

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**TAIANE ZULIAN DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UMA LAJE EXISTENTE SEM  
ACESSO AO PROJETO ESTRUTURAL: ESTUDO DE CASO**

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**TAIANE ZULIAN DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UMA LAJE EXISTENTE SEM  
ACESSO AO PROJETO ESTRUTURAL: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul apresentado à Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof<sup>a</sup>.: Dra. Henriette Justina Manfredini Baroni

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**TAIANE ZULIAN DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UMA LAJE EXISTENTE SEM  
ACESSO AO PROJETO ESTRUTURAL: ESTUDO DE CASO**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul.

**Aprovada em**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dra. Henriette Justina Manfredini Baroni  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dra. Ângela Gaio Graeff  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

---

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

*Dedico este trabalho à minha mãe, Neura Zulian  
(in memoriam), que lá do céu está acompanhando  
esta linda conquista.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus, por fazer deste sonho uma realidade e não me deixar fraquejar ou desistir diante dos obstáculos encontrados no caminho.

Agradeço com muito amor e saudade, à minha mãe Neura Zulian (in memoriam), por ter dedicado sua vida à criação de suas filhas e nunca ter desistido de nos encorajar a estudar e batalhar por uma vida melhor. Com certeza a sua educação e criação fez toda a diferença para a formação da pessoa e da profissional que sou hoje.

Agradeço à minha orientadora Henriette Justina Manfredini Baroni, que desde o início, não mediu esforços para concretizar este trabalho, mesmo diante de algumas dificuldades encontradas inicialmente. Sua experiência e sabedoria foram essenciais para o resultado deste trabalho, sempre buscando alternativas que pudessem melhorar e aperfeiçoar o resultado final.

Agradeço ao meu namorado Jonatan Cegoni, por todo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho, e também ao longo de toda a trajetória cursada para a graduação.

Agradeço à minha tia Maria de Fátima Zulian Carraro, e sua família, em especial minha prima Raíssa Zulian Carraro, por confiarem e acreditarem em mim, sempre me apoiando e fornecendo todo o suporte necessário nesta trajetória.

Agradeço à minha irmã, Thaís Zulian, por, mesmo distantes, demonstrar apoio e incentivo nesta fase acadêmica.

Agradeço à UCS pela disponibilidade da edificação como objeto de estudo de caso, sem o qual este trabalho não seria possível.

Agradeço ao apoio dado pela empresa Concretech, representada por Josué Chies, que sem hesitar aceitou participar deste trabalho com os equipamentos e a equipe técnica para operação, sem os quais não seria possível concretizar este trabalho.

Agradeço à professora Maria Fernanda de Oliveira, pela presteza e cooperação, ao disponibilizar informações referentes ao objeto de estudo.

## RESUMO

O presente estudo tem por objetivo a análise estrutural de lajes existentes onde as informações a respeito da estrutura não são conhecidas, e se faz necessário determinar a capacidade de carga do elemento estrutural. Nestes casos, a forma mais eficiente para conhecer as características da construção é através da realização de ensaios in loco, ensaios em laboratório e cálculos analíticos. Em conjunto, essas ferramentas de análise são capazes de fornecer informações precisas a respeito da real capacidade portante dos elementos. Desta forma, neste trabalho é feita a análise e a determinação da capacidade de carga de uma laje cuja edificação é existente, através da realização de ensaios de pacometria e escarificação superficial, que fornecem informações da armadura existente, e ensaios de esclerometria e extração de testemunhos, responsáveis por fornecer dados sobre o concreto da estrutura. Com os resultados dos ensaios, foi determinada a capacidade resistente à flexão, onde os dados de entrada são a área de aço e a resistência do concreto, obtendo-se como dados de saída a carga resistente da estrutura. Como resultado, foi obtido o valor de 6,35 KN/m<sup>2</sup> para a capacidade de carga da laje analisada. Deste valor, 3 KN/m<sup>2</sup> são destinados à carga de peso próprio da estrutura, restando 3,35 KN/m<sup>2</sup> para utilização como carga permanente (revestimento) mais carga variável. Como contribuição do trabalho, foi elaborado um protocolo com o roteiro de ensaios a realizar para este tipo de situação-problema. Concluiu-se que o roteiro de ensaios realizado se demonstrou eficaz para resolução deste trabalho, sem ocasionar grandes danos à estrutura.

**Palavras-chave:** Ensaios não destrutivos. Ensaios destrutivos. Análise estrutural. Capacidade de carga. Estrutura existente.

## ABSTRACT

The present study aims at the structural analysis of existing slabs where the information about the structure is not known, and it is necessary to determine the load capacity of the structural element. In these cases, a more efficient way to know the characteristics of the construction is through the performance of on-site tests, laboratory tests and analytical calculations. Together, these analysis tools are able to provide accurate information about the real capacity of the elements. Thus, this work carries out an analysis to the determination of the load capacity of an existing building, by carrying out pacometry tests and superficial scarification, which are responsible to detect the existing reinforcement, and sclerometry tests and testimony extraction, responsible for providing data on the concrete of the structure. With the results of the tests, the flexural strength capacity was determined, where the input data are the steel area and the strength of the concrete, obtaining the resistant load of the structure as the output data. As a result, the load capacity for the analyzed slab was 6.35 KN/m<sup>2</sup>. Of this value, 3 KN/m<sup>2</sup> are destined to the load of the structure's own weight, with 3.35 KN/m<sup>2</sup> remaining for use as permanent load (coating) plus variable load. As a contribution of the work, a protocol was elaborated with the script of tests to be carried out for this type of problem situation. It was concluded that the script of tests performed proved to be effective for solving this work, without causing major damage to the structure.

**Keywords:** Non-destructive tests. Destructive tests. Structural analysis. Load capacity. Existing structure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delineamento do trabalho .....	16
Figura 2 – Esquema de interação do vergalhão com o campo magnético do pacômetro .....	22
Figura 3 – Escarificação manual .....	25
Figura 4 – Escarificação mecânica .....	25
Figura 5 – Partes constituintes de um esclerômetro .....	28
Figura 6 – Etapas de funcionamento do esclerômetro.....	28
Figura 7 – Área de ensaios e pontos de impacto .....	32
Figura 8 – Quantidade de testemunhos a extrair .....	36
Figura 9 – Valores de k1 .....	38
Figura 10 – Valores de k2 em função do efeito do broqueamento.....	38
Figura 11 – Tolerância para a idade de ensaio .....	40
Figura 12 – Fator de correção h/d.....	40
Figura 13 – Localização do objeto de estudo de caso .....	46
Figura 14 – Projeto em 3D das edificações .....	47
Figura 15 – Foto in loco das edificações, de junho de 2020 .....	47
Figura 16 – Planta baixa térreo.....	48
Figura 17 – Planta baixa 2º pavimento.....	49
Figura 18 – Planta baixa cobertura.....	50
Figura 19 – Localização da área de realização do ensaio de pacometria .....	52
Figura 20 – Pacômetro Hilti utilizado no ensaio acusando a espessura do revestimento.....	52
Figura 21 – Demarcação e interligação dos pontos de detecção da armadura .....	53
Figura 22 – Continuidade entre malha desenhada e a armadura existente.....	54
Figura 23 – Realização da escarificação com o auxílio de um rompedor 6 kg.....	54
Figura 24 – Realização do reparo da estrutura .....	55

Figura 25 – Esclerômetro Proceq a ser utilizado no ensaio.....	56
Figura 26 – Localização dos pontos de ensaio de esclerometria na face inferior da laje.....	56
Figura 27 – Localização dos pontos de ensaio de esclerometria na face superior da laje.....	57
Figura 28 – Realização do polimento da área com a pedra de carborundum.....	57
Figura 29 – Realização do ensaio de esclerometria na área 2 da face inferior da laje.....	58
Figura 30 – Equipamento posicionado para realizar a extração.....	59
Figura 31 – Extração realizada, testemunho já extraído.....	59
Figura 32 – Localização dos locais de extração.....	60
Figura 33 – Testemunhos antes do capeamento.....	61
Figura 34 – Testemunhos após o capeamento.....	61
Figura 35 – Medida da bitola com o auxílio do paquímetro.....	63
Figura 36 – Gráfico dos índices esclerométricos da calibração do esclerômetro.....	64
Figura 37 – Gráfico dos índices esclerométricos da face inferior da laje.....	66
Figura 38 – Ábaco para correlação do índice esclerométrico com a resistência a compressão do concreto.....	67
Figura 39 – Gráfico dos índices esclerométricos da face superior da laje.....	68
Figura 40 - Fluxograma de roteiro de ensaios a realizar para determinar a capacidade de carga de uma laje.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Calibração do esclerômetro .....	64
Tabela 2 – Resultados da esclerometria realizada na face inferior da laje .....	65
Tabela 3 – Resultados da esclerometria realizada na face superior da laje .....	67
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de extração e rompimento de testemunhos .....	70
Tabela 5 – Parâmetros de cálculo obtidos dos ensaios e inspeções in loco.....	72
Tabela 6 – Resultados dos cálculos para obtenção da capacidade de carga da laje .....	72
Tabela 7 – Possíveis usos conforme a capacidade de carga variável da laje.....	73
Tabela 8 – Necessidade de revestimento no piso conforme o uso dos ambientes.....	73
Tabela 9 – Valores de $k$ e $\phi$ para cálculo do momento fletor em lajes retangulares armadas em cruz .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
END	Ensaio Não Destrutivo
IE	Índice Esclerométrico
<i>In situ</i>	No lugar / local
LABTEC	Laboratório de Tecnologia Construtiva
NBR	Norma Brasileira
UCS	Universidade de Caxias do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	13
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>14</b>
1.3	DELIMITAÇÕES .....	14
1.4	LIMITAÇÕES .....	14
1.5	DELINEAMENTO DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1	MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS ACABADAS	17
<b>2.1.1</b>	<b>Métodos de ensaios não destrutivos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Métodos de ensaios semidestrutivos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Métodos de ensaios destrutivos.....</b>	<b>20</b>
2.2	INVESTIGAÇÃO DA ARMADURA .....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Pacometria.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Escarificação superficial .....</b>	<b>24</b>
2.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Esclerometria .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Extração e rompimento de testemunhos.....</b>	<b>33</b>
2.4	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	40
<b>2.4.1</b>	<b>Lajes: definição e classificação .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Cálculo das solicitações .....</b>	<b>42</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Dimensionamento das armaduras.....</b>	<b>43</b>

<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>45</b>
3.1	ESTUDO DE CASO.....	45
3.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	51
3.2.1	Ensaio de pacometria e escarificação superficial.....	51
3.2.2	Ensaio de esclerometria.....	55
3.2.3	Ensaio de extração de testemunhos.....	58
3.2.4	Ensaio de compressão de axial.....	60
3.3	DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>63</b>
4.1	ENSAIO DE PACOMETRIA E ESCARIFICAÇÃO SUPERFICIAL.....	63
4.2	ENSAIO DE ESCLEROMETRIA .....	64
4.3	EXTRAÇÃO E ROMPIMENTO DE TESTEMUNHOS.....	69
4.4	CAPACIDADE DE CARGA DA LAJE .....	72
4.5	ROTEIRO DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DA LAJE .....	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO A – TABELA 9 .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas da água. Uma razão que explique tamanha utilização é a alta durabilidade deste material, que em conjunto com o aço, proporciona estruturas altamente resistentes e duráveis, se projetadas, executadas e utilizadas corretamente. Um projeto e uma execução de boa qualidade garantem grande parte da vida útil da estrutura, porém, é imprescindível que o seu uso seja de acordo com o que foi planejado em projeto, e que suas manutenções periódicas sejam realizadas para garantir uma maior durabilidade da estrutura.

Há diversas situações onde as construções são feitas sem um projeto estrutural, ou situações onde foi realizado um projeto, porém por descuido ou desconhecimento da importância deste, o proprietário do imóvel perde estas informações. Neste caso, todo o histórico estrutural da edificação deixa de existir, impossibilitando o acesso a estas informações caso haja a necessidade de uma análise estrutural. Tais análises são muito recorrentes em situações de locação de imóveis, onde o uso da edificação é constantemente variado conforme a necessidade do locatário. No caso de indústrias, por exemplo, frequentemente há a necessidade de ocupar a edificação com máquinas e equipamentos de peso considerável, que, se não previsto em projeto, muito provavelmente a estrutura não comportará esta carga.

Diante ao exposto, este trabalho visa propor procedimentos de análise estrutural nestas situações onde não é conhecida a capacidade de carga da estrutura, utilizando para isso métodos de ensaios destrutivos, não destrutivos e semidestrutivos, em conjunto com cálculos de dimensionamento, com o objetivo de determinar a capacidade de carga de uma estrutura existente. A seguir são apresentados os itens que delimitam as diretrizes de trabalho, esclarecendo a proposta e os objetivos a serem concluídos ao término desta monografia.

### 1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Sem o projeto estrutural, como determinar a capacidade de carga de uma estrutura existente?

### 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são classificados como objetivo geral e objetivos específicos.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Realizar um estudo de caso de uma laje existente sem acesso ao projeto estrutural, onde através de ensaios e cálculos analíticos será determinada a capacidade de carga do elemento estrutural.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) realizar investigação da armadura através do ensaio de pacometria em conjunto com a prospecção visual através da escarificação superficial do cobrimento, com o intuito de determinar as armaduras existentes a serem utilizadas no cálculo analítico;
- b) realizar ensaios de esclerometria na estrutura a fim de obter os resultados pertinentes a dureza superficial do concreto, possibilitando a avaliação da homogeneidade do concreto e também da resistência à compressão obtida por correlação;
- c) realizar ensaios de extração de testemunhos na estrutura de concreto, em quantidade e definições conforme a ABNT NBR 7680-1 (2015), a fim de obter, através do ensaio de compressão axial, os resultados de resistência à compressão das amostras;
- d) realizar, através das informações obtidas nos ensaios, o cálculo analítico para obter a capacidade de carga da laje;
- e) elaborar um roteiro de ensaios a ser seguido para determinar a capacidade de carga de lajes existentes.

### **1.3 DELIMITAÇÕES**

O objeto escolhido para realizar o estudo de caso se trata de uma edificação localizada no Campus 8 – Área do Conhecimento de Artes e Arquitetura da Universidade de Caxias do Sul, que conta com dois pavimentos e foi construída para fins de estudos acadêmicos, sendo realizada a análise somente da laje de entrepiso.

### **1.4 LIMITAÇÕES**

O presente trabalho se limita à quantidade de testemunhos a serem extraídos da edificação, onde a instituição fornecedora do objeto de estudo limitou a duas amostras extraídas, e também ao acesso de equipamentos para realização dos ensaios, considerando a necessidade da utilização de equipamentos aferidos e de qualidade, a fim de obter resultados precisos e confiáveis.

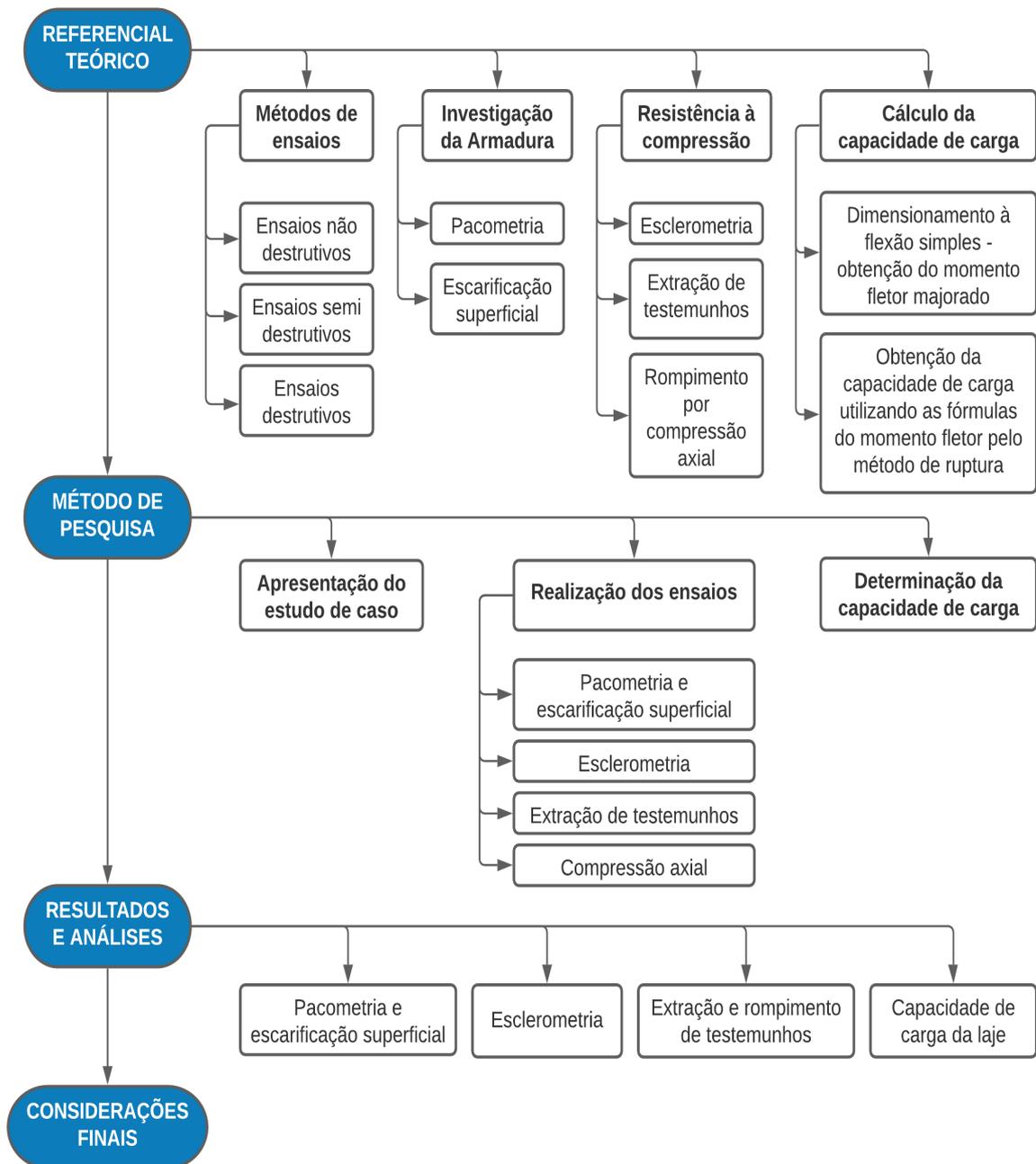
## 1.5 DELINEAMENTO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas, denominadas Trabalho de Conclusão de Curso I e Trabalho de Conclusão de Curso II, respectivamente. A primeira etapa contempla as seções 1, 2 e 3, e as seções 4 e 5 foram apresentadas na segunda etapa do trabalho. As seções são descritas a seguir:

- a) seção 1 – plano de trabalho e introdução: são abordados os assuntos referentes ao tema escolhido, questões de pesquisa, objetivos, delimitações e limitações, e delineamento do trabalho;
- b) seção 2 – referencial teórico: nesta etapa são apresentadas as pesquisas bibliográficas utilizadas para descrever argumentações e citações referente ao tema escolhido, através de materiais didáticos de fontes confiáveis, como artigos, teses, dissertações, livros e normas;
- c) seção 3 – método de pesquisa: é apresentado o estudo de caso, onde são abordadas as atividades realizadas, e suas respectivas metodologias aplicadas para obter os resultados do trabalho;
- d) seção 4 – resultados: são apresentados os resultados e análises dos ensaios e cálculos propostos;
- e) seção 5 – considerações finais: é realizada a conclusão do trabalho, elaborada a partir dos resultados obtidos.

