros métodos de avaliação para uma análise mais completa e precisa.

O ensaio de penetração Windsor, segundo Helene (2009), é uma ferramenta não destrutiva valiosa, sobretudo por sua rapidez e a praticidade de execução, além de sua capacidade de fornecer dados imediatos sobre a qualidade do concreto, especialmente útil em avaliações de estruturas existentes onde métodos destrutivos não são viáveis.

O procedimento inicia-se com a seleção de áreas representativas e seguras na estrutura

de concreto, evitando-se locais visivelmente deteriorados. A superfície do concreto deve ser limpa e preparada, removendo-se qualquer material solto para assegurar a precisão da medição. Em seguida, o dispositivo de penetração deve ser calibrado utilizando blocos de concreto de resistência conhecida. Esta calibração é essencial para garantir a precisão da correlação entre a profundidade de penetração e a resistência à compressão.

Figura 27 - Execução do ensaio de penetração de pino



Fonte: Joffily, (2011).

Após a preparação e calibração, o dispositivo Windsor Probe é posicionado perpendicularmente à superfície do concreto, e o pino de aço é disparado. A profundidade de penetração é medida com um medidor específico e registrada. É recomendado realizar múltiplas medições em diferentes pontos da área de teste para obter uma média representativa. As profundidades de penetração são então convertidas em estimativas de resistência à compressão utilizando tabelas de correlação fornecidas pelo fabricante do dispositivo.

Joffily (2011) aplicou o método para análise de concreto não conforme em obras na região de Brasília, conforme Figura 28. A ASTM C803 (2020) limita a distância mínima entre dois pinos a 175 mm e a 100 mm entre o pino e as superfícies. A norma também apresenta valores máximos entre os valores obtidos para as três penetrações realizadas. Caso o valor obtido seja superior ao estabelecido, deve-se realizar mais um disparo.

Figura 28 - Ensaio realizado na viga e na laje da obra B



Fonte: Joffily, (2011).

O estudo de Joffily (2011) permitiu concluir que o ensaio de penetração de pino pode ser utilizado para avaliação da resistência do concreto, desde que elaborada curva de correlação para os materiais utilizados, principalmente para resistências menores. Pois, para os concretos com resistências menores, o tamanho máximo do agregado graúdo assim como a quantidade, se mostraram influentes no resultado do ensaio. Contudo, à medida que a resistência do concreto aumentou, essas variáveis se tornaram indiferentes quando da execução do ensaio de penetração de pino.

Joffily (2011) tinha como objetivo identificar e analisar parâmetros do concreto submetido ao ensaio de penetração de pino, utilizando materiais de Brasília. O estudo piloto definiu parâmetros como potência e distância entre penetrações, resultando na elaboração de curvas de correlação específicas para os concretos locais. Constatou-se que a dimensão e a quantidade de agregado graúdo influenciam significativamente a resistência à compressão em concretos de menores resistências, mas essa influência diminui em concretos mais resistentes. A pesquisa concluiu que o ensaio de penetração de pino é eficaz na avaliação da resistência do concreto, desde que se elaborem curvas de correlação apropriadas para os materiais utilizados.

### **2.3.5 Ensaio de Permeabilidade ao Ar ou à Água**

#### **2.3.5.1 Ensaio de Permeabilidade ao Ar**

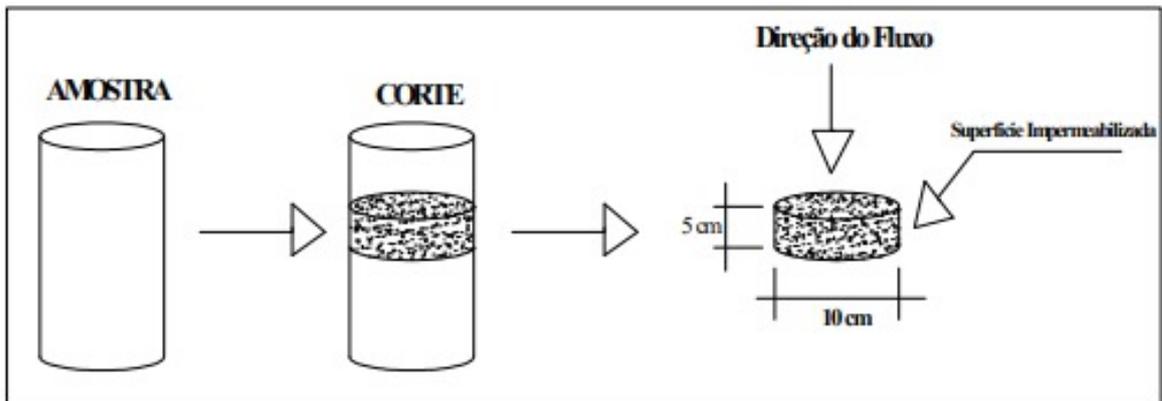
A permeabilidade do concreto é fundamental para sua durabilidade. Por isso, métodos que avaliam essa característica são cada vez mais cruciais. A medição da permeabilidade ao ar oferece várias vantagens em relação à permeabilidade a outros fluidos. Isso ocorre porque os

valores obtidos são mais confiáveis devido às propriedades físicas e químicas do ar, que não interagem com os compostos hidratados da pasta de cimento no concreto, ao contrário do que ocorre com a permeabilidade à água.

Ademais, segundo Pereira (2011), a porosidade capilar do concreto, que consiste nos poros interconectados, desempenha um papel crucial na determinação da taxa de entrada e movimentação de substâncias agressivas como íons cloreto, sulfatos e dióxido de carbono, e isso pode influenciar e até comprometer sua vida útil e sua durabilidade no caso de materiais à base de cimento, está diretamente ligada à sua estrutura porosa. A porosidade capilar e, conseqüentemente, a permeabilidade desses materiais, determina quão facilmente os agentes agressivos podem penetrar, afetando sua integridade física e química.

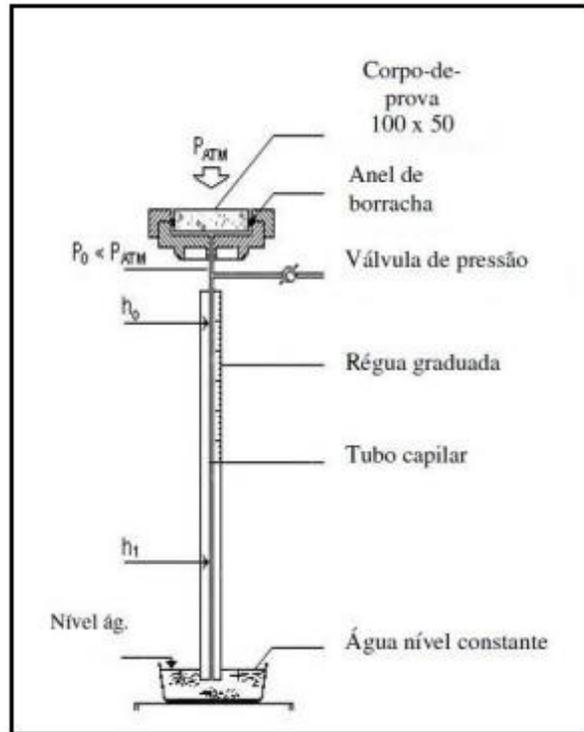
A Figura 29 ilustra o procedimento realizado por Pereira (2011) para determinação da permeabilidade ao ar do concreto, deixando as amostras por 24h em estufa, à temperatura de 50 graus. A Figura 30 ilustra o modelo do aparelho utilizado no referido estudo.

Figura 29 - Preparação das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar



Fonte: Pereira (2011).