Na Figura 1 está apresentado um diagrama com o delineamento do trabalho.

Figura 1 – Delineamento do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Uma estrutura de concreto armado, durante a sua vida útil, deve cumprir com os requisitos mínimos de segurança, funcionalidade e aspecto estético que lhe sejam exigidos em função da atuação de ações e influências ambientais sobre esta (ANDRADE, 1992).

Conforme observado por Silva Filho e Helene (2011), com frequência surgem situações onde as propriedades da resistência mecânica e da capacidade de carga de um elemento estrutural são duvidosas. Nesses casos, é necessário revisar os ensaios já realizados na estrutura, e se for preciso, realizar procedimentos adicionais para investigar qual a resistência efetiva da estrutura.

Para sanar estas dúvidas e realizar um diagnóstico estrutural dos elementos analisados, é necessário recorrer a ensaios experimentais sobre a estrutura em causa ou sobre seus materiais, de modo a permitir quantificar por estimativas médias as suas características físicas e mecânicas mais relevantes, a fim de aferir o seu comportamento estrutural. Esta aferição requer uma adequada inspeção prévia do local, e de preferência, complementada com ensaios *in situ* e de laboratório, sustentando um correto diagnóstico do real estado da estrutura (ARÊDE; COSTA, 2002).

### 2.1 MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS ACABADAS

A utilização de métodos de ensaio para avaliar a segurança estrutural de um elemento de concreto armado proporciona aos engenheiros informações valiosas para análise da integridade estrutural de uma edificação existente (SAHUINCO, 2011). Evangelista (2002, p.4) concorda com Sahuinco (2011) ao citar que “os ensaios em estruturas já existentes visam avaliar a sua integridade e capacidade de resistir às solicitações”. Para Palacios (2012), esses métodos podem ser necessários em situações onde o concreto apresenta resistência inferior à descrita em projeto, possíveis mudanças de uso da edificação, análise para remoção de escoramento, avaliação das condições de concreto protendido, aplicações de carregamento realizadas em idade precoce, entre outras situações. Ainda segundo Palacios (2012), os métodos de avaliação são utilizados para determinar as propriedades do concreto endurecido, possibilitando uma análise técnica das condições dos elementos estruturais.

Segundo Castro (2009), a avaliação de estruturas antigas tem como premissa a falta ou a inexistência de informações importantes, como os resultados de resistência à compressão do concreto, muitas vezes por falta de controle na execução ou pela perda dos registros. Essa

demanda de informações acarreta na necessidade da realização de ensaios para comprovar a condição dos elementos estruturais, como afirma Vieira Filho (2007, p. 28), ao explicar que “as técnicas de avaliação da resistência à compressão em estruturas acabadas são normalmente constituídas por um programa de ensaios, *in situ* e em laboratório, e geralmente abrange uma combinação de ensaios destrutivos e não destrutivos”.

Rincón et al. (1997) afirma que para avaliar estruturas acabadas, é necessário adquirir uma série de informações onde nem sempre são de fácil aquisição. Essas informações são necessárias para diversos tipos de ensaios, destrutivos e não destrutivos, podendo citar: métodos de ensaio de arrancamento e quebra, penetração de pinos, dureza superficial, extração de testemunhos para ruptura à compressão, medidas de velocidade de propagação de pulso ultrassônico, maturidade e demais métodos combinados.

Santos (2003) em comparação com Rincón et al. (1997), considera mais uma modalidade de classificação para os ensaios, ao citar que as técnicas de ensaio existentes são geralmente classificadas em destrutivas, ligeiramente destrutivas ou não destrutivas. Os autores Arêde e Costa (2002), Sahuinco (2011) e Candian (2017) também utilizam da mesma classificação, abordando os ensaios ligeiramente destrutivos como semidestrutivos. Além desta classificação, os ensaios podem ser classificados como ensaios *in situ* ou ensaios em laboratório. De acordo com Veiga et al. (2004), ensaios *in situ* são, geralmente, de caráter reduzidamente ou totalmente não destrutivo, e permitem uma classificação qualitativa ou quantitativa indireta (obtida por estimativas ou correlações) das características do concreto. Já os ensaios de laboratório, sempre serão de caráter destrutivo, porém disponibilizam resultados quantitativos diretos, obtidos direto da estrutura.

### **2.1.1 Métodos de ensaios não destrutivos**

A aplicação de ensaios não destrutivos (END) é uma estratégia muito interessante para monitorar o estado de estruturas de concreto armado. Este modelo de ensaio se torna estratégico e prático do ponto de vista econômico, visto que não provoca danos à estrutura que necessitem de um reparo posterior. Muitas vezes reparos mal feitos irão ocasionar zonas mais vulneráveis à deterioração, acarretando à uma redução da vida útil da estrutura (LORENZI et al., 2016).

Os objetivos dos END podem ser explanados em duas situações: estimar um valor para a resistência do concreto em um determinado local da estrutura, para posteriormente utilizar este valor em uma análise da capacidade estrutural; ou investigar possíveis avarias internas em um elemento de concreto (PALACIOS, 2012). Para Silva Filho et al. (2011), o objetivo

principal da aplicação de END na construção civil está associado à localização e avaliação de falhas e defeitos em estruturas de concreto endurecido.

Machado (2005) classifica os END em duas categorias:

- a) ensaios relacionados à alguma propriedade do concreto, de onde é possível estimar a resistência, durabilidade e propriedades elásticas do material;
- b) ensaios que objetivam determinar posições, diâmetros e condições das armaduras, áreas más adensadas, vazios, fissuras e teor de umidade do concreto.

Ainda, prossegue o autor citando vantagens significativas deste método, como a velocidade de execução, o baixo custo, a ausência de danos à estrutura, a imediata disponibilidade dos resultados, e a possibilidade de realização de uma maior quantidade de ensaios, propiciando uma investigação mais homogênea. Neville (2016) complementa as vantagens de Machado (2005), ao atribuir aos END a vantagem da possibilidade de realizar mais do que um ensaio no mesmo local, ou em locais próximos, possibilitando o monitoramento da estrutura ao longo do tempo.

Referente à aplicabilidade dos END, são diversas as propriedades do concreto que podem ser avaliadas através deste método. Segundo Evangelista (2002), é possível citar as seguintes propriedades: massa específica, módulo de elasticidade, resistência à compressão, dureza superficial, absorção e permeabilidade, condições de umidade, localização e identificação das armaduras, espessura do cobrimento, fissuração e existência de vazios.

Essa modalidade de ensaios pode ser utilizada em estruturas antigas, com o intuito de avaliar a capacidade e resistência da estrutura aos esforços solicitantes, e para estruturas novas, visando monitorar a evolução da resistência ou o esclarecimento de dúvidas referente à resistência e homogeneidade do concreto. Assim, conclui Castro (2009) que os ensaios não destrutivos podem ser aplicados em estruturas de qualquer idade.

Candian (2017) cita os END mais difundidos no meio técnico: avaliação da dureza superficial com o esclerômetro de Schmidt, a medida da velocidade de propagação de onda ultrassônica, a determinação das características das armaduras por meio do pacômetro, entre outros.

### **2.1.2 Métodos de ensaios semidestrutivos**

De acordo com Palacios (2012), os ensaios semidestrutivos podem ser classificados como ensaios que danificam ligeiramente a superfície da estrutura, necessitando de pequenos e

rápidos reparos. Segundo a autora, podem ser citados como ensaios semidestrutivos a penetração de pino e o teste de arrancamento. Para autores que não consideram esta classificação de método, os ensaios citados são considerados de mesma intensidade dos ensaios não destrutivos. Assim se posiciona Machado (2005, p. 5), ao agrupar os dois métodos na mesma definição: “ensaios não destrutivos e semidestrutivos são aqueles que podem ser usados para avaliar o elemento estrutural *in situ*, e se houver danos ao elemento durante a execução dos ensaios, estes danos não deverão prejudicar a sua aparência e nem o seu desempenho”. Santos, Cruz e Rosário (2019) complementam a lista dos ensaios citados por Palacios (2012) e incluem a escarificação superficial na lista dos ensaios semidestrutivos.

Ainda, com o intuito de obter resultados de maior confiabilidade, é sugerido por Candian (2017) que se faça a combinação de métodos de ensaios semidestrutivos com métodos não destrutivos. Desta forma, será possível configurar uma melhor condição investigativa através de um número maior de amostras, e também através da possibilidade de correlacionar os valores obtidos pelos dois métodos.

De acordo com Arêde e Costa (2002), em comparação com os END, os ensaios semidestrutivos fornecem informações mais detalhadas sobre as características dos materiais, se tratando de ensaios específicos que introduzem pequenas perturbações na estrutura. Porém, sempre que possível essas intervenções devem ser tão pequenas quanto possível, e ao final do ensaio é importante que sejam mínimos os sinais de trabalho efetuados no local.

### **2.1.3 Métodos de ensaios destrutivos**

Ensaio destrutivos são, geralmente, ensaios laboratoriais realizados a partir de amostras dos componentes da construção extraídas diretamente da obra. Estes ensaios complementam as informações obtidas nos ensaios semi e não destrutivos, e permitem obter resultados quantitativos diretos (FERREIRA, 2010). Complementa Palacios (2012) que ensaios destrutivos são utilizados, normalmente, para estimar a resistência *in situ* da peça estrutural. Diferentemente dos ensaios não destrutivos, este método danifica a estrutura, exigindo reparos posteriores.

Ensaio destrutivos realizados em estruturas de concreto armado incidem principalmente na caracterização do concreto, referente as propriedades mecânicas e a durabilidade, e também, porém com menor frequência, na caracterização das propriedades mecânicas da armadura do elemento estrutural (CÓIAS, 2008). Dentre os ensaios destrutivos

existentes, a extração de testemunhos vem a ser o ensaio mais utilizado e conhecido atualmente (MACHADO, 2005).

Cóias (2008) classifica os ensaios laboratoriais realizados a partir de ensaios destrutivos em:

- a) testes de envelhecimento;
- b) análises mineralógicas e petrográficas;
- c) análises químicas;
- d) medições da estrutura porosa;
- e) medições das propriedades mecânicas;
- f) ensaios de absorção de água.

Considerando as classificações acima citadas, neste trabalho é abordado sobre as medições das propriedades mecânicas das estruturas, através da utilização de ensaios destrutivos de extração de testemunhos.

## 2.2 INVESTIGAÇÃO DA ARMADURA

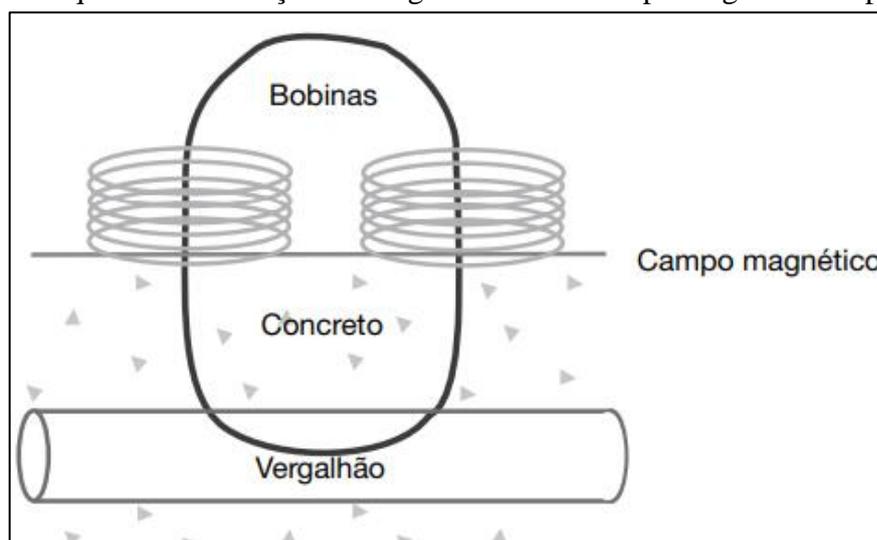
Para avaliar e inspecionar estruturas de concreto armado existentes, é necessário também avaliar as características da armadura, e ter conhecimento de sua localização, disposição e quantidade presente no elemento estrutural (PADRÃO, 2004).

De acordo com Castro (2009), os ensaios efetuados para localizar e avaliar as barras de armadura presentes no interior do concreto podem ser realizadas utilizando de equipamento eletromagnético, mais conhecido como pacômetro, ou através de investigação visual utilizando da escarificação manual da superfície.

### 2.2.1 Pacometria

O ensaio de pacometria tem como objetivo estimar a posição, a profundidade e o diâmetro das barras de aço contidos nos elementos estruturais de concreto armado. Para realizar o ensaio é utilizado o pacômetro, cujo princípio de funcionamento consiste em gerar um campo eletromagnético que, em contato com um objeto metálico, tem suas linhas de força distorcidas. Essa perturbação é detectada pelo aparelho, acusando a presença de metais no local (CANDIAN, 2017). Na Figura 2 é demonstrado o esquema de funcionamento do pacômetro.

Figura 2 – Esquema de interação do vergalhão com o campo magnético do pacômetro



Fonte: Proceq (2014).

O pacômetro é um aparelho portátil, energizado por pilhas e composto, geralmente, por um display para leitura, dois detectores de metais sendo um grande e outro pequeno, e dois espaçadores. O método de detecção das armaduras é auxiliado por um sistema de áudio, acionado quando há a detecção e variando com a distância das armaduras. O ensaio é influenciado pela presença de outros elementos metálicos na área de ensaio, e não realiza a leitura em zonas com grande densidade de armaduras (CÓIAS, 2008).

Padrão (2004) cita que as medições realizadas com o pacômetro não são afetadas pela presença de umidade no local do ensaio, possíveis variações de temperatura ou interferências de origem elétrica. O autor dá uma breve orientação das etapas do ensaio, informando que inicialmente deve-se determinar a orientação das armaduras, após isso deve-se posicionar o pacômetro sobre estas, em direção longitudinal, e em seguida realiza-se a medição da camada de cobertura, finalizando o ensaio ao estimar o diâmetro das barras de aço.

De acordo com a norma BS1881: Part 204 (1988), a pacometria pode ser utilizada para:

- a) controle de qualidade, garantindo a correta localização e determinação do cobrimento das armaduras existentes;
- b) investigação de elementos de concreto armado onde não há registros de sua execução;
- c) auxílio preliminar a outros métodos de ensaios, como ensaios ultrassônicos, extração de testemunhos, esclerometria, e demais ensaios realizados próximos à superfície do concreto;

- d) localização de objetos ferromagnéticos estranhos na estrutura, que não sejam barras de aço.

Nas conclusões feitas por Sanablia e Silva (2017), os autores abordam que o ensaio de pacometria é o método mais fácil e efetivo para localizar armaduras em estruturas de concreto, e que o método pode ser combinado com outros ensaios existentes, auxiliando em suas execuções, como ensaios de ultrassom, esclerometria, penetração de pinos, resistividade, entre outros. Facilita também para a realização da extração de testemunhos em estruturas acabadas, ou verificações de execução da obra, se tudo está correndo conforme projetado no cálculo estrutural.

De acordo com Padrão (2004), Santos (2008), Helene (2011) e Candian (2017), este ensaio ainda não é normalizado nacionalmente, sendo necessário então, recorrer à normas estrangeiras. Assim, podem ser consultadas as normas ACI 228 2R-13 e BS 1881 Part 204 em suas versões mais atuais para execução dos ensaios.

Analisando as duas normas citadas, este trabalho utilizou como referência a norma BS 1881 Part 204 (1988), pois em relação à norma ACI 228 2R-13, aborda melhores instruções e orientações sobre o ensaio. A seguir são destacadas informações importantes pertinentes ao ensaio de pacometria conforme a norma BS 1881 Part 204 (1998):

a) procedimentos preliminares:

- para dispositivos de leitura digital, devem ser seguidas as orientações do fabricante quanto à calibração do equipamento previamente ao uso;
- realizar a calibração distante dos elementos de concreto armado e componentes eletromagnéticos, de maneira que a perturbação do campo magnético do aparelho seja a menor possível;
- a calibração consiste em “zerar” a leitura do equipamento. Deve ser realizada a verificação da leitura zerada diversas vezes durante o ensaio;
- é altamente recomendável que seja realizada a verificação da calibração no local do ensaio, através do seguinte procedimento: realizar uma série de escarificações manuais nas localidades onde o equipamento acusou a presença de armaduras, onde será possível medir a espessura do cobrimento e conferir com o que foi informado pelo aparelho;

- o equipamento deve percorrer a superfície do concreto a ser analisado. Se houver armadura abaixo da superfície e dentro da faixa de trabalho do pacômetro, será indicado pelo display;
- b) descrição do ensaio:
- deve-se percorrer a sonda pelo concreto, e onde o reforço estiver localizado, rotacionar o equipamento até a posição de máxima perturbação eletromagnética, a ser indicada pelo aparelho;
  - em tal posição, é possível realizar a leitura do cobrimento da barra se o seu diâmetro for conhecido;
  - o eixo das barras ficará no plano que contém a linha central através dos polos da sonda;
  - onde não há uma concentração excessiva de armadura, é possível mapear todas as barras dentro da área de análise que fique suficientemente próxima à superfície;
  - para máxima precisão, a interferência de outras armaduras ou materiais eletromagnéticos deve ser evitada;

### **2.2.2 Escarificação superficial**

Quando não é conhecido o diâmetro das armaduras, pode-se realizar um procedimento de reduzido poder destrutivo, caracterizado como um ensaio semidestrutivo, que consiste em realizar uma escarificação superficial no concreto, removendo o cobrimento da armadura e deixando-a à mostra. Assim, é possível determinar a bitola da barra e também analisar seu aspecto de conservação (ANDRADE, 1992).

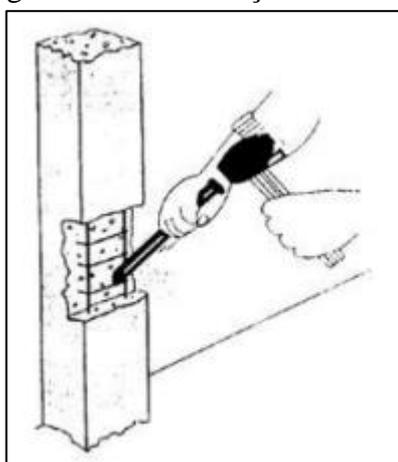
Este procedimento é conhecido também por apicoamento do concreto, ou por abertura de janelas de inspeção, sendo amplamente utilizado em serviços de recuperação estrutural, como pode ser observado nos trabalhos de Santos, Cruz e Rosário (2019), Lapa (2008), Saraiva (2015), Reis (2001), Batista et al. (2018), entre outros.

De acordo com Andrade (1992), a escarificação deve ser precedida por uma análise com pacômetro para obter a localização exata da armadura. Para executar o procedimento, pode ser utilizada uma broca com ponta de vídea e diâmetro de 8 a 10 mm, que seja própria apenas para concreto, garantindo assim que o aço não seja deteriorado. Após realizar a retirada do cobrimento, deve-se limpar o orifício com ar a pressão ou com um pequeno pincel, ficando possível medir a espessura do cobrimento com a utilização de um calibre com dispositivo para

medida de orifícios. Realizado o ensaio, a estrutura deve ser reparada para retomar seu acabamento original, preenchendo o local com argamassa ou resina epóxi, garantindo assim a proteção da armadura contra ação de agentes agressivos.

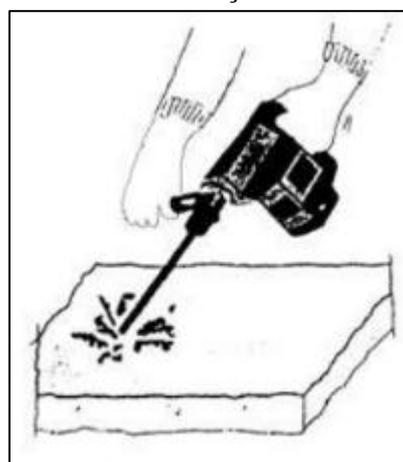
Saraiva (2015) complementa a explicação de Andrade (1992) informando que o processo de escarificação pode ser manual ou mecânico. Para escarificação manual podem ser usadas ponteiros, talhadeiras ou marretas leves. Para a escarificação mecânica o autor cita a utilização de rebarbador mecânico ou fresas para realizar o procedimento. Nas Figuras 3 e 4 é possível visualizar exemplos de escarificações manuais e mecânicas.

Figura 3 – Escarificação manual



Fonte: Mazer (2008).

Figura 4 – Escarificação mecânica



Fonte: Mazer (2008).

### 2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo esta a tensão máxima que o elemento pode suportar. Por vezes, a ruptura é identificada com o surgimento de fissuras. Para um ensaio de compressão, o corpo de prova é considerado rompido mesmo que não haja sinais visíveis de fissuras, pois as fissuras internas já comprometeram a resistência do elemento, impedindo que este suporte uma carga maior (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A resistência do concreto é classificada como a propriedade mais importante do material por diversos autores, dentre eles Neville (2016), Silva Filho et al. (2011), e Silva Filho e Helene (2011). De acordo com Neville (2016), a resistência fornece uma ideia geral da qualidade do concreto, considerando o fato de estar diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento

hidratada. Considera ainda que, a resistência é um elemento fundamental no projeto estrutural, especificada para fins de controle e monitoramento. Observam Silva Filho e Helene (2011) que o referido controle é muitas vezes o único parâmetro efetivamente monitorado durante o processo de construção, baseando-se fundamentalmente no acompanhamento dos resultados de ensaios à compressão dos corpos de prova moldados durante a concretagem. Estes ensaios, de acordo com Silva Filho et al. (2011), possuem resultados diferentes da situação real da estrutura, visto que o adensamento e as condições de exposição e cura dos corpos de prova são diferentes daquelas existentes na peça real.

Neville (2016) destaca que o ensaio mais comum realizado no concreto endurecido é o ensaio de resistência à compressão, em razão à sua fácil realização, ao fato de que praticamente todas as características desejáveis do concreto estão relacionadas à sua resistência, e principalmente por se tratar de uma definição essencial no projeto estrutural.

Silva Filho et al. (2011) abordam sobre a importância dos END para monitorar o estado de estruturas de concreto através da resistência à compressão. Devido à resistência estar fortemente ligada com a densidade do material, é possível utilizar ensaios de ultrassom, de radar e de esclerometria para obter estimativas de resistência. Andrade (1992) cita que para avaliar e controlar a resistência do concreto *in situ*, podem ser utilizados ensaios destrutivos, ou realizar a combinação de ensaios destrutivos e não destrutivos, sendo mais recomendado realizar a segunda opção. Padrão (2004) concorda com Andrade (1992), e afirma que utilizar ensaios combinados representa um potencial aumento no nível de precisão dos ensaios realizados *in situ*, em relação aos métodos utilizados de forma isolada. O autor ainda cita que, normalmente é utilizada a combinação de métodos quando o intuito dos ensaios é obter a resistência *in situ* dos elementos. Neville (2016) fomenta as teorias de Andrade (1992) e Padrão (2004), e comenta que a partir de ensaios não destrutivos a resistência pode ser apenas avaliada, e não de fato medida, devido aos END serem, em sua maioria, comparativos. Assim, o interessante é mesclar informações obtidas em END com as resistências obtidas por corpos de prova ou testemunhos extraídos da estrutura, a fim de obter uma relação experimental a ser utilizada para converter os resultados qualitativos obtidos nos END em um valor quantitativo de resistência.

### **2.3.1 Esclerometria**

Este ensaio é considerado um dos métodos mais difundidos entre os profissionais da construção civil, devido à sua facilidade e ao baixo custo dos equipamentos (ANDRADE, 1992; PALACIOS, 2012). Segundo Neville (2016, p. 653), o ensaio de esclerometria “é baseado no

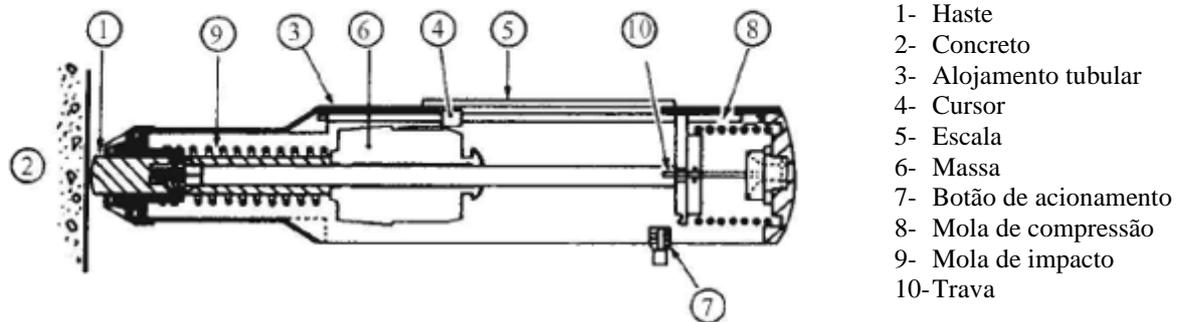
princípio de que a reflexão de uma massa elástica depende da dureza da superfície contra a qual a massa colidiu”. O autor explica que este ensaio mede somente as propriedades da região superficial do concreto, com profundidade de cerca de 30 mm.

O ensaio com esclerômetro é, segundo Neville (2016), um ensaio de natureza comparativa, sendo útil para diversas verificações, dentre elas:

- a) verificação da uniformidade do concreto em estruturas *in situ* ou pré-moldadas;
- b) verificar se o índice esclerométrico atingiu o valor correspondente a determinada resistência, sendo esta informação útil para tomadas de decisões na obra, como remoção de fôrmas ou aplicação de carga na estrutura;
- c) verificar se o desenvolvimento da resistência do concreto foi afetado pelo congelamento em idade precoce;
- d) verificação da resistência à abrasão de pisos de concreto, propriedade dependente exclusivamente da dureza superficial.

De acordo com Evangelista (2002), este método de ensaio consiste na aplicação de um impacto à superfície do concreto, utilizando uma massa com uma determinada energia para obter o valor da intensidade do ricochete, definido como índice esclerométrico (IE). O ricochete depende do valor da energia cinética antes do impacto, e quanto desta energia será absorvida no momento do impacto. Parte da energia é absorvida na fricção mecânica do equipamento, e o restante da energia é absorvida na interação entre a barra de percussão e o elemento estrutural. Essa energia absorvida tem relação direta com a resistência e rigidez do concreto. Neville (2016) complementa a explicação de Evangelista (2002), esclarecendo que a energia absorvida pela massa vem da mola elástica a que está conectada, estendendo a mola até uma posição fixa onde há o armazenamento da energia potencial elástica a ser transformada em energia cinética no acionamento do equipamento. Ainda, define o índice esclerométrico como a distância percorrida pela massa após sofrer a reflexão, sendo este valor uma porcentagem da extensão inicial da mola, obtida após o acionamento do equipamento. Este índice é indicado através de um cursor em uma escala graduada, e se trata de um valor arbitrário, visto que depende da energia armazenada na mola e da dimensão da massa do equipamento. O autor também observa que o equipamento deve ser utilizado em superfícies lisas, e que a energia absorvida pelo concreto está relacionada tanto à sua resistência quanto à sua rigidez, tornando o índice esclerométrico controlado por essas duas propriedades. Na Figura 5 é possível visualizar as partes que compõe um esclerômetro.

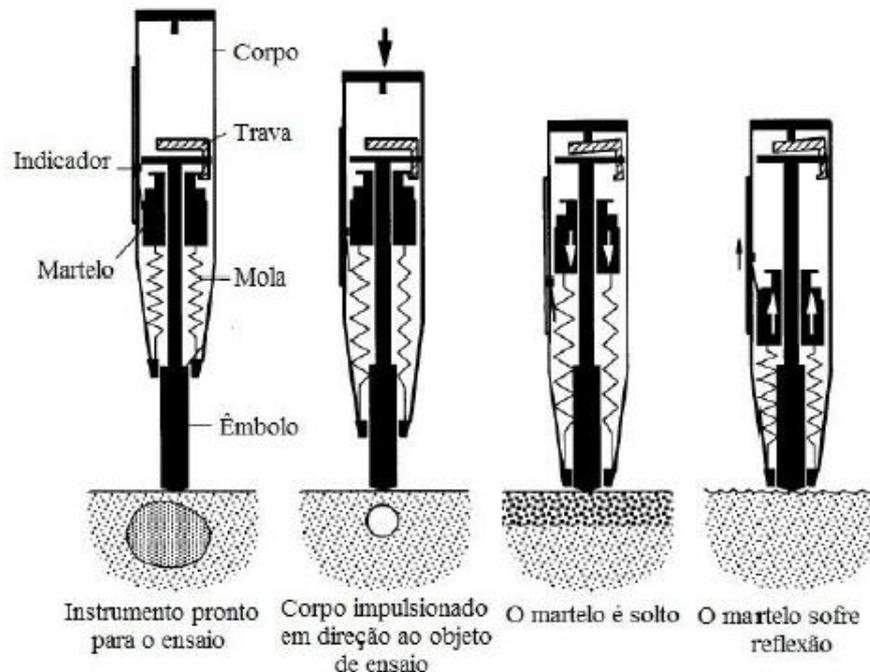
Figura 5 – Partes constituintes de um esclerômetro



Fonte: Adaptado de Neville (2016).

Cóias (2008) explica brevemente como é realizado o ensaio ao explicar que após realizar a preparação da superfície, a cabeça do êmbolo de compressão deve ser colocada perpendicularmente à superfície, empurrando o corpo do esclerômetro contra ela de maneira contínua, até que a massa interna se solte e se ouça o impacto. O autor cita como pontos críticos do ensaio a escolha do local e o número de ensaios realizados. O princípio do funcionamento do equipamento pode ser observado pela Figura 6.

Figura 6 – Etapas de funcionamento do esclerômetro



Fonte: Palacios (2012).

Algumas recomendações são feitas por Neville (2016), para que haja mais confiabilidade nos resultados obtidos. São elas:

- a) manter a haste do esclerômetro sempre normal à superfície, pois a posição do esclerômetro com relação à vertical afeta o índice esclerométrico. Devido a ação da gravidade, o índice esclerométrico de uma laje medido no piso (de cima para baixo) será menor que se medido no teto (de baixo para cima). Superfícies inclinadas e verticais produzem valores intermediários;
- b) devido à grande variação dos valores de dureza superficial do concreto em uma pequena área, deve-se determinar o índice esclerométrico em vários pontos com pouca distância entre si, porém não sendo menor que 25 mm. É recomendado por normas estrangeiras, realizar ensaios em uma malha com espaçamento entre 20 e 50 mm, em uma área de tamanho igual ou inferior à 300 x 300 mm.

Com relação a primeira recomendação citada por Neville (2016), Evangelista (2002) destaca que quando o ensaio não é realizado com o esclerômetro na posição horizontal deve-se corrigir o índice esclerométrico obtido, através da aplicação de coeficientes fornecidos pelos fabricantes.

Andrade (1992) cita dois grandes erros relacionados à variabilidade dos resultados dos ensaios:

- a) o primeiro se trata da carbonatação na superfície do concreto, que ocasiona um maior endurecimento na superfície se comparado com o interior da massa do concreto. Esta situação pode ser resolvida através de polimento com pedra de carborundum ou através de politriz eletromecânica. A carbonatação pode ser detectada através da aplicação de um indicador químico à base de fenolftaleína na superfície do concreto;
- b) o segundo erro, ao contrário do primeiro, é a situação em que a superfície do concreto está amolecida devido à um ataque químico ou à falta de aderência entre o agregado e a pasta de cimento.

Se tratando de um ensaio pontual e com baixa energia, fica passível de variações nos resultados, sendo influenciado por fatores como a presença de uma partícula grande de agregado ou a presença de um vazio ou falha de concretagem logo abaixo do ponto ensaiado. É possível relacionar os valores obtidos no ensaio com a resistência do concreto, porém essa relação pode ser afetada por fatores como a idade do concreto e a presença de carbonatação na superfície ensaiada. Desta forma, é necessário correlacionar o índice esclerométrico com as propriedades do concreto, através de formas empíricas ou experimentais, onde a estimativa da resistência à compressão pode ser obtida através da análise de tabelas ou curvas fornecidas pelo fabricante

do aparelho (SILVA FILHO et al., 2011). Cóias (2008) explica que na lateral do equipamento deve constar um ábaco para correlacionar o valor do índice esclerométrico obtido para estimar a resistência do concreto. A norma ABNT NBR 7584 (2012) salienta que as curvas constantes nos aparelhos não correspondem ao concreto em avaliação, e muitas vezes são relativas a concretos preparados em outros países, desta forma não possuindo as mesmas características do concreto a avaliar. Assim, a norma orienta a utilizar curvas de correlação confiáveis, visando não interferir nos resultados obtidos.

Andrade (1992) considera que a melhor maneira de converter os resultados obtidos por ensaios não destrutivos é correlacioná-los com resultados de ensaios destrutivos de compressão axial realizados através do rompimento de testemunhos extraídos. Neville (2016) concorda, afirmando que o procedimento correto para estimar a resistência através do índice esclerométrico é determinar experimentalmente a relação entre ambos, realizando o ensaio de esclerometria em testemunhos extraídos e após o ensaio, romper estes para obter a resistência, a fim de correlacionar os resultados dos dois ensaios obtidos pela mesma amostra. O autor ainda afirma que, de um modo geral a esclerometria é útil, porém não é um ensaio para determinação de resistência, e que não deve ser utilizada como substituição a ensaios de resistência à compressão.

O ensaio de esclerometria é regulamentado pela norma ABNT NBR 7584 (2012), documento que será seguido como base para execução do ensaio neste trabalho. A seguir são citadas algumas considerações importantes abordadas pela norma:

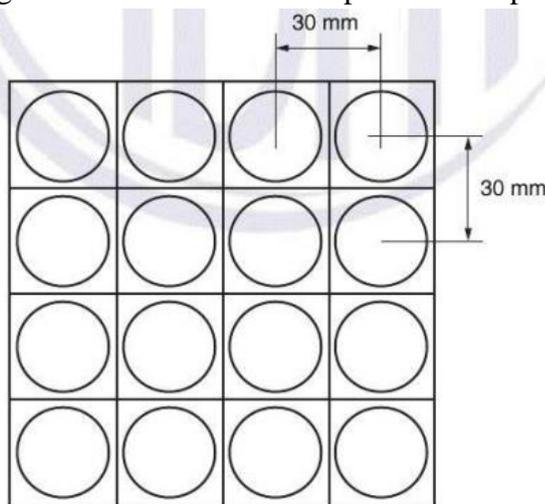
- a) equipamentos e ferramentas necessárias para execução do ensaio:
  - esclerômetro de reflexão;
  - disco ou prisma de carborundum para polimento manual da área de ensaio;
  - máquina politriz para desgaste ou polimento da superfície de concreto, utilizada quando se deseja retirar determinada camada superficial admitida como alterada;
- b) tipos de esclerômetro, escolhido em função das características da estrutura e dependendo o grau de precisão desejado:
  - com energia de percussão de 30 N.m, indicado para obras de grandes volumes de concreto;
  - com energia de percussão de 2,25 N.m, utilizado em casos normais de construção de edifícios e elementos estruturais;
  - com energia de percussão de 0,90 N.m, indicado para concretos de baixa resistência;

- com energia de percussão de 0,75 N.m, modelo mais indicado para elementos de pequenas dimensões e sensíveis aos golpes;
- c) verificação do esclerômetro:
- o aparelho deve ser aferido antes de sua utilização ou a cada 300 impactos realizados na mesma inspeção;
- d) superfície do concreto:
- devem ser secas ao ar, limpas e planas;
  - dar preferência a superfícies onde foram utilizadas fôrmas não absorventes e lisas (metálicas ou plásticas), verticais ou inclinadas;
  - em superfícies horizontais, devido aos fenômenos de segregação e exsudação, só podem ser ensaiadas caso as camadas alteradas sejam removidas e se obtenha, através de polimento, uma superfície plana e adequada para o ensaio;
  - evitar superfícies úmidas ou carbonatadas. Caso seja necessário o ensaio, preparar a superfície e, caso haja necessidade, utilizar coeficientes de correlação;
- e) área de ensaio:
- preparar área de ensaio com polimento, através de movimentos circulares. Resquícios de poeira e pó superficial devem ser removidos a seco;
  - escolher uma área localizada, de preferência, nas faces verticais dos elementos estruturais;
  - estar afastada de regiões afetadas por segregação, exsudação, grande concentração de armaduras, juntas de concretagem, cantos e arestas, entre outros. Estar distante no mínimo, 50 mm dos cantos e arestas;
  - estar compreendida entre 8000 mm<sup>2</sup> (90 mm x 90 mm) e 40000 mm<sup>2</sup> (200 mm x 200 mm);
  - as áreas devem estar geométrica e uniformemente distribuídas ao longo da estrutura a ser analisada. O número de áreas de ensaio varia conforme a heterogeneidade do concreto, aumentando de acordo com esta. É recomendado pelo menos uma área de ensaio por elemento, e se este possuir uma grande quantidade volumétrica, duas áreas de ensaio localizadas em faces opostas;
- f) impactos:
- em cada área de ensaio devem ser realizados 16 impactos, onde sugere-se realizar um desenho para determinar a localização de cada impacto, constituído

por uma malha de 4x4 quadrados com a distância de 30 mm entre os centros de aplicação. Um desenho explicativo pode ser observado pela Figura 7;

- não é permitido realizar mais de um impacto sobre um mesmo ponto;
- evitar impactos sobre armaduras, bolhas e áreas similares;

Figura 7 – Área de ensaios e pontos de impacto



16 impactos

Fonte: ABNT NBR 7584 (2012).

g) esbeltez dos elementos de concreto:

- evitar áreas de ensaios onde os elementos de concreto possuam dimensões menores que 100 mm na direção do impacto;
- o ensaio deve ser realizado na posição de maior inércia do elemento;

h) resultados:

- calcular a média aritmética dos 16 índices esclerométricos obtidos na área de ensaio;
- desprezar índices esclerométricos que estejam afastados em mais de 10% da média calculada, e calcular uma nova média;
- o índice esclerométrico médio final deve ser obtido com no mínimo cinco valores individuais, e destes cinco valores, nenhum deve se afastar mais do que 10% da média final. Caso não seja possível, o ensaio da área em questão deve ser desconsiderado;
- caso seja necessário, em superfícies horizontais deve-se realizar a correção do valor médio do índice esclerométrico final, com os coeficientes de correção informados pelo fabricante do esclerômetro.