Figura 30 - Modelo de aparelho utilizado para os ensaios



Fonte: Pereira (2011).

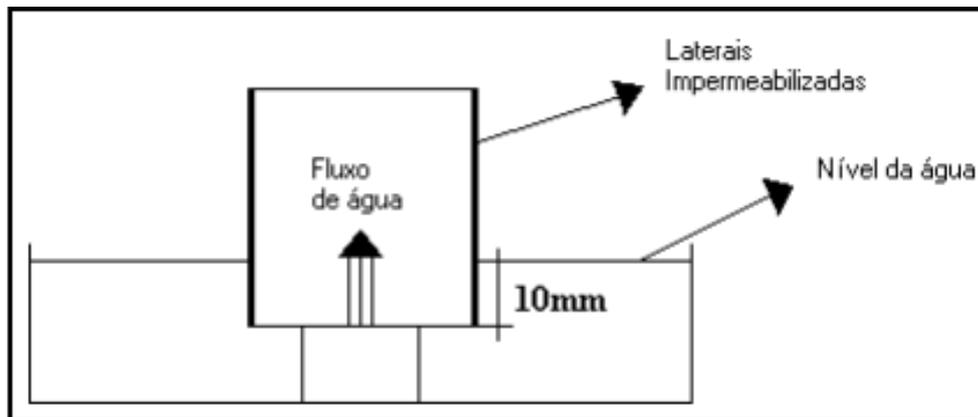
Segundo Pereira (2011), a partir dos resultados de permeabilidade ao ar obtidos foi possível observar que a relação água/cimento, idade e tipo de cura influenciaram na permeabilidade ao ar do concreto, onde menores relações água/cimento e maiores idades proporcionaram menores valores desta propriedade do concreto, assim como a cura imersa também apresentou tendência na diminuição da permeabilidade ao ar das séries de concretos produzidas.

O estudo de Pereira (2011) concluiu que a metodologia empregada para avaliar a permeabilidade ao ar do concreto é válida, com resultados, embora mais estudos sejam recomendados para avaliar divergências em diferentes trabalhos. Observou-se que a relação água/cimento afeta a permeabilidade, com menores valores em concretos apresentando menor relação água/cimento. Além disso, concretos com 7 dias de hidratação apresentaram maior permeabilidade do que aqueles com 28 e 350 dias. O tipo de cura também influenciou a permeabilidade, sendo menores em concretos submetidos à cura imersa em comparação com cura ambiente.

### 2.3.5.2 Absorção de água por capilaridade

A avaliação da absorção de água por capilaridade, realizada por Pereira (2011), fora feita de modo que, antes dos ensaios, as amostras permaneceram em estufa por um período de 24 horas a uma temperatura de 50 °C. A temperatura de 50 °C foi utilizada pelos mesmos motivos do ensaio de determinação do índice de vazios do concreto. Para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, as amostras tiveram suas faces laterais impermeabilizadas, garantindo que a ascensão capilar de água ocorresse somente no sentido perpendicular à área da amostra em contato com a água, conforme ilustrado na Figura 31. As amostras tiveram suas faces inferiores imersas 10 mm na água.

Figura 31 - Aparelho de ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Pereira (2011).

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade a amostra teve seu peso determinado após secagem em estufa, em seguida foi medido o peso da amostra em contato com a água quando decorridos 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 6 horas, 8 horas e 24 horas. Tendo esses valores, aplica-se a equação ilustrada na Figura 32 para obtenção do índice de absorção de água por capilaridade.

Figura 32 - Equação utilizada para cálculo do índice de absorção de água por capilaridade

$$C = \frac{A - B}{S}$$

$C$  = absorção de água por capilaridade ( $g/cm^2$ );  
 $A$  = massa do corpo-de-prova que permanece em contato com a água durante o tempo especificado ( $g$ );  
 $B$  = Massa do corpo-de-prova seco ( $g$ ); e  
 $S$  = área de secção transversal da amostra ( $cm^2$ ).

Fonte: Pereira (2011).

### 2.3.6 Potencial de Corrosão

A corrosão de armaduras é um problema comum em estruturas de concreto armado, influenciado por ambientes agressivos, umidade, alta porosidade, alta capilaridade, deficiência de cobrimento, materiais de construção de baixa qualidade e fissuração acentuada (Silva, 2021).

Ademais, Silva (2011) destaca que as formas mais comuns de corrosão são a corrosão generalizada irregular, relacionada à carbonatação do concreto, e a corrosão por pites (puntiforme), causada pela ação dos íons cloreto que rompem a capa passiva do metal. A medida do potencial de corrosão é uma ferramenta utilizada para classificar a probabilidade de corrosão das armaduras, permitindo a identificação de degradações internas nas estruturas. Este método é prático e de baixo custo, facilitando a identificação de zonas de aço despassivadas que necessitam de reparos.

A análise de corrosão, conforme estabelecida pela norma ASTM C876:2020, serve para avaliar a probabilidade de corrosão do aço de reforço não revestido em estruturas de concreto armado. Esse processo é essencial para identificar áreas potencialmente comprometidas em pontes, edifícios e outras infraestruturas, permitindo intervenções preventivas e corretivas para assegurar a integridade e a longevidade das construções.

O método de análise de corrosão envolve a medição do potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência, geralmente de cobre/cobre-sulfato. O eletrodo de referência é colocado em contato com a superfície do concreto, enquanto uma conexão elétrica é estabelecida com o aço das armaduras. As medições de potencial elétrico indicam a probabilidade de corrosão, sendo que potenciais mais negativos sugerem uma maior propensão à corrosão, enquanto potenciais mais positivos indicam menor probabilidade de corrosão.

Essa avaliação não destrutiva é vantajosa porque permite monitorar a condição do aço de reforço sem danificar a estrutura. Além disso, fornece dados críticos para a manutenção

preventiva, ajudando a identificar problemas antes que se tornem graves e possibilitando a implementação de medidas corretivas. Em resumo, a análise de corrosão é uma ferramenta fundamental para manter a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto armado, garantindo a sua eficiência e segurança a longo prazo.

O estudo de Silva (2021) contribuiu significativamente para entender os fatores de deterioração de estruturas em concreto armado e auxiliou no processo futuro de restauração da Ponte Juscelino Kubitschek. Além disso, através da análise de potencial de corrosão tornou-se possível a caracterização do estado estrutural da Ponte JK, em Aracati, Ceará, conforme Figura 33, e o estudo do comportamento da corrosão utilizando inspeção técnica visual, bibliografias técnicas, ensaios de Potencial de Corrosão (ASTM C876:2020), e modelagem numérica.

Figura 33 - Ponte Juscelino Kubitschek, Aracati, Ceará



Fonte: Silva (2021)

Para Silva (2021) a avaliação do potencial de corrosão em estruturas de concreto armado envolve um conjunto de procedimentos sistemáticos, essenciais para identificar e analisar a suscetibilidade à corrosão das armaduras. Inicialmente, a área a ser inspecionada deve ser cuidadosamente delimitada e limpa, removendo qualquer sujeira, revestimento ou contaminação superficial que possa interferir nas medições. Em seguida, pontos de medição são marcados na superfície do concreto, geralmente em uma grade uniforme, a fim de garantir uma cobertura abrangente da área estudada, conforme demonstra a Figura 34.