### 2.3.2 Extração e rompimento de testemunhos

“Comumente, a inspeção e o diagnóstico do desempenho de estruturas de concreto armado estão relacionados com ensaios de resistência à compressão em testemunhos extraídos da própria estrutura” (CHIES, 2014, p. 24). A extração de testemunhos é um ensaio destrutivo bastante utilizado por profissionais da construção civil, e consiste basicamente na retirada de amostras do concreto *in situ* para posterior rompimento através de ensaios de compressão axial. Possui como desvantagens ser oneroso e ter como restrição a escolha do local da amostra, visando não comprometer a estabilidade da estrutura. Assim, o número de amostras permitidas é limitado, não possibilitando um mapeamento completo dos níveis de resistência do concreto na estrutura (MACHADO, 2005).

Para Santos (2016) e Medeiros et al. (2017), dentre todos os métodos de ensaios existentes para avaliar a propriedade da resistência do concreto de uma estrutura, o ensaio de compressão de testemunhos extraídos é o ensaio de maior confiabilidade e precisão. Martins e Maia Filho (2015) afirmam que este ensaio representa as características fiéis do concreto *in situ*, pois todo ensaio é realizado com amostras retiradas diretamente da estrutura. Castro (2009) e Santos (2016) concordam que o ensaio de extração de testemunhos realizados em estruturas acabadas é necessário quando há dúvidas sobre a resistência ou o desempenho do concreto, sendo realizado o ensaio à compressão para determinar a resistência do concreto da estrutura.

De acordo com Neville (2001), a extração de testemunhos também pode ser necessária para verificações de resistência a fim de definir a máxima capacidade de carga da estrutura, mudanças de uso e necessidade de submeter a estrutura a novas solicitações, ou também a necessidade de verificação da integridade da estrutura em situações que podem comprometê-la, como exposição ao fogo, microfissurações ou ação de agentes deletérios.

Ainda referente à aplicação dos ensaios de extração de testemunhos, Santos (2016) cita usos onde a resistência não é a informação pretendida, como utilizar o ensaio para analisar o estado atual de uma estrutura e sua durabilidade através de análises laboratoriais da amostra para averiguar importantes propriedades do concreto, como: carbonatação e penetração de cloretos; reações álcali-agregado; propriedades físicas e mecânicas como densidade, absorção de água, resistência à tração, permeabilidade, abrasão, resistividade, módulo de elasticidade, entre outras.

O ensaio à compressão de testemunhos extraídos proporciona um resultado da situação real da estrutura, levando em conta todos os efeitos das condições de execução que de fato

ocorreram, como lançamento, compactação, cura, estado de saturação, maturação ou possíveis danos durante o uso. Esse diferencial proporciona uma análise mais realista da estrutura, se comparado ao tradicional ensaio de resistência à compressão através de corpos de prova de controle (CASTRO, 2009).

Neville (2016) salienta que a escolha do local das extrações depende do objetivo do ensaio. Se o objetivo for determinar a resistência de uma área específica do elemento, que pode ser uma área crítica ou danificada, o local já está definido pois trata-se de uma análise pontual. Já se o objetivo for estimar uma resistência representativa para toda a estrutura, deve-se escolher locais aleatórios para extração. Contudo, deve-se atentar também para o fato de que se o testemunho for obtido de um concreto submetido à esforços de tração, o elemento pode conter fissuras que diminuam o valor de sua resistência. O autor explica que os testemunhos são extraídos utilizando uma broca rotativa com coroa de diamante, sendo obtido um corpo de prova cilíndrico, podendo conter fragmentos de armadura e superfícies das bases irregulares e perpendiculares. O testemunho deve ser imerso em água, capeado e ensaiado à compressão em condições úmidas, pois de acordo com o autor, em ensaios japoneses foi acusado o aumento de cerca de 10% na resistência de corpos de prova ensaiados em condição seca se comparado à condição úmida. A norma que rege o ensaio, ABNT NBR 7680-1 (2015) discorda com relação às condições de umidade das amostras, orientando a realizar o rompimento do testemunho em condição úmida ou saturada, sendo esta definida de acordo com a condição em que o elemento estrutural se encontrava antes da extração.

Cremonini (1994) aponta que para realizar o ensaio de extração, deve ser definido qual a resistência a obter: resistência efetiva ou resistência potencial. A resistência efetiva, também nomeada como resistência real, é obtida através de ensaios em estruturas acabadas; já a resistência potencial, é obtida através do rompimento de corpos de prova padrão moldados, curados e ensaiados em condições normalizadas. Neville (2016) complementa que, se o objetivo for determinar a resistência potencial do concreto através de ensaios de testemunhos extraídos da estrutura, é necessário realizar correções em relação às condições reais obtidas. Para este trabalho, o objetivo é obter a resistência real (ou efetiva) da estrutura.

Sabe-se, porém, que toda a teoria dos cálculos estruturais está baseada nos resultados de corpos de prova moldados e não em testemunhos extraídos, visto que os cálculos levam em consideração um  $f_{ck}$  equivalente (obtido nos corpos de prova moldados), e não um  $f_{c,ext,j}$  (obtidos nos corpos de prova extraídos). Assim, é necessário transformar o resultado de um testemunho extraído para um resultado equivalente como se este tivesse sido moldado, ou seja,

transformar o  $f_{c,ext,j}$  em um  $f_{ck}$  equivalente, viabilizando um novo cálculo estrutural a partir modelos e fórmulas convencionais que são empregados para obras novas com corpos de prova moldados (HELENE, 2011). O autor corrobora que avaliar a resistência à compressão do concreto através da extração de testemunhos é um processo passível de erros e de controverso entendimento, visto que depende da introdução de diversos coeficientes de ajuste. O ensaio também depende da qualidade da execução da estrutura, pois regiões de concreto mal adensado podem conduzir a uma avaliação errônea. Visando isso, recomenda-se realizar ensaios de esclerometria para identificar a homogeneidade do concreto, antes de realizar a extração.

Neville (2016) aborda demais situações que influenciam nos resultados da resistência à compressão de testemunhos extraídos. Uma delas é relacionada ao diâmetro do testemunho, pois testemunhos pequenos apresentam maior variabilidade nos resultados se comparado à testemunhos de dimensão padrão. Segundo o autor, os valores típicos de coeficientes de variação são de 7 a 10% para testemunhos de 50 mm e de 3 a 6% para testemunhos de 150 mm. Situações como danos causados pelos procedimentos de extração, condições de cura em campo, local de extração, posição do testemunho em relação ao sentido de lançamento do concreto são premissas que podem influenciar nos resultados também.

Conforme já mencionado, o ensaio de extração de testemunhos é regido pela norma ABNT NBR 7680-1 (2015), sendo esta norma uma referência para realizar o ensaio proposto neste trabalho. Abaixo são citadas algumas considerações importantes constantes na norma para realização do ensaio:

a) equipamento de extração:

- deve permitir extrair amostras homogêneas e íntegras do concreto da estrutura;
- para extração de testemunhos cilíndricos, deve-se utilizar um conjunto de extratora provido de cálice e coroa diamantada que possibilite realizar o corte com o diâmetro estabelecido, sem danificar excessivamente a estrutura;
- deve possibilitar refrigeração à água do local do corte do concreto e minimizar vibrações;

b) amostragem:

- considerar a Figura 8 para determinar a formação de lotes e quantidade de testemunhos a extrair;
- para estruturas sem histórico de controle tecnológico, deve ser feita a divisão da estrutura em lotes identificados em função da importância de seus elementos

estruturais e da homogeneidade do concreto, a ser avaliada através de ensaios não destrutivos;

Figura 8 – Quantidade de testemunhos a extrair

Tipo de controle (conforme ABNT NBR 12655)	Mapeado (rastreadibilidade)		Formação de lotes		Quantidade de testemunhos por lote <sup>a</sup>
	No lançamento	Por ensaios não destrutivos			
Amostragem total	Sim	opcional	Cada lote corresponde ao volume de uma betonada ou de um caminhão-betoneira	Aplicado em um elemento estrutural	2
				Aplicado em mais do que um elemento estrutural	3
	Não	Sim	Conforme o mapeamento. Cada lote deve corresponder ao conjunto contido em um intervalo restrito de resultados dos ensaios não destrutivos <sup>b</sup>	Até 8 m <sup>3</sup>	3 <sup>c</sup>
				Maior que 8 m <sup>3</sup> e menor que 50 m <sup>3</sup>	4
Amostragem parcial	Indiferente	Sim	Conforme o mapeamento. Cada lote deve corresponder ao conjunto contido em um intervalo restrito de resultados dos ensaios não destrutivos <sup>b</sup>	Até 8 m <sup>3</sup>	4
				Maior que 8 m <sup>3</sup> e menor que 50 m <sup>3</sup>	6
Casos excepcionais	Vale o critério de amostragem parcial conforme ABNT NBR 12655 (concreto preparado na obra).				
<sup>a</sup> Ver seção 6. <sup>b</sup> Para o índice esclerométrico e velocidade de propagação de onda ultrassônica, recomenda-se que seja adotado como dispersão máxima do conjunto de resultados o intervalo de $\pm 15\%$ do valor médio. <sup>c</sup> Em se tratando de um único elemento estrutural, a quantidade de testemunhos deve ser reduzida a dois, de forma a evitar danos desnecessários.					

Fonte: ABNT NBR 7680-1 (2015).

- c) escolha dos locais para realizar a extração dos testemunhos:
- extrair os testemunhos a uma distância maior ou igual o seu diâmetro com relação às bordas do elemento ou a juntas de concretagem;
  - manter uma distância mínima de um diâmetro do testemunho entre as bordas das perfurações;
  - utilizar pacômetro ou realizar prospecção por retirada do cobrimento para identificar armaduras e evitar cortá-las na extração;
- d) dimensões dos testemunhos:
- o diâmetro deve ser pelo menos três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo contido no concreto;

- o diâmetro preferencialmente deve ser igual ou maior que 100 mm. Nos casos onde há uma densa concentração de armadura, é permitido extrair testemunhos de 75 mm;
  - para casos específicos, podem ser extraídos testemunhos até 50 mm, porém o número mínimo de testemunhos deve ser o dobro do especificado na Figura 8;
  - a relação altura/diâmetro (h/d) deve ser a mais próxima de dois, conforme condição:  $1 \leq h/d \leq 2$ ;
- e) integridade dos testemunhos:
- os testemunhos devem ser íntegros, sem fissuras, segregação e ondulações, não podendo conter materiais estranhos ao concreto;
  - testemunhos com armadura na direção ortogonal (80° a 100°) podem ser aceitos contanto que possuam diâmetro máximo até 10 mm;
- f) preparação dos testemunhos:
- realizar cortes utilizando serra diamantada dotada de refrigeração à água ou equipamento equivalente para: corrigir a relação h/d; retirar materiais estranhos ao concreto; obter paralelismo entre os topos e sua ortogonalidade com as geratrizes;
- g) condições de umidade:
- quando o concreto da estrutura a ensaiar não estiver em contato com a água, os testemunhos extraídos devem ser expostos ao ar, em ambiente de laboratório, por no mínimo 72 horas, obedecendo aos critérios de temperatura constantes na ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016, sendo ensaiados no estado de equilíbrio que se encontrem;
  - quando o concreto estiver em contato com a água, os testemunhos devem ser acondicionados em tanque de cura ou câmara úmida de acordo com a norma ABNT NBR 9479 (2006), por no mínimo 72 horas, sendo rompidos saturados, obedecendo aos critérios de temperatura constantes na ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016;
- h) determinação da resistência à compressão:
- ensaiar os testemunhos de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2018) para determinar a resistência de ruptura à compressão axial;
  - observar cada testemunho antes e após a ruptura. Anotar e fotografar todas as irregularidades constatadas;

- os resultados obtidos da resistência à compressão dos testemunhos devem ser identificados por  $f_{ci,ext,inicial}$ . Esses resultados devem ser corrigidos pelos coeficientes  $k_1$  a  $k_4$  e os resultados obtidos das correções devem ser apresentados como  $f_{ci,ext}$ ;
- i) coeficientes de correção:
- relação  $h/d$  ( $k_1$ ): quando não for atendida a relação de  $h/d = 2$ , deve-se corrigir o resultado de resistência à compressão pelo coeficiente  $k_1$ , através da Figura 9. Se não houver o valor específico de  $h/d$ , este deve ser obtido através de interpolação linear;
  - efeito de broqueamento em função do diâmetro do testemunho ( $k_2$ ): considerar este efeito em todos os casos, sendo maior quanto menor o diâmetro do testemunho. Para isso, de acordo com a Figura 10, deve-se empregar o coeficiente  $k_2$  aos resultados de resistência obtidos, sendo permitida a interpolação;
  - direção da extração em relação ao lançamento do concreto ( $k_3$ ): para extrações realizadas no mesmo sentido do lançamento (como lajes),  $k_3 = 0$ ;
  - efeito da umidade do testemunho ( $k_4$ ): para corpos de provas rompidos saturados,  $k_4 = 0$ . Para testemunhos seco ao ar,  $k_4 = -0,04$ . Este coeficiente deve ser aplicado ao resultado de resistência obtido;

Figura 9 – Valores de  $k_1$ 

$h/d$	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	1,00
$k_1$	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 7680-1 (2015).

Figura 10 – Valores de  $k_2$  em função do efeito do broqueamento

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

<sup>a</sup> Neste caso, o número de testemunhos deve ser o dobro daquele estabelecido na Tabela 1.

Fonte: ABNT NBR 7680-1 (2015).

- j) cálculos dos resultados:

- utilizar a Equação 1 para obter os resultados corrigidos pelos coeficientes  $k_1$  a  $k_4$ ;

$$f_{ci,ext} = [1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)] \times f_{ci,ext,initial} \quad (1)$$

- realizar o cálculo da média aritmética com os resultados individuais corrigidos. Os resultados que divergirem em 15% do valor da média devem ser analisados com maior atenção, podendo ser descartados caso seja detectada alguma irregularidade. Neste caso, deve-se repetir o ensaio descartado para obter um novo valor;
- a estimativa da resistência característica do lote analisado pode ser calculada pela Equação 2, através da média dos valores individuais corrigidos;

$$f_{ck,ext,seg} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci,ext}}{n} \quad (2)$$

- a resistência de projeto  $f_{cd}$  a ser usada na verificação da estrutura deve ser calculada, utilizando-se a minoração de  $\gamma_c$  prevista na ABNT NBR 6118 (2014);

k) reparo do local da extração:

- realizar a limpeza do local, lixar ou escarificar a superfície antes do preenchimento com concreto, para garantir a aderência entre o concreto velho e o novo;
- para furos de extrações realizados na vertical em condição passante, recomenda-se utilização de graute industrializado ou concreto autoadensável para reparo, além da utilização de fôrmas para auxiliar seu preenchimento. Recomenda-se que após o preenchimento total do furo, o material seja extravasado para se evitar a exsudação e o destacamento das bordas do reparo. Se na extração sejam cortadas as armaduras, deve-se realizar o reparo por emenda, transpasse, solda, luvas de pressão ou por ancoragem de novas barras.

Se faz necessário também abordar as considerações contidas na norma ABNT NBR 5739 (2018), responsável por dar as diretrizes do ensaio de rompimento à compressão axial de testemunhos moldados ou extraídos, que são elas:

- deve-se determinar o diâmetro da amostra pela média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do testemunho;
- deve-se determinar a altura da amostra medindo-a sobre seu eixo longitudinal;
- deve-se romper os testemunhos em uma dada idade especificada, de acordo com as tolerâncias de tempo descritas na Figura 11:

Figura 11 – Tolerância para a idade de ensaio

Idade de ensaio	Tolerância permitida h
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

NOTA Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

Fonte: ABNT NBR 5739 (2018).

- d) o carregamento deve ser feito de forma contínua, com a velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, devendo esta se manter constante durante todo o ensaio. O carregamento só deve ser interrompido quando for detectada a ruptura;
- e) a resistência a compressão deve ser calculada utilizando a Equação 3:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (3)$$

Onde:  $f_c$  é a resistência à compressão em megapascals (Mpa),  $F$  é a força máxima alcançada newtons (N), e  $D$  é o diâmetro do corpo de prova milímetros (mm);

- f) é definido como intervalo para a relação h/d:  $1,94 \leq h/d \leq 2,06$ , nunca devendo ser maior que 2,06, e caso seja menor que 1,94 deve-se aplicar os coeficientes de correção visualizados na Figura 12.

Figura 12 – Fator de correção h/d

<b>Relação h/d</b>	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
<b>Fator de correção</b>	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

NOTA Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.

Fonte: ABNT NBR 5739 (2018).

## 2.4 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O dimensionamento estrutural consiste em calcular uma estrutura com o objetivo de impedir a ruína total ou parcial desta, visando a garantia de que ela suporte de forma segura, estável e sem deformações excessivas, todos os esforços à que está submetida durante sua execução e utilização (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Botelho e Marchetti (2015) abordam de outra maneira a definição de dimensionamento estrutural, onde explicam que este serviço pode se resumir na ação de determinar a seção de concreto e de aço, garantindo que:

- a) a estrutura não entre em colapso;
- b) seja uma estrutura econômica;
- c) suas eventuais fissuras não sejam objetáveis;
- d) suas flechas não sejam objetáveis;
- e) possua boa proteção à armadura (cobrimento), impedindo o processo de corrosão;
- f) caso a estrutura seja deficiente, que apresente sinais visíveis ao usuário antes de alcançar a ruína;
- g) seja durável.

#### **2.4.1 Lajes: definição e classificação**

Botelho e Marchetti (2015) definem a laje como uma estrutura primária que tem como objetivo receber e sustentar as cargas verticais permanentes e acidentais das edificações, sendo geralmente estruturas de pequenas espessuras, planas e quase sempre retangulares. Farias e Bolina (2018) abordam ainda que a laje é um elemento estrutural em que a espessura é pequena em relação às suas dimensões em planta, sendo necessário para seu dimensionamento definir o carregamento que ela deve suportar, composto por: peso próprio, revestimento, utilização, cargas de paredes, e eventuais cargas concentradas.

De acordo com Campos Filho (2014), as lajes podem ser classificadas com base em diversos fatores de diferenciação, sendo os principais:

- a) forma: podem ter contorno poligonal (geralmente retangulares, mas podem ser encontradas em forma trapezoidal, ou em L) ou circular;
- b) vinculação:
  - apoiada: quando a borda da laje é apoiada por vigas ou paredes;
  - livre: quando a borda da laje não tiver nenhuma vinculação;
  - engastada: quando a borda da laje tem continuidade além do apoio, laje adjacente;
- c) relação entre os lados:
  - lajes armadas em uma só direção: aquelas onde a relação entre o maior e o menor vão é maior do que 2 ( $l_y/l_x > 2$ );

- lajes armadas em duas direções, ou lajes armadas em cruz: aquelas onde a relação entre o maior e o menor vão é menor do que 2 ( $l_y/l_x < 2$ );

Em estruturas de concreto armado as lajes possuem grande destaque como elemento de estrutura, visto que são responsáveis por receber as cargas dos pavimentos e transmiti-las para vigas ou paredes onde estejam apoiadas. Dentre os diferentes métodos de construção, as lajes maciças são as mais utilizadas atualmente, devido à sua simplicidade nas questões de cálculo e execução (FARIAS; BOLINA, 2018).

Desta forma, no projeto de estruturas considera-se como carga de projeto e dimensionamento a Equação 4:

$$\text{Carga de projeto } (q) = \text{carga permanente} + \text{carga variável} \quad (4)$$

Onde o peso próprio da laje e do revestimento são classificados como carga permanente, e a carga variável representa a carga que a estrutura deve sustentar conforme o seu uso (pessoas, móveis, maquinário, veículos, etc.), referenciada pela norma ABNT NBR 6120 (2019).

#### 2.4.2 Cálculo das solicitações

Para calcular os esforços atuantes em uma laje, existem dois grupos de métodos: os métodos clássicos, e os métodos de ruptura. Os métodos clássicos são baseados na teoria da elasticidade, onde se supõe que um material é homogêneo e isótropo, com comportamento linear. Nestes métodos se obtém com grande precisão os esforços em situação de serviço, a partir dos quais pode-se realizar a distribuição de armaduras de modo compatível com o comportamento em serviço obtido. Os métodos de ruptura, baseados na teoria plástica, supõem que o material se comporta como um corpo rígido plástico perfeito, e permitem a obtenção mais racional da carga última em situação de ruína da laje (MONTROYA; MESEGUER; CABRÉ, 2000). Campos Filho (2014) concorda, abordando em outras palavras que, considerar o concreto armado como um material elástico traz uma boa aproximação para o comportamento das lajes submetidas a cargas de serviço (verificação dos estados limite de serviço). Já se considerar o concreto sendo um material plástico, será obtida uma boa aproximação para o comportamento das lajes na ruptura (verificação dos estados limites últimos).

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), adotando o concreto como um material plástico, para garantir as condições apropriadas de ductilidade a posição da linha neutra (linha onde os esforços de tração e de compressão são iguais a zero) deve ficar determinada em:

$$x/d \leq 0,25 \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$x/d \leq 0,15 \text{ se } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

Utilizando o método de ruptura, é possível calcular o momento fletor da estrutura utilizando as Equações 5 e 6, adaptadas de Montoya, Meseguer, Cabré (1979):

$$M_x = k \cdot q \cdot l_x^2 \quad (5)$$

$$M_y = \varphi \cdot M_x \quad (6)$$

Onde:

$M_x$  = momento fletor sem majoração, relacionado ao menor vão da laje, em  $KNm$ ;

$M_y$  = momento fletor sem majoração, relacionado ao maior vão da laje, em  $KNm$ ;

$k$  e  $\varphi$  = coeficientes para cálculo em função da relação entre os vãos e da vinculação da laje, abordados na Tabela 9, presente no Anexo A, *adimensionais*;

$q$  = carga atuante na laje, em  $KN/m$ ;

$l_x$  = menor vão da laje, em  $m$ ;

$l_y$  = maior vão da laje, em  $m$ ;

### 2.4.3 Dimensionamento das armaduras

Em condições normais, o esforço solicitante preponderante para dimensionar lajes e vigas é o momento fletor. Se este momento atuar em um plano que contenha um dos principais eixos da seção transversal, ocorre a flexão normal. E caso, além da atuação do momento, haja a atuação de uma força normal  $N$  (esforço axial), este evento é definido como flexão normal composta. Caso esta força normal não exista, o evento é classificado como flexão normal simples (PORTO; FERNANDES, 2015).

Para realizar o dimensionamento da estrutura à flexão simples, podem ser utilizadas as Equações 7, 8, 9 e 10, abordadas por Carvalho e Figueiredo Filho (2014):

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (7)$$

$$M_d = b \cdot f_{cd} \cdot 0,68 \cdot x \cdot z \quad (8)$$

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad (9)$$

$$x = \frac{0,68 \cdot d \pm \sqrt{(0,68 \cdot d)^2 - 4 \cdot 0,272 \cdot \left(\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}}\right)}}{0,544} \quad (10)$$

Onde:

$z$  = braço de alavanca: distância entre o centro de gravidade da armadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida de concreto, em  $m$ ;

$d$  = altura útil: distância do centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até a fibra mais comprimida de concreto, em  $m$ ;

$x$  = posição da linha neutra: distância da borda mais comprimida do concreto ao ponto que tem deformação e tensão nulas, em  $m$ ;

$M_d$  = momento fletor solicitante de cálculo na seção, majorado pelo coeficiente  $\gamma_f$ , normalmente adotado 1,4, em  $KNm/m$ ;

$b$  = largura da seção transversal, em  $m$ ;

$A_s$  = área de aço necessária para o momento fletor calculado, em  $cm^2/m$ ;

$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ , em  $KN/m^2$ ;

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$ , em  $KN/cm^2$ .

Se tratando de uma estrutura existente, deve-se realizar a verificação se a armadura atual atende as solicitações da norma ABNT NBR 6118 (2014) quanto às especificações de armadura mínima. Para verificar a armadura mínima de lajes armadas em duas direções, deve-se utilizar as equações 11, 12, 13 e 14.

$$\text{Para armadura negativa: } \rho_s \geq \rho_{min} \quad (11)$$

$$\text{Para armadura positiva: } \rho_s \geq 0,67 \times \rho_{min} \quad (12)$$

$$\text{Onde: } \rho_s = \frac{A_s}{b_w \times h} \quad (13)$$

$$\rho_{min} = 0,15\% \text{ (para } f_{ck} \text{ de 20 a 30 MPa)} \quad (14)$$

Desta forma, utilizando as equações do dimensionamento na ordem inversa, é possível obter o valor da carga suportada pela laje existente, assunto que será abordado na próxima seção deste trabalho.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção é apresentado o método de pesquisa adotado para a realização deste trabalho.

#### 3.1 ESTUDO DE CASO

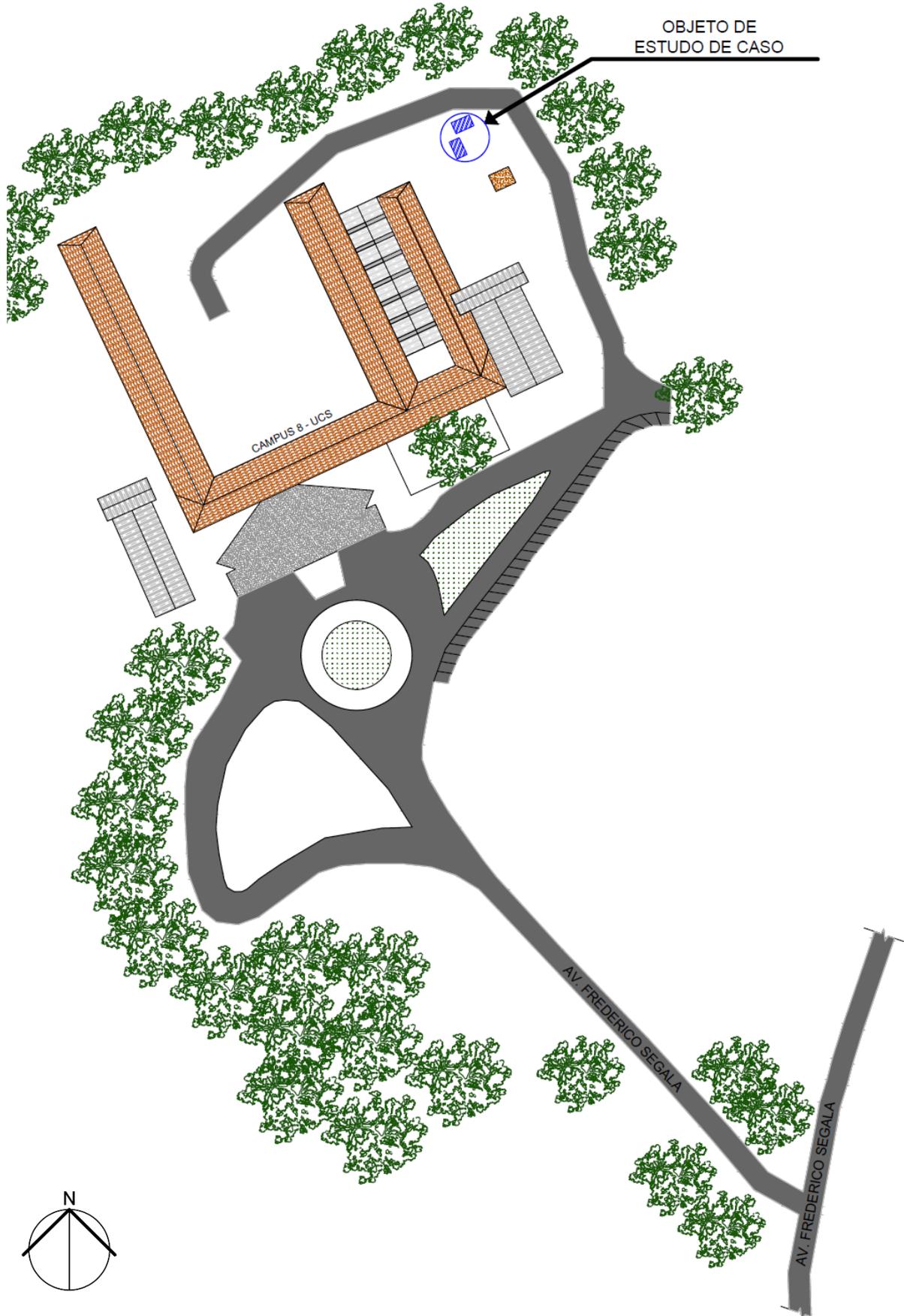
O objeto para estudo de caso está localizado no Campus 8 – Área do Conhecimento de Artes e Arquitetura da Universidade de Caxias do Sul, conforme Figura 13.

As edificações foram construídas em 2014 para fins acadêmicos, com foco na realização de ensaios e estudos de desempenho. Foram denominadas como protótipos para estudos de desempenho, e diferenciadas por nomenclatura de Bloco 14 e Bloco 19. A edificação escolhida para realização do ensaio foi a de nomenclatura Bloco 19, na qual a realização do ensaio se dará na laje de entrepiso do protótipo. Tal edificação possui as seguintes características construtivas, conforme avaliação in loco:

- a) estrutura térrea em alvenaria estrutural com blocos de concreto de largura 19 cm;
- b) fechamentos em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais no 2º pavimento, de largura 19 cm;
- c) revestimento apenas externo, do tipo argamassado de espessura 2,5 cm;
- d) laje de entrepiso totalmente apoiada na alvenaria estrutural, do tipo pré-laje com enchimento maciço, de espessura total 12 cm, sendo 5 cm de pré-laje e 7 cm de capa de enchimento de concreto;
- e) cobertura do tipo laje impermeabilizada com platibanda de 20 cm;

Para melhor entendimento, está demonstrado na Figura 14 o projeto 3D da edificação, na Figura 15 uma imagem in loco das edificações, e nas Figuras 16, 17 e 18 as plantas baixas dos pavimentos térreo, 2º pavimento e cobertura da construção.

Figura 13 – Localização do objeto de estudo de caso



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 14 – Projeto em 3D das edificações



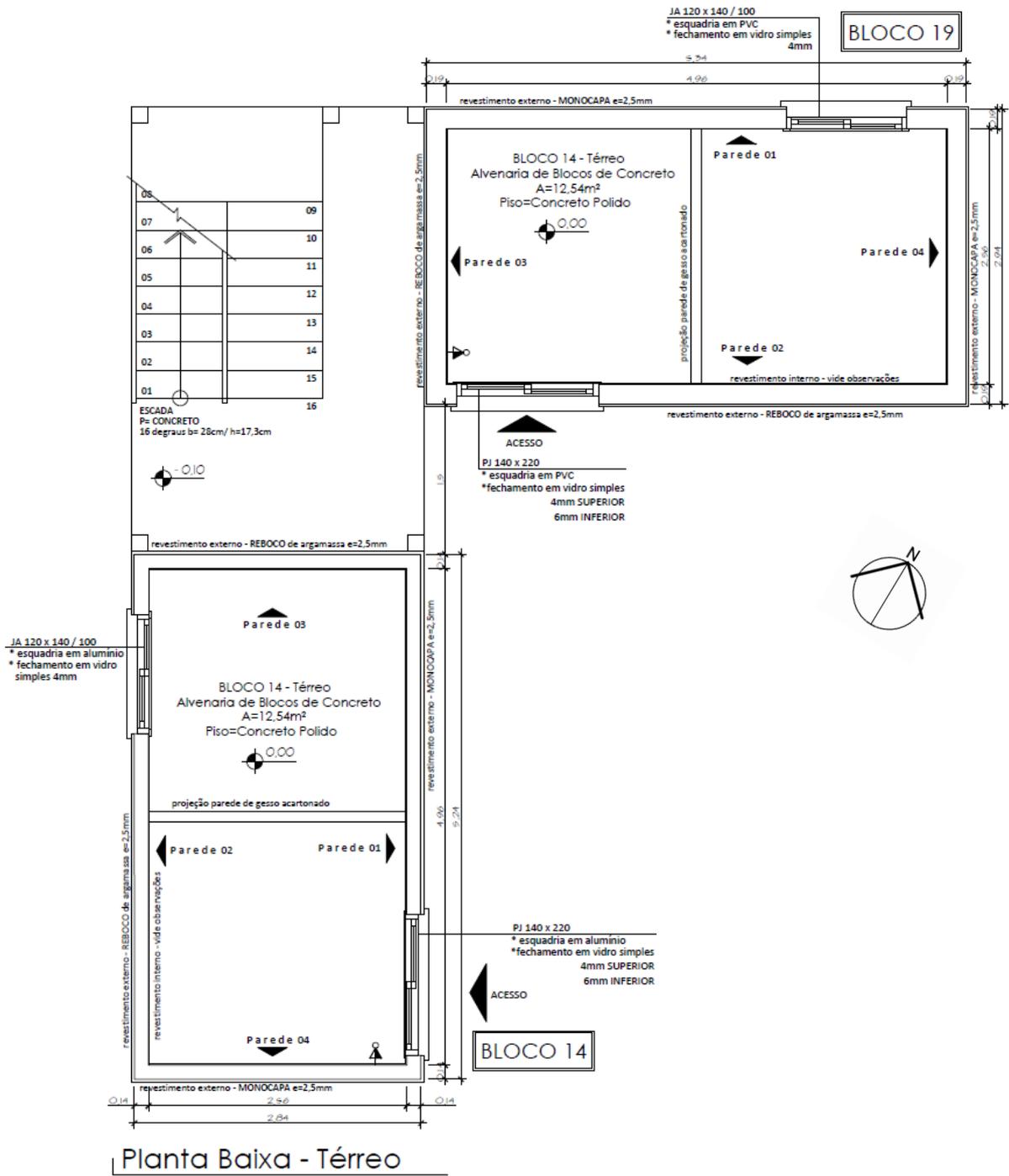
Fonte: UCS (2014).