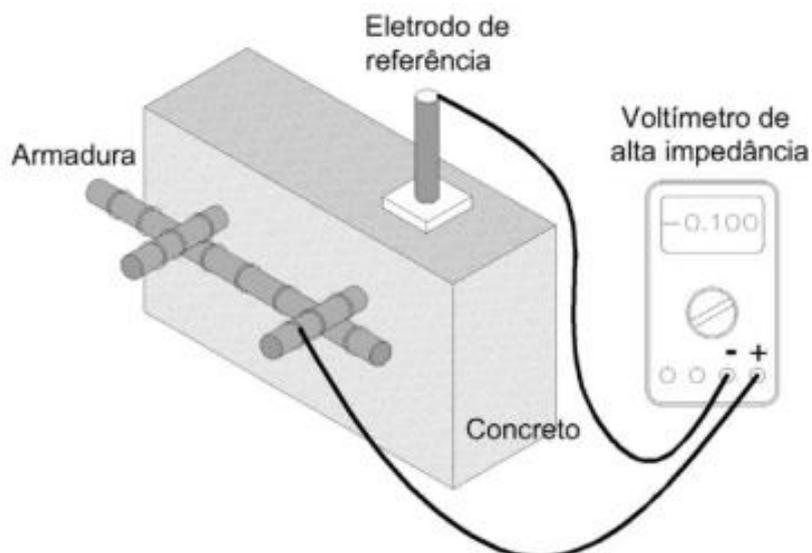
Figura 34 - Observação e identificação das anomalias, e corrosão visível do aço



Fonte: Silva (2021).

A técnica utiliza um eletrodo de referência, comumente um eletrodo de cobre-sulfato, que é empregado em conjunto com um eletrodo de trabalho conectado à armadura de aço. Por meio de um potenciômetro, a diferença de potencial entre os eletrodos é medida em cada ponto previamente marcado. Esses valores de potencial são registrados e comparados com os critérios estabelecidos pelas normas técnicas, como a ASTM C876:2020, que fornecem diretrizes para a interpretação dos resultados (Nobre *et al.*, 2020). A Figura 35 ilustra o referido ensaio.

Figura 35 - Esquema da medida do potencial de corrosão



Fonte: ASTM C-876 (2020).

Valores de potencial mais negativos indicam uma maior probabilidade de corrosão ativa, conforme a Tabela 3. Após a coleta dos dados, elabora-se um mapa de contorno dos potenciais de corrosão, permitindo a visualização das áreas mais propensas à corrosão. Essa análise inicial é fundamental para identificar zonas críticas e fornece uma base sólida para decisões relativas a intervenções de manutenção ou reparo, contribuindo significativamente para a extensão da vida útil da estrutura de concreto armado (Nobre *et al.*, 2020).

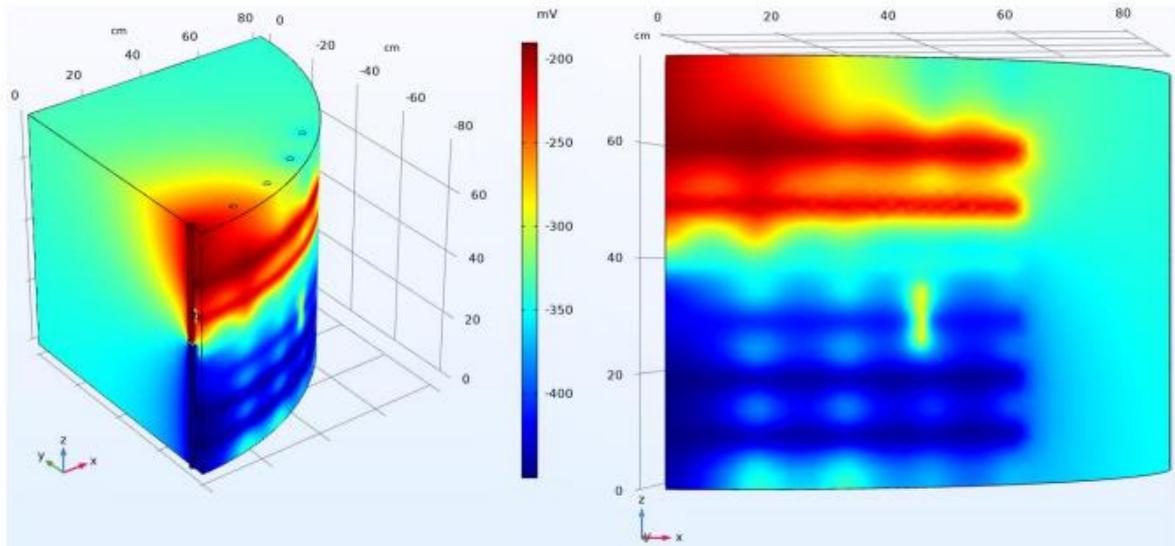
Tabela 3 - Classificação de condição no Ensaio de Potencial de Corrosão

<b>Condição</b>	<b>Potencial (mV)</b>	<b>Análise</b>
Boa	> -200mV	Ausência de corrosão
Corrosão iniciada	entre -200mV e -350 mV	Indícios de corrosão
Inaceitável	< -350mV	Corrosão ativa

Fonte: Adaptado da norma C876 (ASTM, 2020).

Ensaio de potencial de corrosão são empregados para identificar áreas com alta probabilidade de corrosão ativa nas armaduras. Além disso, testes de resistência do concreto, como ensaios de compressão e extração de testemunhos, são realizados para avaliar a capacidade de carga e a condição do concreto. Outros métodos, como a termografia infravermelha, podem ser utilizados para detectar anomalias térmicas associadas a problemas de umidade e infiltração. A análise química do concreto, incluindo a medição do potencial hidrogeniônico (pH) e da concentração de cloretos, é crucial para avaliar a corrosividade do ambiente interno do concreto. Com o intuito de ajudar a organizar as etapas do processo de avaliação de estruturas de concreto armado, foi criado um procedimento operacional no organograma da Figura 37.

Figura 36 - Resultado do Ensaio de Potencial de Corrosão



Fonte: Silva (2021).

Dessa forma, um procedimento operacional padrão bem definido permite que o processo de avaliação seja mais eficiente, economizando tempo e recursos, além de reduzir a possibilidade de erros e omissões. Isso assegura uma avaliação mais precisa e confiável dos problemas estruturais. Além disso, o organograma oferece uma base estruturada para a tomada de decisões sobre reparos e intervenções, fundamentadas em uma avaliação sistemática e abrangente. Também garante que o processo de avaliação esteja em conformidade com as normas técnicas e regulamentações vigentes, promovendo práticas de engenharia seguras e responsáveis.

Figura 37 - Organograma de ensaio de potencial de corrosão



Fonte: Autor (2024).

Segundo Silva (2021), os ensaios de potencial de corrosão medem o potencial eletroquímico para identificar a presença e severidade da corrosão em elementos estruturais. A inspeção técnica é organizada com base nos projetos executivos, dividindo a área de estudo em segmentos, como áreas de tubulões em contato com a água e áreas em solo firme. No procedimento dos ensaios, são realizadas marcações de malhas na superfície do concreto, medição do potencial eletroquímico com um eletrodo de referência contendo solução de sulfato de cobre, e saturação das áreas com água antes do ensaio. Ainda segundo Silva (2021), os resultados são interpretados qualitativamente conforme a norma C-876 (ASTM, 2020), classificando a condição como boa, com corrosão iniciada, ou inaceitável e, a distribuição do potencial eletroquímico é representada por linhas equipotenciais, ajudando a localizar áreas de corrosão ativa, e pode ser modelada pelo Método de Elementos Finitos (MEF).