Figura 15 – Foto in loco das edificações, de junho de 2020



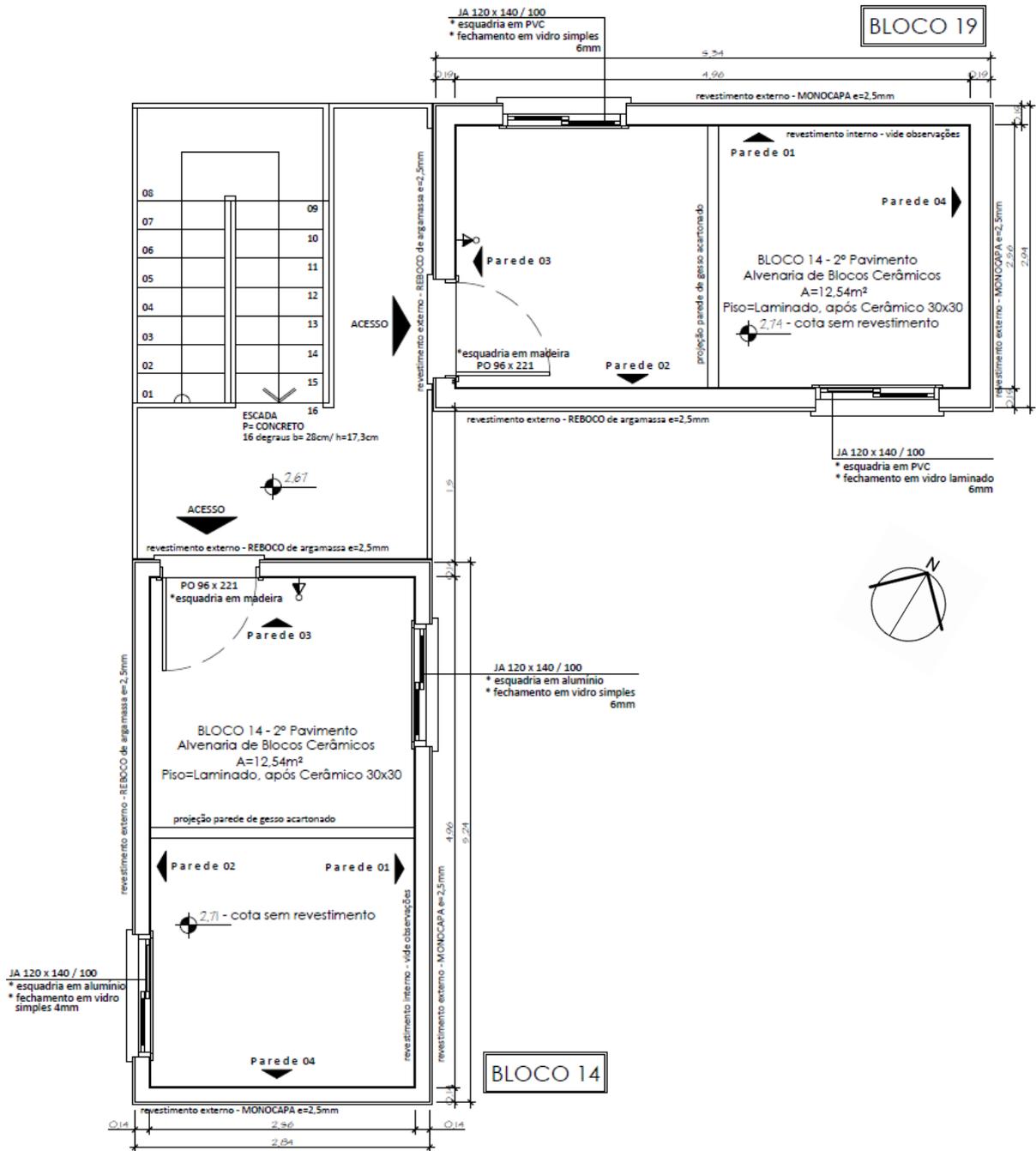
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 16 – Planta baixa térreo



Fonte: UCS (2014).

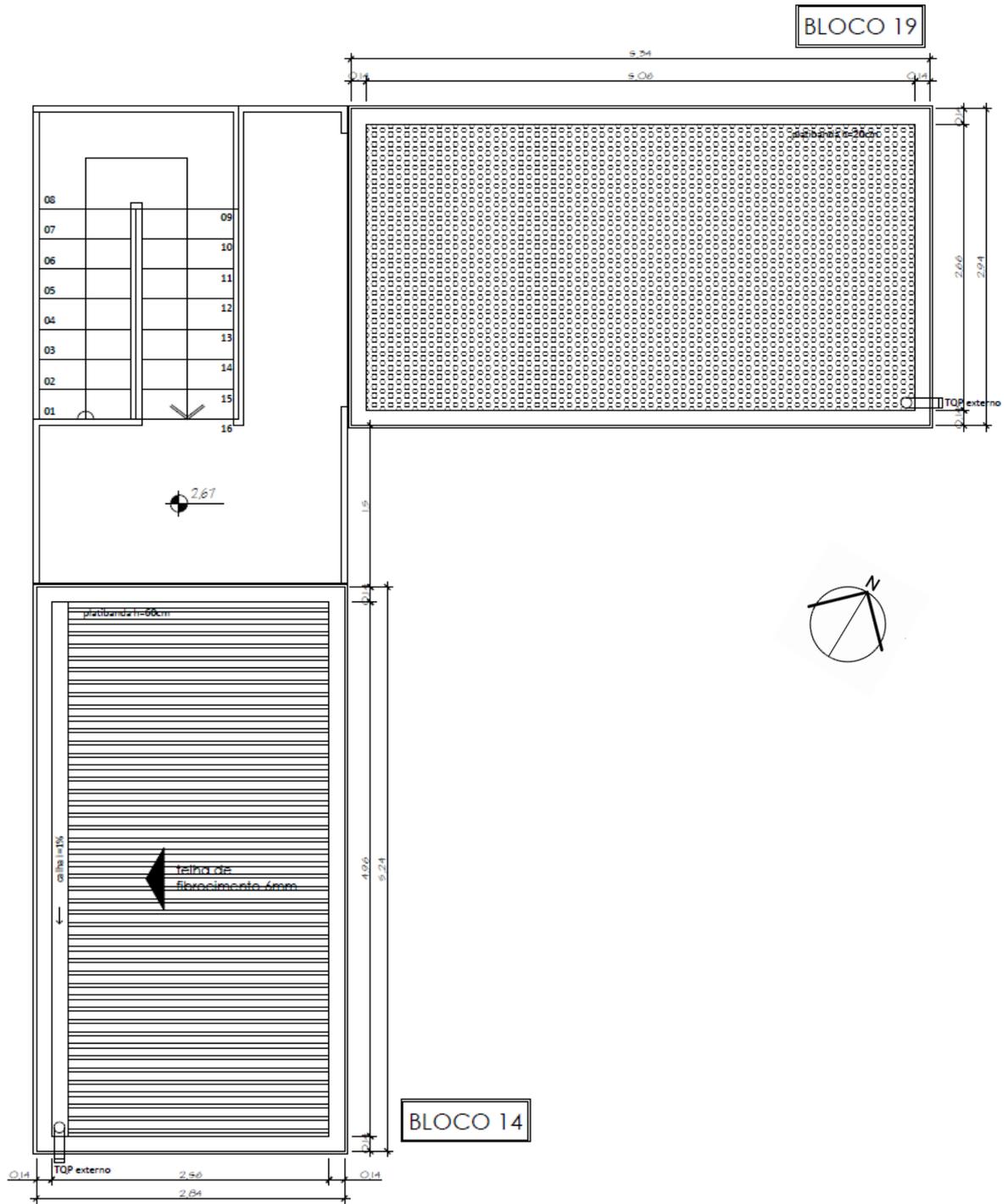
Figura 17 – Planta baixa 2º pavimento



Planta Baixa - 2º Pavimento

Fonte: UCS (2014).

Figura 18 – Planta baixa cobertura



Planta Baixa - Cobertura

Fonte: UCS (2014).

### 3.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizados ensaios não destrutivos, semidestrutivos e destrutivos, na seguinte sequência:

- a) ensaio não destrutivo de pacometria: primeiro ensaio realizado, visando auxiliar o ensaio de esclerometria através da detecção dos pontos de localização da armadura;
- b) ensaio semidestrutivo de escarificação superficial: segundo ensaio realizado, para confrontar as informações obtidas pelo ensaio de pacometria, e também para identificar o diâmetro das armaduras;
- c) ensaio não destrutivo de esclerometria: terceiro ensaio realizado, onde com o auxílio das informações obtidas na pacometria foi possível realizar o ensaio onde não houvesse excessiva concentração de armaduras;
- d) ensaio destrutivo de extração de testemunhos: quarto ensaio realizado. Com o auxílio das informações dos ensaios de pacometria e esclerometria foi possível determinar o melhor local para extração, visando não cortar armaduras e extrair as amostras em locais com concreto homogêneo;
- e) ensaio destrutivo de compressão de corpos de prova cilíndricos: último ensaio realizado. A partir da extração dos testemunhos, respeitado o tempo de cura exigido pela norma, é realizado o rompimento por compressão das amostras, a fim de obter a resistência à compressão do concreto.

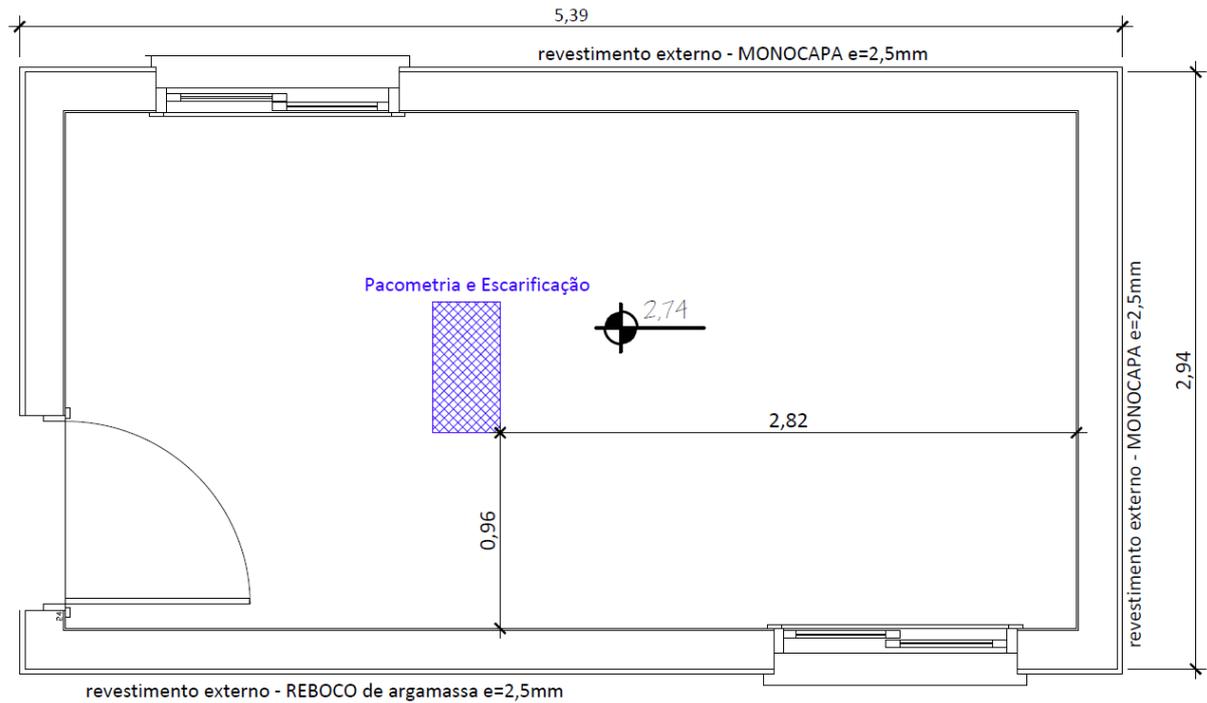
Todos os ensaios foram realizados com o auxílio de um laboratório terceiro, visto que alguns dos equipamentos necessários não haviam no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LABTEC) da UCS. O profissional responsável pela operação dos equipamentos nos ensaios, além de possuir vasta experiência no ramo de ensaios tecnológicos, é Mestre em Engenharia Civil com foco na realização de ensaios *in situ* e laboratoriais, proporcionando assim uma maior confiabilidade aos resultados obtidos. Salienta-se também que todos os procedimentos dos ensaios realizados seguiram as prescrições descritas por normas e autores conforme citado na seção 2 deste trabalho.

#### 3.2.1 Ensaio de pacometria e escarificação superficial

Para realização do ensaio de pacometria, inicialmente devem ser escolhidos os locais para realização do ensaio. Neste estudo, o local escolhido, visualizado na Figura 19, foi aleatório, visto que o ensaio é realizado no local onde se deseja obter dados da armadura, e,

sendo a laje um elemento de armadura positiva uniforme, em qualquer ponto seriam obtidos os dados necessários. Para este ensaio foi utilizado um pacômetro da marca Hilti, modelo PS 35, conforme observado nas Figuras 20 e 21. O equipamento em questão realiza a detecção das armaduras e a espessura do cobrimento, porém não informa o diâmetro da barra, sendo necessário definir este dado pelo processo de escarificação superficial.

Figura 19 – Localização da área de realização do ensaio de pacometria



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 20 – Pacômetro Hilti utilizado no ensaio acusando a espessura do cobrimento



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 21 – Demarcação e interligação dos pontos de detecção da armadura



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Com o intuito de visualizar a continuidade entre a malha desenhada na pacometria e a armadura real da estrutura, a escarificação superficial foi realizada ao lado direito da malha desenhada, possibilitando a visualização da continuidade entre o desenho e a armadura exposta, conforme demonstrado através da Figura 22. Retirado o cobrimento da armadura, foi realizada a medição da bitola das malhas com o auxílio de um paquímetro digital. Para a realização deste ensaio foi utilizado um rompedor de 6 kg, conforme visualizado na Figura 23, e após a coleta das informações, foi realizado o reparo da estrutura, demonstrado na Figura 24.

Figura 22 – Continuidade entre malha desenhada e a armadura existente



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 23 – Realização da escarificação com o auxílio de um rompedor 6 kg



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 24 – Realização do reparo da estrutura



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

### 3.2.2 Ensaio de esclerometria

Para a realização do ensaio de esclerometria foi utilizado o esclerômetro da marca Proceq modelo N-31, conforme Figura 25. Inicialmente foi realizada a calibração do equipamento conforme orientações da norma ABNT NBR 7584 (2012). Com a utilização de uma bigorna de aço de 16 kg, foram aplicados 10 golpes e obtidos 10 índices esclerométricos, utilizados para o cálculo do coeficiente de correção  $k$ . A esclerometria foi realizada em ambas as faces da laje, visto que se trata de uma laje maciça com pré-laje treliçada contendo concretos moldados em etapas distintas da obra. Para avaliar o concreto da pré-laje, na face inferior foram escolhidas três áreas em pontos distintos do elemento para realização do ensaio: um mais centralizado no elemento e próximo à área escarificada, e os outros dois pontos próximos às extremidades da laje na fachada sul. Para avaliação do concreto da capa superior da pré-laje, na face superior foram escolhidas três regiões para aplicação dos golpes, sendo um mais centralizado, um próximo à porta e um próximo à parede. A localização exata dos pontos de realização dos ensaios pode ser visualizada através das Figuras 26 e 27. Após a definição das áreas de ensaio, foi realizado o polimento das regiões com o auxílio de uma pedra de carborundum, que acompanha o aparelho. Em seguida foram desenhadas as malhas nos locais definidos, e após isso foi dado início aos golpes com o esclerômetro posicionado verticalmente

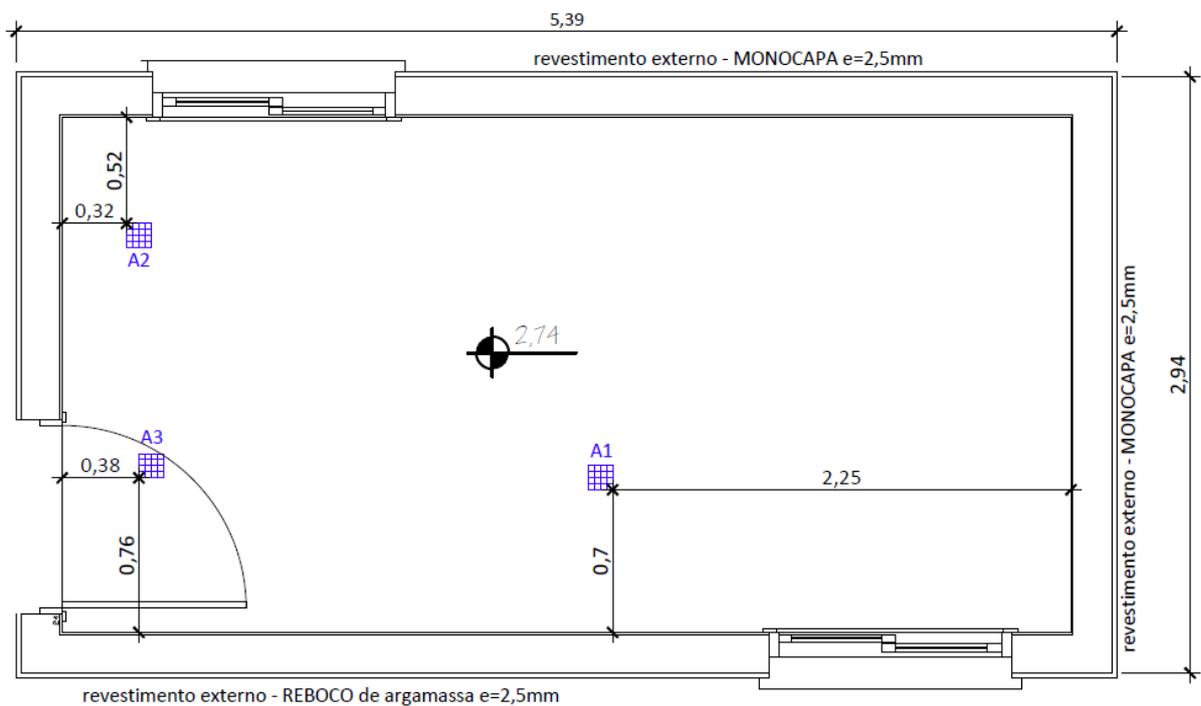
de baixo para cima para avaliação da pré-laje, e de cima para baixo para avaliação da capa de enchimento maciço. As figuras 28 e 29 demonstram algumas etapas da realização deste ensaio.

Figura 25 – Esclerômetro Proceq a ser utilizado no ensaio



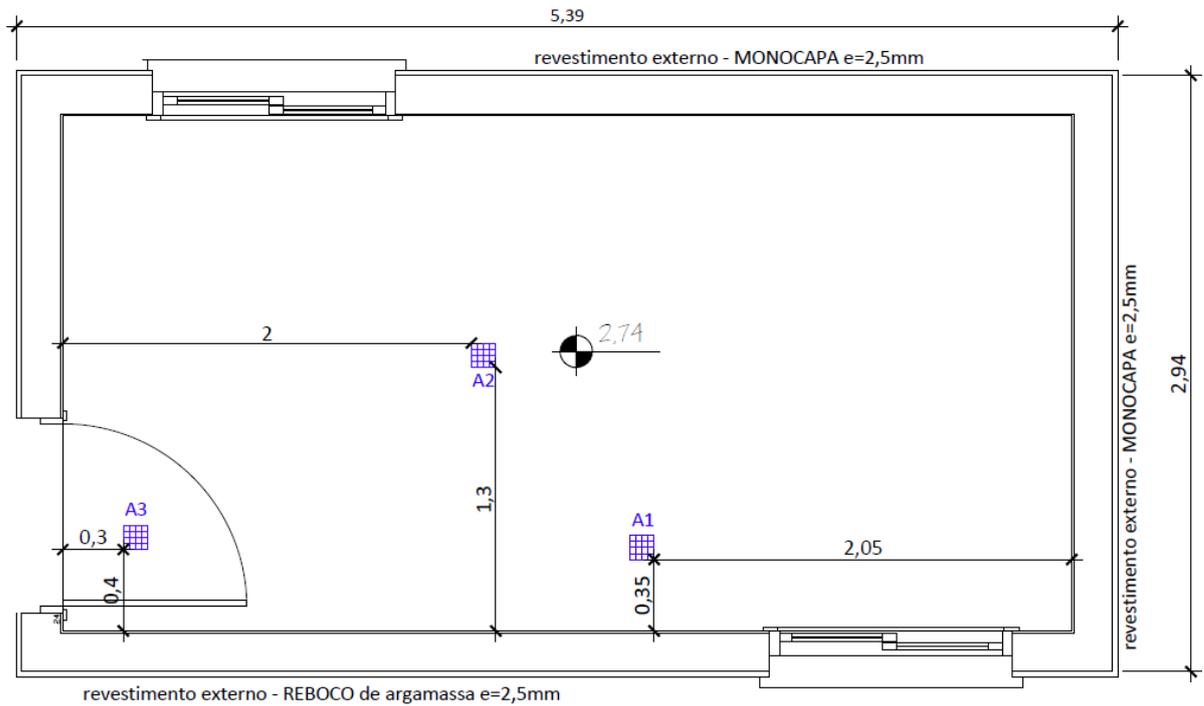
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 26 – Localização dos pontos de ensaio de esclerometria na face inferior da laje



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 27 – Localização dos pontos de ensaio de esclerometria na face superior da laje



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 28 – Realização do polimento da área com a pedra de carborundum



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 29 – Realização do ensaio de esclerometria na área 2 da face inferior da laje



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

### 3.2.3 Ensaio de extração de testemunhos

Encerrando a etapa de ensaios in loco, foi realizada a extração dos testemunhos na laje em estudo. Para definição do número de amostras a extrair foi utilizada a tabela constante na Figura 8 da seção 2.3.2 deste trabalho. A partir da esclerometria realizada, foram definidos os números de lotes para a estrutura com base na homogeneidade do concreto. A escolha dos locais de extração seguiu as orientações da norma, portanto foram escolhidos pontos distantes das arestas do elemento estrutural, e com mais de um diâmetro de distância entre os furos. Também foi levado em consideração evitar cortar armaduras, para isso foi realizada uma nova pacometria nas regiões da extração, visando não cortar, ou cortar o mínimo possível de armaduras nas extrações. Para a realização deste ensaio foi utilizado um conjunto de extratora provido de cálice e coroa diamantada com broca de 75 mm, que possibilita refrigeração à água. As Figuras 30, 31 e 32 demonstram, respectivamente, a extratora posicionada a partir da pacometria, o local do ensaio após a extração e a localização dos pontos de extração.

Figura 30 – Equipamento posicionado para realizar a extração



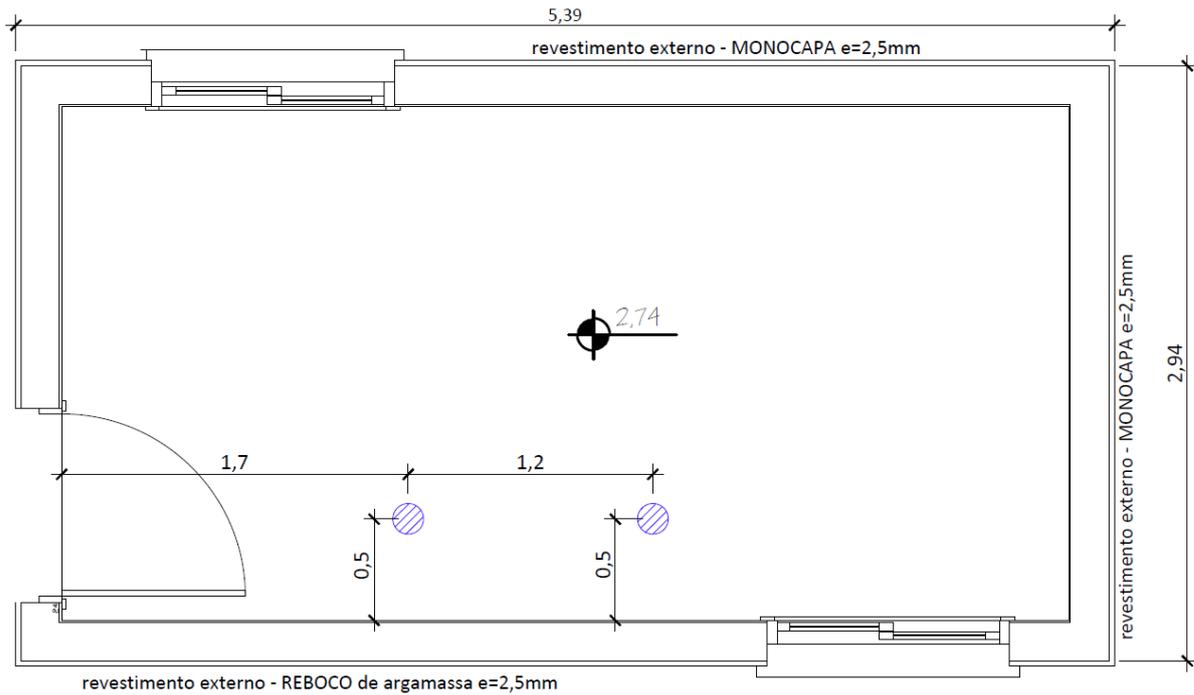
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 31 – Extração realizada, testemunho já extraído



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 32 – Localização dos locais de extração



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

### 3.2.4 Ensaio de compressão de axial

Após o ensaio de extração de testemunhos foi feito o único ensaio de laboratório deste trabalho, o ensaio de rompimento por compressão axial. Os testemunhos extraídos, visualizados nas Figuras 33 e 34, foram levados ao laboratório, pesados, medidos e capeados. Se optou por realizar a regularização do topo e da base dos testemunhos através do processo de capeamento de pasta de cimento ao invés da regularização por retífica, devido à necessidade de atender a relação de  $h/d > 1$ . Após, os testemunhos foram mantidos em ambiente de laboratório expostos ao ar por 72 horas, até o momento do rompimento. Para o rompimento, foi utilizada uma prensa Eletro-Hidráulica Modelo PHE 1 MN, número de série 004, classe 1.

Figura 33 – Testemunhos antes do capeamento



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 34 – Testemunhos após o capeamento



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA

Com os resultados dos ensaios realizados, se iniciou a etapa de dimensionamento, onde a incógnita a descobrir é a carga que a laje em estudo suporta.

Utilizando as equações citadas na seção 2, item 2.4, foi realizado o dimensionamento através das seguintes etapas:

- a) foram mescladas as equações 8 e 9 para obter o valor de  $x$  (posição da linha neutra);

- b) com o valor de  $x$ , através da equação 7 foi calculado o valor de  $z$  (distância entre os centros de gravidade das forças resistentes de tração e compressão);
- c) ao obter  $z$ , através da equação 8 foi calculado o valor do Momento Fletor majorado;
- d) minorando o Momento Fletor e isolando a variável  $q$ , através da equação 5 foi obtido o valor da carga de resistência ( $q$ ) da laje;
- e) com o valor de  $q$ , descontando o valor da carga permanente, através da equação 4 foi obtido o valor da carga variável permitida, avaliando assim os possíveis usos para a edificação através da norma ABNT NBR 6120 (2019);
- f) através das equações 11, 12, 13 e 14 foi realizada a verificação da conformidade quanto à armadura mínima da laje.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios e cálculos realizados, bem como a análise destes valores.

### 4.1 ENSAIO DE PACOMETRIA E ESCARIFICAÇÃO SUPERFICIAL

Através do ensaio de pacometria foi obtido um cobrimento médio de 20 mm, sendo esta medida confirmada na escarificação superficial. É possível visualizar, através da Figura 35, que foi constatada como armadura positiva na laje uma malha de 4,2 mm de diâmetro com espaçamento de 10 cm, totalizando uma área de aço de 1,38 cm<sup>2</sup>/m.

Figura 35 – Medida da bitola com o auxílio do paquímetro



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A laje em estudo não possui armadura negativa. Para fins de verificação do atendimento à norma ABNT NBT 6118 (2014), foi calculada a armadura mínima utilizando as Equações 11, 12, 13 e 14. Foi obtido como armadura mínima o valor de 1,21 cm<sup>2</sup>/m. Desta forma, conclui-se que a armadura utilizada atende o requisito de armadura mínima.

#### 4.2 ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

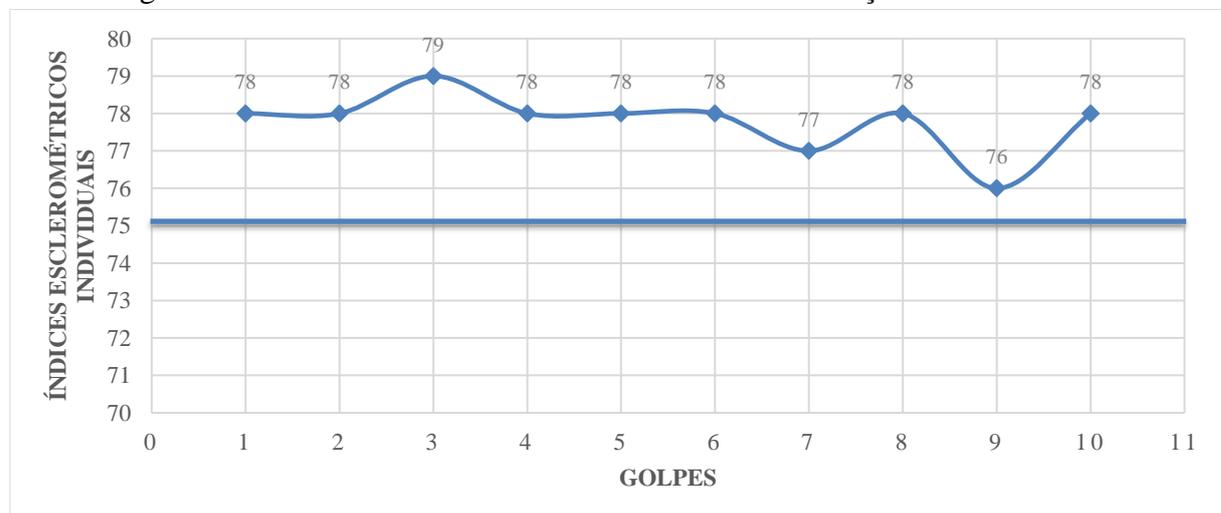
O ensaio de esclerometria, conforme mencionado na seção 2 deste trabalho, fornece como resultado o índice esclerométrico do material, que mede a sua dureza superficial. Inicialmente são demonstrados os valores obtidos pelo processo de calibração do equipamento, realizado conforme diretrizes da norma ABNT NBR 7584 (2012), a fim de obter o coeficiente de correção a ser aplicado nos resultados. O resultado da calibração do equipamento pode ser visualizado na Tabela 1, e através da Figura 36, é possível comparar os resultados obtidos.

Tabela 1 – Calibração do esclerômetro

<b>GOLPES</b>	<b>IE</b>	<b>IE &lt; MED+3</b>	<b>IE &gt; MED-3</b>
<b>1.</b>	78	OK	OK
<b>2.</b>	78	OK	OK
<b>3.</b>	79	OK	OK
<b>4.</b>	78	OK	OK
<b>5.</b>	78	OK	OK
<b>6.</b>	78	OK	OK
<b>7.</b>	77	OK	OK
<b>8.</b>	78	OK	OK
<b>9.</b>	76	OK	OK
<b>10.</b>	78	OK	OK
<b>SOMA</b>		778	
<b>MÉDIA</b>		77,80	
<b>MÉDIA +3</b>		80,80	
<b>MÉDIA -3</b>		74,80	
<b>K</b>		1,03	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 36 – Gráfico dos índices esclerométricos da calibração do esclerômetro



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Através da Tabela 1 é possível avaliar que o coeficiente de correção a ser aplicado é 1,03, desta forma, todos os valores obtidos serão multiplicados por este fator para se obter o valor final do índice esclerométrico. Avaliando a Figura 36, nota-se que todos os valores obtidos dos golpes respeitaram o que indica a norma ABNT NBR 7584 (2012), de não apresentar variação de mais ou menos 3 unidades da média, e de todos os valores serem iguais ou superiores a 75.

Com relação à esclerometria realizada na face inferior da laje, cuja avaliação foi referente ao concreto da pré-laje, os índices esclerométricos obtidos no ensaio estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da esclerometria realizada na face inferior da laje

<b>GOLPES</b>	<b>IEi Área 1</b>	<b>IEi Área 2</b>	<b>IEi Área 3</b>
<b>1.</b>	42	43	42
<b>2.</b>	42	43	47
<b>3.</b>	41	44	42
<b>4.</b>	42	42	43
<b>5.</b>	43	43	44
<b>6.</b>	43	44	43
<b>7.</b>	43	43	42
<b>8.</b>	44	43	44
<b>9.</b>	42	42	44
<b>10.</b>	42	42	41
<b>11.</b>	44	42	43
<b>12.</b>	43	41	43
<b>13.</b>	46	43	44
<b>14.</b>	43	42	43
<b>15.</b>	42	43	44
<b>16.</b>	45	43	43
<b>IE</b>	42,94	42,69	43,25
<b>IE +10%</b>	47,23	46,96	47,57
<b>IE -10%</b>	38,64	38,42	38,92
<b>IE<math>\alpha</math></b>	44,15	43,89	44,47
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	34,50	33,80	34,80

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Onde:

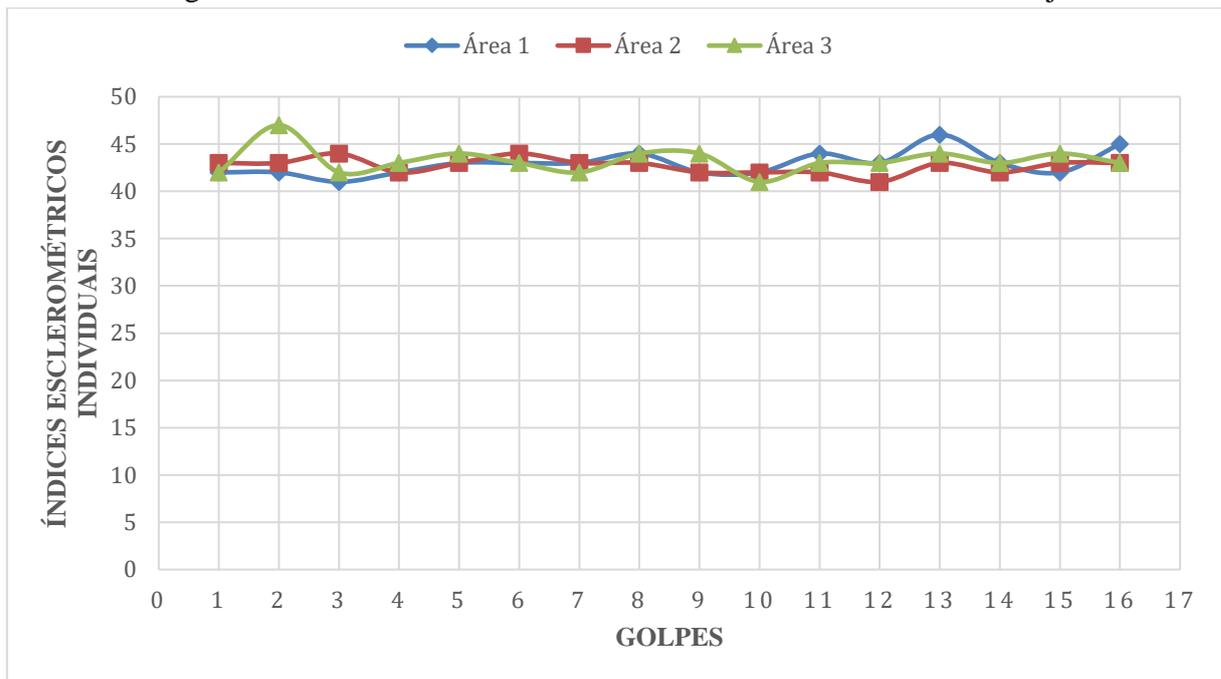
IEi = Índice esclerométrico individual, sem correção;

IE = Índice esclerométrico médio, sem correção;

IE $\alpha$  = Índice esclerométrico efetivo, após a correção.

Com os valores dos índices esclerométricos individuais da Tabela 2, foi elaborado um gráfico, demonstrado na Figura 37, para fins de comparação visual dos valores obtidos.

Figura 37 – Gráfico dos índices esclerométricos da face inferior da laje



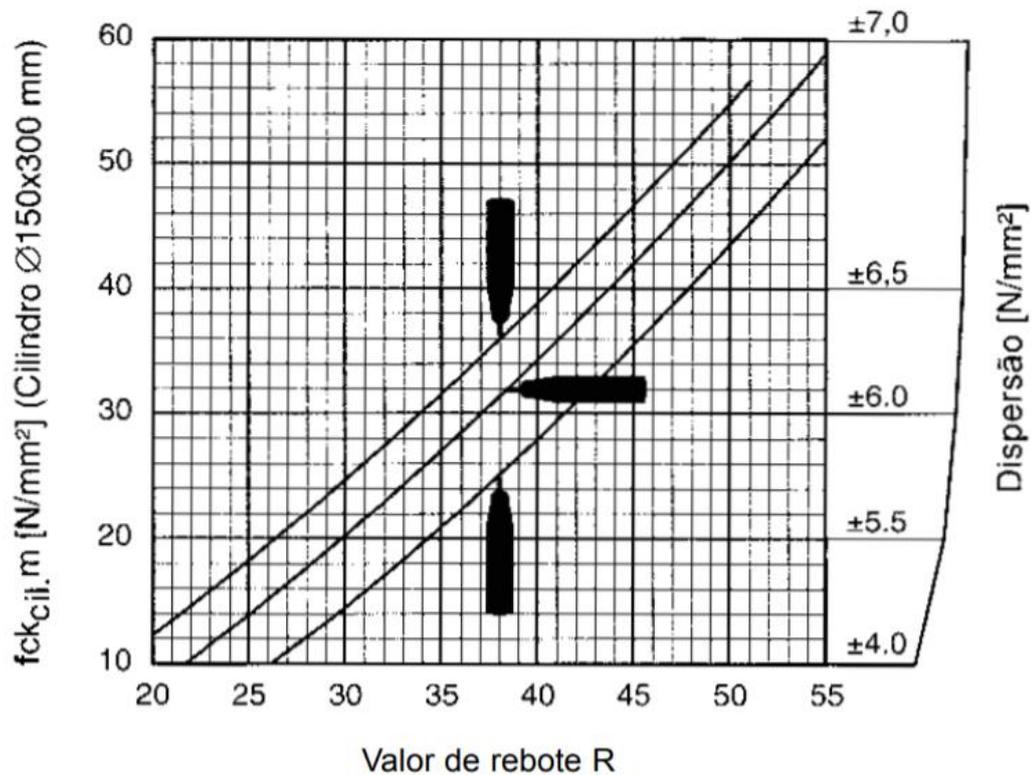
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Avaliando os resultados, nota-se que nenhum dos valores individuais ultrapassou 10% de divergência das médias, sendo assim, nenhum valor foi descartado do cálculo do índice esclerométrico efetivo (IE $\alpha$ ). O valor mais divergente dentre todos foi a segunda medição realizada na área 3, cujo índice esclerométrico individual obtido foi de 47. Considerando os fatores que podem elevar os resultados do ensaio, é possível que abaixo do ponto de aplicação do golpe houvesse um material de maior dureza, como um agregado ou uma armadura. Avaliando o gráfico da Figura 37, é possível destacar que o concreto da pré-laje apresenta uma boa homogeneidade, visto que quase não há discrepâncias nas linhas do gráfico entre os resultados obtidos.