Os resultados das análises de corrosão são apresentados de forma clara, incluindo mapas de corrosão e potenciais eletroquímicos, para orientar os usuários nas intervenções corretivas. A metodologia do *Comitée Européen de Normalisation* (CEN) para inspeção e diagnóstico da corrosão oferece uma abordagem sistemática para identificar, analisar e corrigir problemas em estruturas de concreto armado, resultando em diagnósticos precisos e ações corretivas eficientes, garantindo a integridade estrutural e prolongando a vida útil das construções oferecendo mais segurança aos usuários.

### **2.3.7 Ensaio de Profundidade de Carbonatação**

A carbonatação é um mecanismo de deterioração do concreto, ocasionado pela penetração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), fazendo com haja a diminuição do pH do concreto e suas armaduras sofram o processo de despassivação, que retira a camada protetora do concreto. O ensaio de avaliação à frente de carbonatação consiste na visualização do pH do concreto de cobrimento da armadura, aspergindo a solução de fenolftaleína (1 g da 16 fenolftaleína em 50 ml de álcool etílico e diluição desta mistura em água destilada até completar 100 ml) que é um indicador. Essa substância irá reagir com os produtos das reações de hidratação do cimento e alterará a coloração de acordo com a alcalinidade do concreto podendo ficar com uma cor rosada ou transparente (Magalhães, Figueiredo e Da Cunha Oliveira, 2018).

A norma *Norme Européenne* EN 14630:2006, emitida pelo (CEN), estabelece o método padrão para a determinação da profundidade de carbonatação no concreto endurecido utilizando a solução de fenolftaleína como indicador de pH. O procedimento envolve a coleta de amostras representativas da estrutura de concreto, a preparação das superfícies das amostras e a aplicação

da solução de fenolftaleína. A solução muda de cor em contato com concreto não carbonatado (pH acima de 9), adquirindo uma coloração rosa, enquanto permanece incolor em áreas carbonatadas (pH abaixo de 9).

Para realizar o ensaio, a solução é pulverizada sobre a superfície recém-exposta do concreto, e a profundidade de carbonatação é medida a partir da superfície externa até a interface onde ocorre a mudança de cor. Essas medições são realizadas em diferentes pontos da amostra para obter uma média representativa.

Seguir as diretrizes estabelecidas na norma (EN) 14630:2006 é essencial para garantir a precisão e a consistência dos resultados. A norma fornece orientações detalhadas sobre a preparação, execução e interpretação dos ensaios, além de especificar os requisitos para o equipamento utilizado. Assim, a norma contribui significativamente para a avaliação da durabilidade das estruturas de concreto e para o planejamento adequado de intervenções de manutenção e reparo.

Tosetto (2017), também analisou a carbonatação do concreto para avaliar a penetração de carbonatação nos elementos estruturais do Condomínio “A” na Embaixada Sul de Brasília, foram realizados ensaios em alguns testemunhos extraídos. As Figuras 38 e 39 ilustram a aplicação da fenolftaleína nos testemunhos extraídos do condomínio.

Figura 38 - Aplicação de fenolftaleína em testemunhos



Fonte: Tosetto (2017).

Figura 39 - Medição da frente de carbonatação em testemunhos de concreto



Fonte: Tosetto (2017).

### 2.3.8 Ensaio de Puxamento (Pull-off)

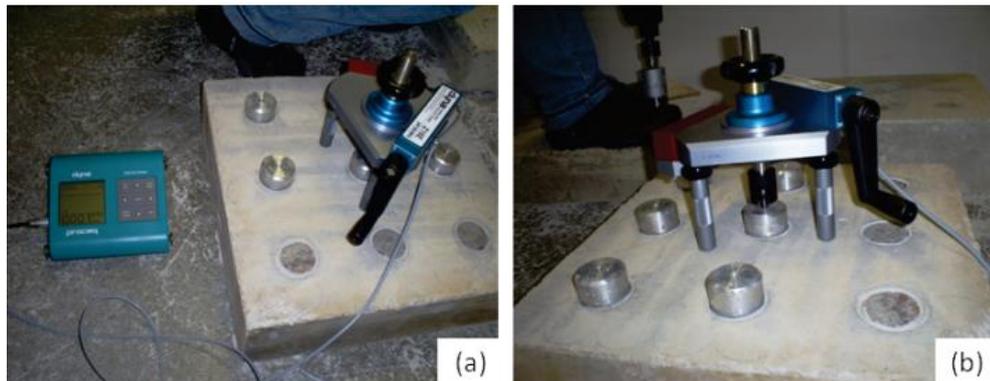
A norma D4541 (ASTM, 2022) para o ensaio de puxamento (pull-off) em revestimentos de concreto, descreve a preparação da superfície, a colagem de um disco de aço com adesivo adequado, a cura completa do adesivo, a aplicação controlada de força perpendicularmente à superfície até o arrancamento do revestimento, e o registro da força máxima aplicada. A resistência de adesão é calculada e analisada, considerando o tipo de falha ocorrida, para avaliar a qualidade da adesão e a integridade do concreto. Seguir essas etapas garante a consistência e a confiabilidade dos resultados.

Para Martins *et al.* (2014), o estudo da aderência entre no concreto armado é de extrema importância, pois tem sua existência resumida a solidariedade entre as armações feitas com barras de aço e o material concreto. Sendo assim, para garantir a qualidade e segurança destas estruturas deve-se realizar estudos para análise da aderência do aço e concreto.

Pereira e De Medeiros (2012) realizaram um estudo com objetivo de analisar a viabilidade do uso do ensaio de “Pull Off” como ferramenta de inspeção em concreto e ainda divulgar a possibilidade de emprego de técnicas complementares as normalizadas no Brasil. Dada a sua grande simplicidade, o ensaio pode ser executado na própria estrutura, inclusive sem planejamento anterior a concretagem. A técnica é eficiente para ser utilizada em vigas e lajes, pois o ensaio mostra-se também adequado para execução em elementos estruturais de

pequena seção, sendo suficiente uma única face de exposição do elemento para realização do ensaio. Outro ponto importante é o fato de que o equipamento utilizado na execução do “Pull Off” conforme a Figura 40, é o mesmo utilizado nos ensaios de aderência em argamassas, já normatizado no Brasil a alguns anos, o que pode facilitar sua aplicação (Pereira, de Medeiros, 2012).

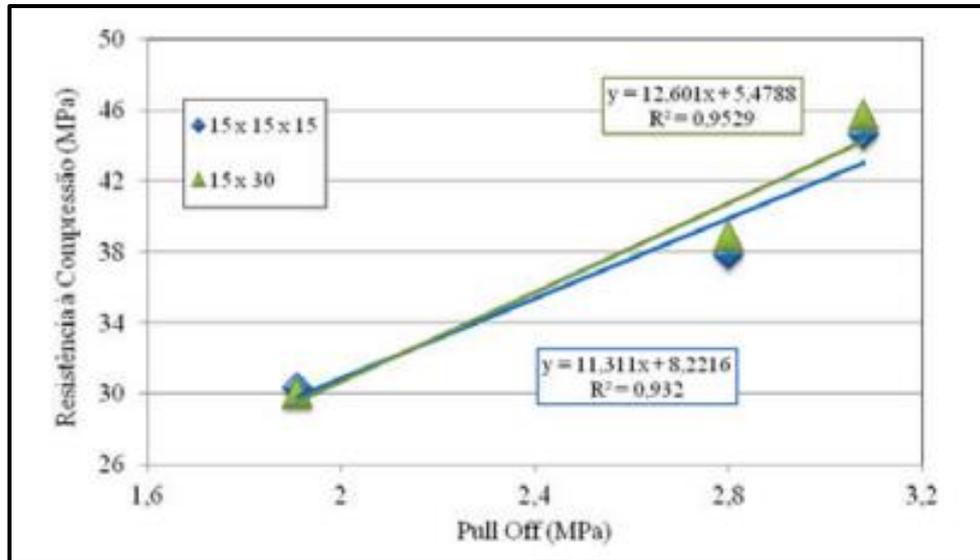
Figura 40 - “Pull Off” Test: (a) Ensaio de arrancamento e (b) equipamento de ensaio



Fonte: Pereira, de Medeiros (2012).

A Figura 41 apresenta a correlação entre os resultados dos ensaios de “Pull Off” obtidos através do arrancamento na superfície de placas de concreto e a resistência à compressão medida em corpos de prova moldados com o mesmo concreto das placas. Ao se analisar os valores obtidos com o programa experimental, bem como os gráficos apresentados, pode-se concluir que o ensaio de “Pull off” (ensaio de campo) mostra resultados consistentes para comparação de seus valores com os resultados de resistência obtidos em laboratório, sendo uma ferramenta adequada para avaliação da resistência do concreto *in situ*.

Figura 41 - Correlação entre os ensaios de “Pull Off” e resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos



Fonte: Pereira, de Medeiros (2012).

Os resultados obtidos com o ensaio “Pull Off” demonstram que ele é plenamente viável para a estimativa da resistência mecânica do concreto in situ, com alta correlação com o ensaio de compressão simples ( $R^2$  acima de 0,93) em corpos de prova cilíndricos e cúbicos. O ensaio é simples de executar e utiliza o mesmo equipamento empregado na medição da resistência de aderência em argamassas, o que facilita sua aplicação e popularização. Além disso, a operação do equipamento é relativamente simples, exigindo mão de obra treinada, mas sem necessidade de grande qualificação profissional, similar ao esclerômetro e ao ultrassom.

Por fim, Pereira e De Medeiros (2012), recomendam que este ensaio seja assunto de estudo por outros pesquisadores, a fim de futuramente ser objeto de normalização no Brasil, assim como já é normalizado na Europa.

### 2.3.9 Ensaio de Resistividade Elétrica

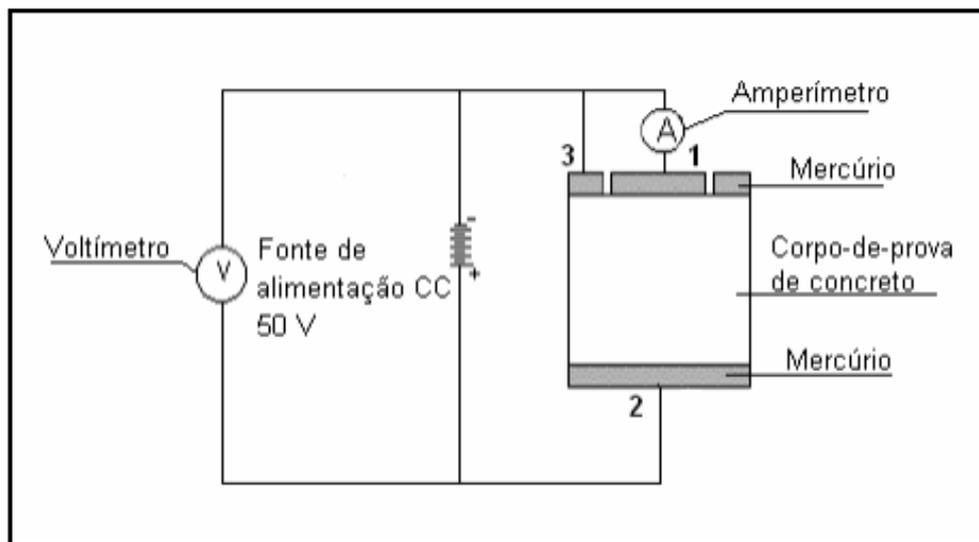
A resistividade elétrica é uma propriedade essencial do concreto que indica sua capacidade de resistir à corrente elétrica. Esta característica está diretamente ligada à permeabilidade dos fluidos e à difusão de íons através dos poros do material. No contexto do concreto, ela influencia significativamente a velocidade de corrosão das armaduras (Santos, 2006).

De acordo com a NBR 9204 (ABNT, 2012), para a execução do ensaio de resistividade elétrica conforme a norma, a superfície do concreto deve estar limpa e livre de contaminações

que possam interferir na medição. O equipamento utilizado geralmente é um dispositivo portátil específico para medição de resistividade elétrica, como um multímetro adaptado ou um medidor de resistividade dedicado. Os eletrodos de contato são posicionados na superfície do concreto conforme especificado pela norma, garantindo um espaçamento uniforme e adequado entre eles.

Segundo Santos (2006), o ensaio começa com a aplicação de uma corrente elétrica entre os eletrodos externos, enquanto a diferença de potencial é medida entre os eletrodos internos. A resistividade elétrica do concreto é então calculada a partir dessas medições, utilizando fórmulas apropriadas que levam em consideração a geometria do posicionamento dos eletrodos e as características do material. A norma fornece diretrizes detalhadas para a realização dessas medições e para a interpretação dos resultados obtidos, garantindo que os valores de resistividade sejam representativos das condições reais do concreto.

Figura 42 - Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica



Fonte: Santos (2006).

O estudo realizado por Santos (2006) concluiu que a resistividade elétrica do concreto é um parâmetro sensível às características da porosidade, sendo influenciada pelo refinamento da estrutura de poros devido a reações pozolânicas e pela presença de sílica ativa. Observou-se uma boa correlação entre a resistividade elétrica e a porosidade específica, bem como uma relação inversa com os coeficientes de difusão. A resistividade elétrica mostrou-se viável para avaliar o período de iniciação da corrosão, embora o autor considera que sejam necessárias adaptações em algumas variáveis e considerações adicionais sobre a espessura de revestimento e

fatores construtivos que possam afetar os resultados.

### 2.3.10 Ensaio de Termografia

A termografia infravermelha é uma técnica de inspeção não destrutiva que permite a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas (termogramas) de componentes, equipamentos ou processos a partir da radiação infravermelha naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura. Segundo Mendonça (2005), a termografia por infravermelhos tem inúmeras aplicações em edifícios, sendo utilizada tanto para detectar causas de patologias visíveis quanto como instrumento de engenharia preventiva, identificando patologias ainda não aparentes.

Mendonça (2005) afirma que a termografia por infravermelhos é utilizada na inspeção de concreto há mais de 30 anos, demonstrando ser a tecnologia de ensaio não destrutivo mais precisa, econômica e eficaz. A termografia infravermelha utiliza câmeras infravermelhas para detectar variações de temperatura na superfície do concreto, fornecendo uma visão abrangente da integridade e condição de estruturas de concreto armado. Essas variações térmicas podem indicar problemas internos, como delaminações, vazios, infiltrações de água e defeitos nas armaduras (Mendonça, 2005).

Figura 43 - Câmera termográfica FLIR P65.

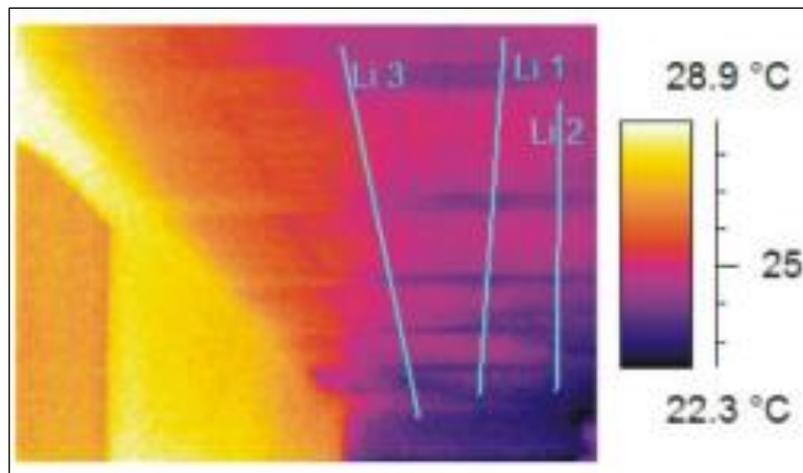


Fonte: Mendonça (2005).

A termografia por infravermelhos (TI) envolve a captura de imagens térmicas, que não são perceptíveis a olho nu, utilizando uma câmera termográfica, conforme demonstrado na

Figuras 43 e 44, usada como instrumento de engenharia preventiva, descobrindo patologias ainda não aparentes, mas já embrionárias.

Figura 44 - Detecção de uma infiltração não visível



Fonte: Mendonça (2005).

Segundo Mendonça (2005), a termografia infravermelha é destacada por sua precisão, economia e eficácia, mas requer experiência para a análise correta dos resultados, sendo inadequada para pessoas sem formação específica. Sua principal vantagem é a capacidade de cobrir áreas extensas, embora não determine a profundidade ou espessura dos defeitos, podendo ser complementada por ensaios de radar. A termografia não destrói a estrutura, reduz o tempo de inspeção, minimiza o trabalho e preserva a estética do concreto. Além disso, não emite radiação, apenas registra a radiação emitida pelo material. A maior vantagem da termografia é sua capacidade de mostrar a extensão das patologias internas, diferentemente dos métodos que testam pontos específicos.

Os conceitos de patologia, desempenho, durabilidade, vida útil e agressividade ambiental são fundamentais para entender a importância de um projeto detalhado e adequado ao ambiente onde a estrutura será inserida. O monitoramento das estruturas serve como uma ferramenta essencial para atualizar informações sobre a deterioração das mesmas e indicar o momento oportuno para intervenções preventivas. A verificação dos requisitos de qualidade e durabilidade das construções deve ser realizada em todas as etapas do processo construtivo, bem como nos trabalhos de reparo e reforço (Reis, 2001).

Essa técnica, amplamente utilizada na América do Norte há mais de 30 anos, é considerada o método de ensaio não destrutivo mais eficaz, econômico e preciso em comparação com outros métodos, como os radioativos ou nucleares. A termografia tem a vantagem de analisar áreas inteiras em vez de pontos ou linhas específicos, a técnica envolve a

captação de imagens de calor (termogramas) através de uma câmera termográfica, permitindo a identificação de anomalias internas no concreto, como vazios, corrosão de armaduras e infiltrações, ao medir a temperatura superficial do material.

### **2.3.11 Ultrassonografia**

De acordo com Magalhães, Figueiredo e Da Cunha Oliveira (2018), o ensaio de ultrassonografia é um método não destrutivo utilizado para medir a velocidade de propagação de ondas longitudinais em componentes de concreto por meio de pulsos ultrassônicos. Essa técnica permite avaliar a integridade e uniformidade do concreto em estruturas armadas, pois a velocidade das ondas é influenciada pela densidade e elasticidade do material. Isso possibilita a detecção de fissuras, vazios, delaminações e outras descontinuidades internas, conforme destacado por De Rezende (2019).

A norma ISO 1920-7:2004, estabelece diretrizes para ensaios não destrutivos em concreto, com foco principal na técnica de ultrassonografia. Para realizar esses ensaios, inicialmente, é essencial preparar o equipamento adequado, incluindo transdutores capazes de emitir e receber ondas ultrassônicas, além de dispositivos para medir o tempo de percurso das ondas. Antes de iniciar os testes no concreto, é crucial calibrar o equipamento de acordo com os padrões especificados pela norma e preparar a superfície do concreto, removendo quaisquer detritos que possam interferir na precisão dos resultados.

Durante o ensaio, aplica-se um acoplante na superfície do concreto para assegurar uma boa transmissão das ondas ultrassônicas entre o transdutor e a estrutura. O transdutor é posicionado em um lado da estrutura, emitindo pulsos de ondas ultrassônicas que viajam através do concreto até serem recebidos pelo receptor posicionado do outro lado. Mede-se então o tempo que as ondas levam para percorrer distâncias conhecidas dentro do concreto, permitindo calcular a velocidade das ondas ultrassônicas.

Após a coleta dos dados, os resultados são analisados para determinar variações na velocidade das ondas ultrassônicas, o que pode indicar anomalias estruturais, falhas ou variações na qualidade do concreto. Essas informações são documentadas em um relatório detalhado, que inclui interpretações dos dados obtidos, condições de teste, características da estrutura avaliada e recomendações necessárias para manutenção ou intervenção estrutural. Seguindo esses procedimentos conforme estipulado pela ISO 1920-7:2004, os ensaios de ultrassonografia são conduzidos de forma padronizada e confiável, contribuindo para a avaliação precisa da condição e integridade estrutural do concreto em diversas aplicações.

Segundo Magalhães, Figueiredo e Da Cunha Oliveira (2018), as inspeções prediais e avaliações de desempenho construtivo têm grande importância para com a prevenção e manutenção da vida útil de uma edificação, afim de prolongar a vida útil evitando o desgaste do sistema construtivo e perda de desempenho. Em alguns casos, as inspeções podem até evitar o colapso da estrutura, que vem acontecendo nos grandes centros urbanos devido à falta de manutenção principalmente na área de estruturas de concreto armado, onde não há manutenção/cuidado com corrosão da armadura. Em geral, esses processos de degradação ocorrem devido a um conjunto de fatores que não foram identificados e tratados corretamente levam a tal, sendo necessário o estudo detalhado encontrando-se as principais causas das falhas e sugestões de recuperação.

A análise de ensaio ultrassônico em estruturas de concreto armado envolve a utilização de transdutores conforme Figura 45 para emitir pulsos ultrassônicos através do concreto. O procedimento inicia-se com a limpeza da superfície do concreto para garantir uma boa acoplagem dos transdutores, aos quais é aplicado um gel acoplante para melhorar a transmissão das ondas ultrassônicas, onde os transdutores são posicionados em pontos opostos da área a ser testada, e pulsos ultrassônicos são emitidos e recebidos. O tempo de trânsito das ondas, que depende da densidade e elasticidade do concreto, é medido, e a velocidade de propagação das ondas é calculada a partir desses dados, permitindo a identificação de fissuras, vazios, delaminações e outras descontinuidades internas. Os resultados são analisados para avaliar a integridade e uniformidade do concreto, fornecendo informações críticas sobre a condição estrutural da edificação (De Rezende, 2019).

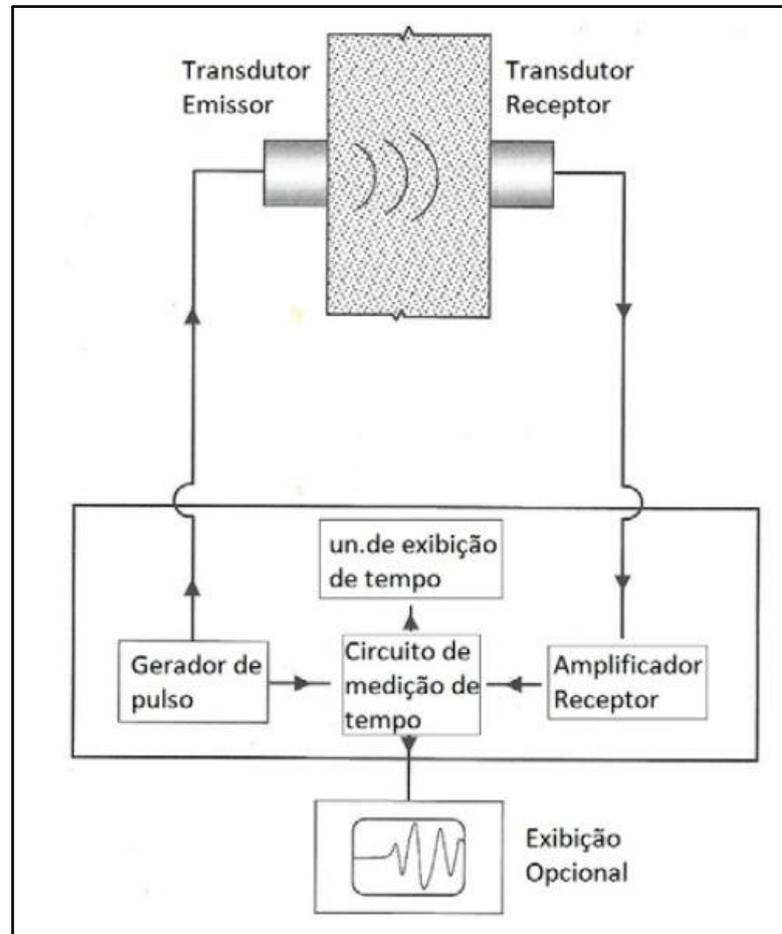
Figura 45 - Realização de ensaio de ultrassonografia em Pilar de Concreto Armado



Autor: Tosetto (2017).

Valores de potencial mais negativos indicam uma maior probabilidade de corrosão ativa. Após a coleta dos dados, elabora-se um mapa de contorno dos potenciais de corrosão, permitindo a visualização das áreas mais propensas à corrosão. Essa análise inicial é fundamental para identificar zonas críticas e fornece uma base sólida para decisões relativas a intervenções de manutenção ou reparo, contribuindo significativamente para a extensão da vida útil da estrutura de concreto armado (Nobre *et al.*, 2020).

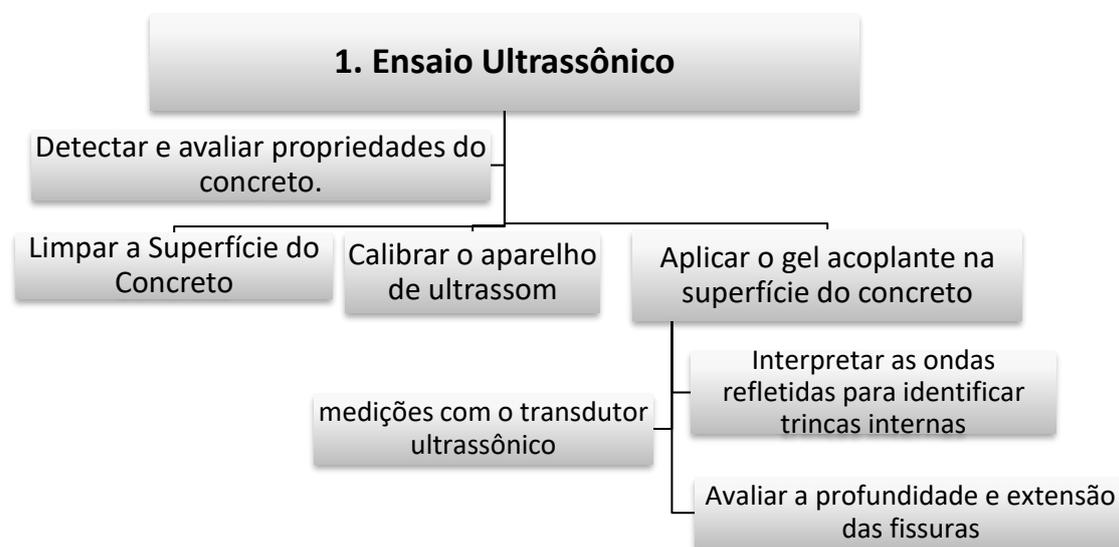
Figura 46 - Representação de um circuito de um pulso ultrassônico



Fonte: Ramos, 2019 apud Naik, Malhotra e Popovics 2004.

Segundo Pedroza (2018), as edificações têm uma vida útil que, com o passar do tempo, pode ser reduzida devido ao desgaste natural, sobrecargas e agressões ambientais. Para prolongar essa vida útil, ou realizar ampliações e sobrecargas é essencial realizar análises e manutenções preventivas e corretivas. Os ensaios não destrutivos são fundamentais para avaliar o estado das estruturas, pois permitem um diagnóstico preciso sem causar danos. Entre os principais métodos de ensaios não destrutivos, destacam-se a pacometria, potencial de corrosão, esclerometria, ultrassonografia e carbonatação. A Figura 47 apresenta um organograma do procedimento para avaliação de estruturas de concreto armado através do ensaio de untrassonografia.

Figura 47 - Organograma do procedimento de avaliação de estruturas de concreto armado



Fonte: Autor (2024).

O organograma proporciona uma estrutura organizada para a tomada de decisões referentes a reparos e intervenções, com base em uma análise sistemática e abrangente. Além disso, assegura que o processo de avaliação esteja alinhado com as normas técnicas e regulamentações vigentes, promovendo práticas de engenharia seguras e responsáveis.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foram analisados diversos métodos de ensaios destrutivos e não destrutivos para a caracterização de estruturas de concreto. A investigação demonstrou a importância de cada técnica para a avaliação da integridade e desempenho das estruturas de concreto armado, fornecendo subsídios fundamentais para decisões de manutenção e reparo.

Os ensaios destrutivos, apesar de comprometerem parcialmente a estrutura, oferecem dados precisos e detalhados sobre a resistência e outras propriedades mecânicas do concreto. Em contrapartida, os ensaios não destrutivos se destacam pela capacidade de avaliar a estrutura sem causar danos, sendo essenciais para o monitoramento contínuo e preventivo.

Dentre os ensaios não destrutivos, destacam-se a esclerometria, a ultrassonografia, a pacometria e o ensaio de potencial de corrosão. Cada um desses métodos tem suas particularidades e vantagens, permitindo uma análise complementar e abrangente das condições da estrutura. A esclerometria, por exemplo, é útil para uma avaliação rápida e preliminar da dureza superficial do concreto, enquanto a ultrassonografia permite detectar fissuras internas e outras descontinuidades que não são visíveis externamente.

O estudo também reforça a importância da normatização e padronização dos procedimentos de ensaio, conforme observado nas diretrizes da ABNT e outras entidades normativas. A aplicação rigorosa dessas normas assegura a precisão e a reprodutibilidade dos resultados, além de garantir a segurança das estruturas e dos usuários.

Concluimos que a combinação de diferentes métodos de ensaio, integrando tanto técnicas destrutivas quanto não destrutivas, proporciona uma visão mais completa e confiável das condições das estruturas de concreto. Essa abordagem multidisciplinar é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manutenção eficazes e para a longevidade das construções.

#### 3.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, recomenda-se que futuros estudos aprofundem a investigação sobre a correlação entre os resultados dos diferentes métodos de ensaio, visando otimizar as práticas de avaliação e ampliar o conhecimento técnico-científico na área de estruturas de concreto armado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2014. Disponível em: <http://aghababaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf> . Acesso em: 01 jun. 2024.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.2R-21. **Report on Nondestructive Test Methods for Evaluating Concrete in Structures**. Farmington Hills, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C876-20: **Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4541. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers**. West Conshohocken, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C803/C803M. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. West Conshohocken, 2020.

ANAM, M. **Mechanical Properties of Reinforced Concrete**. Journal of Structural Engineering, University of Asia Pacific, 2023. Acesso em: 18 mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7680-1:2015. **Aço para estruturas de concreto - Parte 1: Requisitos para aços de baixo e médio teor de carbono**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7680-2:2015. **Aço para estruturas de concreto - Parte 2: Requisitos para aços de alta resistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738:2015. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739:2018: **Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222:2011: **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204:2012: Concreto endurecido - Determinação da profundidade de carbonatação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7584: **Ensaio de esclerometria em estruturas de concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522:2021. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2021.

BROWN, P.; LEE, C. **Transverse Elasticity in Reinforced Concrete Structures.** *Journal of Civil Engineering Research*, v. 29, n. 4, p. 431-446, 2023.

BRITISH STANDARD. BS 1881 Part 204:1988. **Methods for Determination of Compressive Strength of Concrete.** London, 1988.

BREYSSE, Denis. **Nondestructive evaluation of concrete strength:** An historical review and a new perspective by combining NDT methods, *Construction and Building Materials*, Volume 33, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>. Acesso em: 30 abr. 2024.

CANDIAN, André Luiz. **Metodologia para avaliação de estruturas de concreto armado**

**degradadas utilizando ensaios dinâmicos.** 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/17678/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2024.

CHIES, Josué Argenta. **Ensaio não destrutivo em concreto:** detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom. 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127927/000973959.pdf?sequence=1&is>. Acesso em: 26 abr. 2024.

DE REZENDE, Elaine Cristina *et al.* **Manifestações patológicas usuais em edifícios construídos em concreto armado: um estudo de caso.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/50709/1/Monografia%20Especializacao%20Elaine%20Resende.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

DIÓGENES, H. J. F. *et al.* **Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 4, p. 803-813, 2011. Acesso em: 19 jun. 2024.

DO CARMO PAIVA, Mariana Acioli. **Análise das propriedades mecânicas nas primeiras idades do concreto de lajes alveolares utilizando o ensaio de ultrassom.** 2017. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-08122017-102900/publico/2017ME\\_MarianaAciolidoCarmoPaiva.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-08122017-102900/publico/2017ME_MarianaAciolidoCarmoPaiva.pdf). Acessado em: 18 de jun. 2024.

**CEN. EN 14630:2006: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.** Bruxelas: CEN, 2006.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Acesso em: 15 jun. 2024.

FERARRI, V.J. **Inspeção para avaliação do estado de uma edificação de concreto armado: estudo de caso.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Universidade Estadual de Maringá, v. 15, n. 1, 2023.

FLORES, Junior Marconatto. **Estudo do comportamento à tração de corpos de prova de concreto armado**. 2018.

HELENE, Paulo. **Avaliação da Resistência do Concreto In Situ: Uso de Ensaio Não Destrutivos**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 2, n. 1, p. 35-46, 2009.

ISO. **ISO 1920-7:2004: Testing of concrete - Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete**. Geneva: International Organization for Standardization, 2004. **1920-7:2004**. Testing of concrete - Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

JOFFILY, Irene de Azevedo Lima. **Avaliação do ensaio de penetração de pino para mensuração indireta da resistência à compressão do concreto**. 2011. Acesso em: 21 jun. 2024.

KIM, H. **Influence of Elastic Modulus on Concrete Performance**. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 16, n. 1, p. 89-101, 2022. Acesso em: 19 mai. 2024.

LETA, Fabiana Rodrigues *et al.* **Medição de identificações de dureza com algoritmos de visão computacional e técnicas de decisão com incertezas**. *Engevista*, 2004. Acessado em: 27 de jun. 2024.

MARTINS, João VR *et al.* **Estudo da aderência entre concreto e aço pelo ensaio APULOT utilizando concreto de alta resistência**. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo/SP: IBRACON, 2014. Acesso em: 20 jun. 2024.

MENDONÇA, Luís Viegas. **Termografia Por Infravermelhos: inspeção de betão**. *Revista Engenharia & Vida*, Lisboa, v. 1, n. 16, p. 53-57, 2005. Acesso em: 15 jun 2024.

MAGALHÃES, Luana Pereira; FIGUEIREDO, Vitor Canabrava Rodrigues; DA CUNHA OLIVEIRA, Jorge Antônio. **Aplicação de ensaios destrutivos e não destrutivos para elaboração de diagnósticos em estrutura de concreto armado em edificações residenciais localizados na Asa Norte-DF**. Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de

Pesquisa, v. 4, n. 1, 2018. Acesso em: 18 jun. 2024.

MEHTA, P. K., & Monteiro, P. (2006). **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4th ed. McGraw-Hill Education. Disponível em: <https://worksaccounts.com/wp-content/uploads/2020/08/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials.pdf>. Acessado em: 01 jun. 2024.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2nd ed. Prentice Hall, 2003. Acesso em: 10 jun. 2024.

NETTO, Leonides Guireli *et al.* **Avaliação do Radar GPR para Prospecção de Armadura em Elementos de Concreto Armado**. Ensayos para evaluación de estructuras: Rehabilitación, refuerzo, durabilidad y manifestaciones patológicas en la construcción, p. 52, 2020. Acesso em: 29 jun. 2024.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. Pearson Education Limited, 2016. Acesso em: 12 jun. 2024.

NOBRE, Guilherme Gomes *et al.* **Análise da eficiência do potencial de corrosão produzido a partir da ASTM C 876, 2020**. Acesso em: 07 jul. 2024.

NORONHA, J. G. **Estudo multicaso de manifestações patológicas em reservatórios de concreto armado na cidade de Tabuleiro do Norte-CE**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar, Pau dos Ferros, 2018. Acesso em: 14 jul. 2024

PIRES, Mariana Silva. Patologia em concreto armado: principais manifestações, causas e soluções para garantir a durabilidade das estruturas. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 12, p. 28394-28402, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/2075/1910>. Acesso em: 26 abr. 2024.

PEREIRA, Valdir Moraes. **Permeabilidade ao ar do concreto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011. Acesso em: 29 jun. 2024.

PEREIRA, E.; DE MEDEIROS, M. H. F. Ensaio de " Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 757-780, 2012.

PEDROZA, Luis Felipe Minieri. **Avaliação do desempenho do ensaio não destrutivo de pacometria para verificação do cobrimento e posicionamento de barras de aço**. 2018. Acesso em: 20 jun. 2024.

RAMOS, David Henrique. **Avaliação de ensaios não destrutivos aplicados ao concreto armado**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AKG76/1/sobre\\_a\\_recupera\\_o\\_e\\_refor\\_o\\_das\\_estruturas\\_do\\_concreto\\_armado.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AKG76/1/sobre_a_recupera_o_e_refor_o_das_estruturas_do_concreto_armado.pdf). Acesso em: 05 mai. 2024.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Acesso em: 22 jun. 2024.

SMITH, J.; JONES, R.; WILSON, T. **Poisson's Ratio and Shear Modulus in Reinforced Concrete**. *American Concrete Institute Journal*, v. 118, n. 3, p. 257-269, 2021. Acesso em: 19 mai. 2024.

SILVA, Yvis Jefferson da. **Análise da corrosão dos pilares da ponte Juscelino Kubitschek, em Aracati, Ceará. 2021**. Acesso em: 29 jun. 2024.

TOSETTO, Renan Dittrich. **Análise de viabilidade de ampliação de uma edificação comercial utilizando ensaios destrutivos e não destrutivos: estudo de caso**, 2017. Acesso em: 06 de jul.