Para obter o valor da resistência à compressão através da correlação com os valores de IE $\alpha$  das três áreas ensaiadas, foi utilizado o ábaco fornecido pelo fabricante, demonstrado na Figura 38. Salienta-se que ao utilizar o ábaco, deve-se verificar qual curva corresponde à posição de aplicação dos golpes realizados no ensaio, visto que esta é uma condição que

interfere nos resultados. Neste caso, a curva utilizada é referente à aplicação dos golpes com o esclerômetro na posição vertical contra a gravidade, ou seja, com a aplicação de baixo para cima. Realizando a correlação, foram obtidos os valores de aproximadamente 34,50 MPa, 33,80 MPa e 34,80 MPa para a resistência à compressão das três áreas ensaiadas da pré-laje.

Figura 38 – Ábaco para correlação do índice esclerométrico com a resistência a compressão do concreto



Fonte: Proceq SA (2017).

Com relação a esclerometria realizada na face superior da laje, foram obtidos os resultados constantes na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da esclerometria realizada na face superior da laje

(continua)

GOLPES	I <sub>Ei</sub> Área 1	I <sub>Ei</sub> Área 2	I <sub>Ei</sub> Área 3
1.	45	48	47
2.	50	42	48
3.	50	46	44
4.	49	45	43
5.	47	44	45
6.	49	46	43
7.	51	50	38
8.	46	48	46

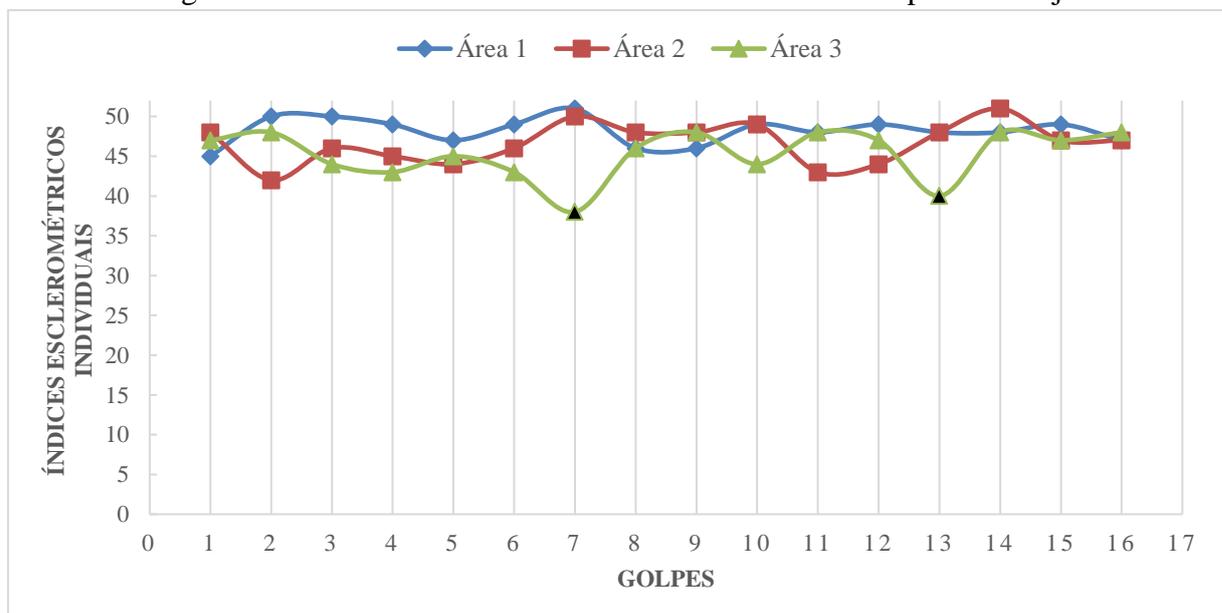
(conclusão)

<b>GOLPES</b>	<b>IEi Área 1</b>	<b>IEi Área 2</b>	<b>IEi Área 3</b>
<b>9.</b>	46	48	48
<b>10.</b>	49	49	44
<b>11.</b>	48	43	48
<b>12.</b>	49	44	47
<b>13.</b>	48	48	40
<b>14.</b>	48	51	48
<b>15.</b>	49	47	47
<b>16.</b>	47	47	48
<b>IE1</b>	48,19	46,62	45,25
<b>IE2</b>	-	-	45,73
<b>IE3</b>	-	-	46,14
<b>IE1 +10%</b>	53,01	51,29	49,77
<b>IE1 -10%</b>	43,37	41,96	40,72
<b>IE2 +10%</b>	-	-	50,31
<b>IE2 -10%</b>	-	-	41,16
<b>IE3 +10%</b>	-	-	50,76
<b>IE3 -10%</b>	-	-	41,53
<b>IE<math>\alpha</math></b>	49,55	47,94	47,45
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	53,80	51,50	50,80

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 3, foi elaborado o gráfico dos resultados, constante na Figura 39.

Figura 39 – Gráfico dos índices esclerométricos da face superior da laje



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Neste ensaio foram descartados dois valores da área 3, sendo eles o sétimo valor descartado no cálculo da primeira média, e o décimo terceiro valor descartado no cálculo da segunda média. No cálculo da terceira média todos os valores ficaram dentro do intervalo, desta forma, o IE $\alpha$  da área 3 foi obtido com 14 valores. Os valores excluídos estão destacados no gráfico com o seu demarcador na cor preta.

Com relação à resistência à compressão obtida por correlação, por ser este ensaio realizado na face superior da laje, a aplicação dos golpes se deu na posição vertical a favor da gravidade, ou seja, de cima para baixo. Assim, foram correlacionados os valores de IE $\alpha$  das três áreas de ensaio com a primeira curva do ábaco da Figura 38, obtendo os valores de aproximadamente 53,80 MPa, 51,50 MPa e 50,80 MPa para a resistência a compressão do concreto na capa da pré-laje.

Além do valor da resistência à compressão obtido por correlação, o intuito deste ensaio foi avaliar a homogeneidade do concreto para a realização do ensaio de extração de testemunhos. Como as extrações foram realizadas na face superior, visto que o concreto inferior não tem função estrutural na região de tração, deve-se analisar a homogeneidade do concreto da capa, e não da pré-laje. Analisando então os resultados obtidos na Tabela 3, e também que apenas dois resultados ultrapassaram os 10% de divergência estipulados pela norma, constata-se que o elemento estrutural possui um concreto homogêneo, resultante de uma execução uniforme e realizada com os cuidados necessários desde a mistura dos componentes na betoneira ou caminhão, até o lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas. Em comparação com os valores obtidos na esclerometria da face inferior, os valores da face superior foram menos homogêneos e possuíram maior variação. Era esperado que os resultados não fossem iguais para os dois concretos, uma vez que foram moldados em locais, formas e em momentos distintos, considerando a metodologia de execução de uma pré-laje com enchimento maciço. É importante reforçar que, devido à esclerometria ser um ensaio que mede as propriedades superficiais do concreto, é passível de variações entre os resultados encontrados, desta forma, não substituindo o ensaio de rompimento por compressão axial.

#### 4.3 EXTRAÇÃO E ROMPIMENTO DE TESTEMUNHOS

Do ensaio de extração e rompimento de testemunhos são obtidos como resultados os dados referentes aos testemunhos extraídos, e a resistência a compressão das amostras. Considerando a boa homogeneidade constatada pelo ensaio de esclerometria, analisando a

tabela da Figura 8, foi determinada a quantidade de dois testemunhos para extração. Os dados referentes aos dois testemunhos extraídos são demonstrados na Tabela 4, onde o primeiro testemunho extraído está identificado como CP01, e o segundo testemunho extraído está identificado como CP02.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de extração e rompimento de testemunhos

<b>Parâmetros</b>	<b>CP01</b>	<b>CP02</b>
Diâmetro 1 (mm)	73,00	72,00
Diâmetro 2 (mm)	75,00	74,00
Diâmetro médio (mm)	72,50	74,50
Altura 1 (mm)	81,00	81,00
Altura 2 (mm)	80,00	81,00
Altura média (mm)	81,00	80,50
Agregado graúdo presente no concreto	Brita zero	Brita zero
Força máxima alcançada no rompimento (Kg)	11410,00	13980,00
Força máxima alcançada no rompimento (N)	111893,88	137096,97
fci, ext, inicial (MPa)	27,10	31,45
Relação h/d	1,12	1,08
Fator Correção <i>k1</i>	-0,11	-0,12
Fator Correção <i>k2</i>	0,09	0,09
Fator Correção <i>k3</i>	0,00	0,00
Fator Correção <i>k4</i>	-0,04	-0,04
fci, ext (MPa)	25,54	29,33
fck, ext, seg (MPa)	27,44	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os testemunhos foram extraídos com uma baixa relação h/d, se comparado à relação ideal ser o mais próximo de 2 possível. Isso se deve ao fato da tipologia de construção da laje, que foi concretada como pré-laje com enchimento maciço. Os testemunhos possuem a altura da capa de enchimento, e não de toda a espessura da laje (que engloba a capa e a pré-laje), devido ao fato de que no momento da extração, em consequência das trepidações e movimentações da broca, o testemunho quebrava sua base na conexão do concreto da capa com o concreto da pré-laje, onde houve a mistura de concreto “velho e novo”. Assim, a altura máxima possível de ser extraída foi a altura da capa de enchimento, totalizando em média 80 mm, e conseqüentemente, a partir do diâmetro de 75 mm, uma relação h/d próxima de 1.

Também é importante salientar que na extração, mesmo realizando a pacometria previamente, ambos os testemunhos foram extraídos com fragmentos de armadura. Devido à alta concentração de armadura identificada na face superior da laje, composta por treliças e armadura de distribuição, ocorreu uma interferência nos resultados da pacometria, onde em certos momentos o equipamento se confundia, não possibilitando o exato posicionamento das

armaduras. No testemunho identificado como CP01 foi extraído um fragmento da armadura de distribuição, e no testemunho CP02 foram dois fragmentos da mesma armadura. Com relação aos fragmentos extraídos, a norma ABNT NBR 7680-1 (2015) orienta que, se possível, sejam retirados por retífica, reduzindo assim a altura do testemunho. Visto que a altura extraída já é a altura mínima para se obter uma relação  $h/d$  maior do que 1, não foi possível realizar a retirada dos fragmentos de armadura dos testemunhos. Porém, considerando que a armadura tende a reduzir o resultado da resistência à compressão se comparado a um testemunho de concreto puro, admite-se que o resultado obtido com a armadura estará a favor da segurança.

A resistência à compressão obtida, após aplicar os coeficientes de correção  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  abordados pela norma ABNT NBR 7680-1 (2015), foi de 27,44 MPa. Não há como comentar sobre o valor obtido visto que não é conhecido o  $f_{ck}$  de projeto. Assim, não se sabe se o local da edificação foi considerado como uma região rural por ser mais deslocada, e consequentemente com uma classe de agressividade I, assim sendo possível utilizar um  $f_{ck}$  de 20 MPa para a estrutura, ou se ela foi considerada urbana com classe de agressividade II, sendo necessário partir de um  $f_{ck}$  de 25 MPa. Visto isso, não há como analisar o valor obtido pois seriam apenas hipóteses, da mesma forma, 27,44 MPa foi o valor da resistência da estrutura obtido no momento atual, sendo este valor utilizado para determinar a carga que a estrutura suporta atualmente.

Comparando os valores obtidos no ensaio de esclerometria, os valores de resistência por compressão axial são bem inferiores, uma vez que o menor valor obtido na correlação do índice esclerométrico da face superior da laje foi de 50,80 MPa. Sabe-se, porém, que o ensaio de esclerometria é vulnerável a interferência nos resultados devido a diversos fatores, além de não possuir precisão na correlação empregada, visto que são utilizadas curvas de concretos com propriedades diferentes do que foi utilizado na obra em questão. Para uma maior confiabilidade, seria necessário elaborar as próprias curvas de correlação, sendo as curvas conforme a posição de aplicação dos golpes, e as propriedades do concreto utilizado. Neste trabalho não se tornou viável elaborar as próprias curvas, desta forma, foram utilizadas as curvas disponíveis no ábaco fornecido pelo fabricante do esclerômetro. Considerando que o ensaio de esclerometria não substitui o ensaio de extração de testemunhos no que se refere a avaliação de segurança estrutural, será utilizado o valor de 27,44 MPa para obtenção da capacidade de carga da laje.

#### 4.4 CAPACIDADE DE CARGA DA LAJE

Com os resultados dos ensaios, foram realizados os cálculos para obtenção da capacidade de carga da laje. Os parâmetros utilizados para os cálculos são demonstrados na Tabela 5, e os resultados obtidos constam na Tabela 6.

Tabela 5 – Parâmetros de cálculo obtidos dos ensaios e inspeções in loco

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura laje	h	12,00	cm
Cobrimento	c	2,00	cm
Menor vão da laje	Lx	2,94	m
Maior vão da laje	Ly	5,34	m
Razão entre o menor e o maior vão da laje	Lx/Ly	0,55	-
Laje armada em cruz	SIM		
Diâmetro Armadura (CA60)	Ø	4,20	mm
Espaçamento malha	e	10,00	cm
Largura da seção transversal	b	1,00	m
Resistência característica do concreto à compressão	fck	2,74	KN/cm <sup>2</sup>
Resistência de cálculo do concreto à compressão	fcd	1,96	KN/cm <sup>2</sup>
Resistência de cálculo do aço à tração	fyd	52,17	KN/cm <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 6 – Resultados dos cálculos para obtenção da capacidade de carga da laje

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Área de aço (lx e ly)	As	1,38	cm <sup>2</sup> /m
Posição da linha neutra	x	0,0054	m
Altura útil	dx	0,0979	m
Braço de alavanca	z	0,0957	m
Momento fletor na direção de Lx - com majoração	Mdx	6,92	KNm/m
Momento fletor na direção de Lx - sem majoração	Mx	4,94	KNm/m
Coef. de Cálculo - Anexo A	k	0,09	-
Carga superficial atuante na laje - Método Linhas de Ruptura	q	6,35	KN/m <sup>2</sup>
Coef. de Cálculo - Anexo A	φ	0,3	-
Momento fletor na direção de Ly - sem majoração	My	0,49	KNm/m
Verificação relação $x/d \leq 0,25$ : OK	x/d	0,055	-

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

De acordo com os cálculos realizados, foi obtido o valor de 6,35 KN/m<sup>2</sup> para a carga suportada pela laje. Nesta, constam as cargas permanentes e as cargas acidentais (variáveis) relacionadas ao uso da estrutura. A presente laje não possui camadas de regularização ou de revestimento, portanto, a carga permanente é composta apenas pelo peso próprio da estrutura de concreto armado. Consultando a norma ABNT NBR 6120 (2019), verifica-se que o peso

específico aparente do concreto armado é de 25 KN/m<sup>3</sup>. Desta forma, para a laje em estudo de 0,12 m de espessura, obtém-se a carga de peso próprio de 3 KN/m<sup>2</sup>, restando 3,35 KN/m<sup>2</sup> de capacidade de carga para ser utilizada como cargas variáveis. Respeitando este valor, ao consultar na norma ABNT NBR 6120 (2019) os valores de carga variável conforme o uso da edificação, verifica-se nesta laje os possíveis usos, descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Possíveis usos conforme a capacidade de carga variável da laje

<b>Local</b>		<b>Carga uniformemente distribuída (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Áreas técnicas	Áreas técnicas em geral	3
	Sala de ventiladores, pressurização, exaustores	3
	Sala de gerador e transformador (com leiaute)	3
Bibliotecas	Sala de leitura (sem estantes)	3
	Sala administrativa	2,5
	Sanitários	2
Escolas, instituições de ensino	Sala de aula	3
	Salas administrativas	2,5
	Dormitórios	2,5
	Cafés, restaurantes	3
	Sanitários, vestiários	2
	Laboratórios	3

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os usos foram elencados conforme a atual localização da edificação, dado que se trata de uma propriedade da Universidade de Caxias do Sul (UCS), foram escolhidos usos compatíveis com atividades de ensino. Porém, caso houvesse a necessidade de se ter outro uso senão relacionado à educação, há outras possibilidades que podem ser verificadas na norma ABNT NBR 6120 (2019).

É importante observar que o peso próprio considerado como carga permanente é apenas da estrutura, e para alguns usos seria necessário incluir um peso próprio para aplicação de revestimento no piso. Na Tabela 8 está identificado se os ambientes, considerando as atividades exercidas no local, necessitam ou não de revestimento no piso.

Tabela 8 – Necessidade de revestimento no piso conforme o uso dos ambientes

(continua)

<b>Local</b>		<b>Necessita de revestimento?</b>
Áreas técnicas	Áreas técnicas em geral	Não
	Sala de ventiladores, pressurização, exaustores	Não

(conclusão)

<b>Local</b>		<b>Necessita de revestimento?</b>
Áreas técnicas	Sala de gerador e transformador (com leiaute)	Não
Bibliotecas	Sala de leitura (sem estantes)	Sim
	Sala administrativa	Sim
	Sanitários	Sim
Escolas, instituições de ensino	Sala de aula	Sim
	Salas administrativas	Sim
	Dormitórios	Sim
	Cafés, restaurantes	Sim
	Sanitários, vestiários	Sim
	Laboratórios	Não

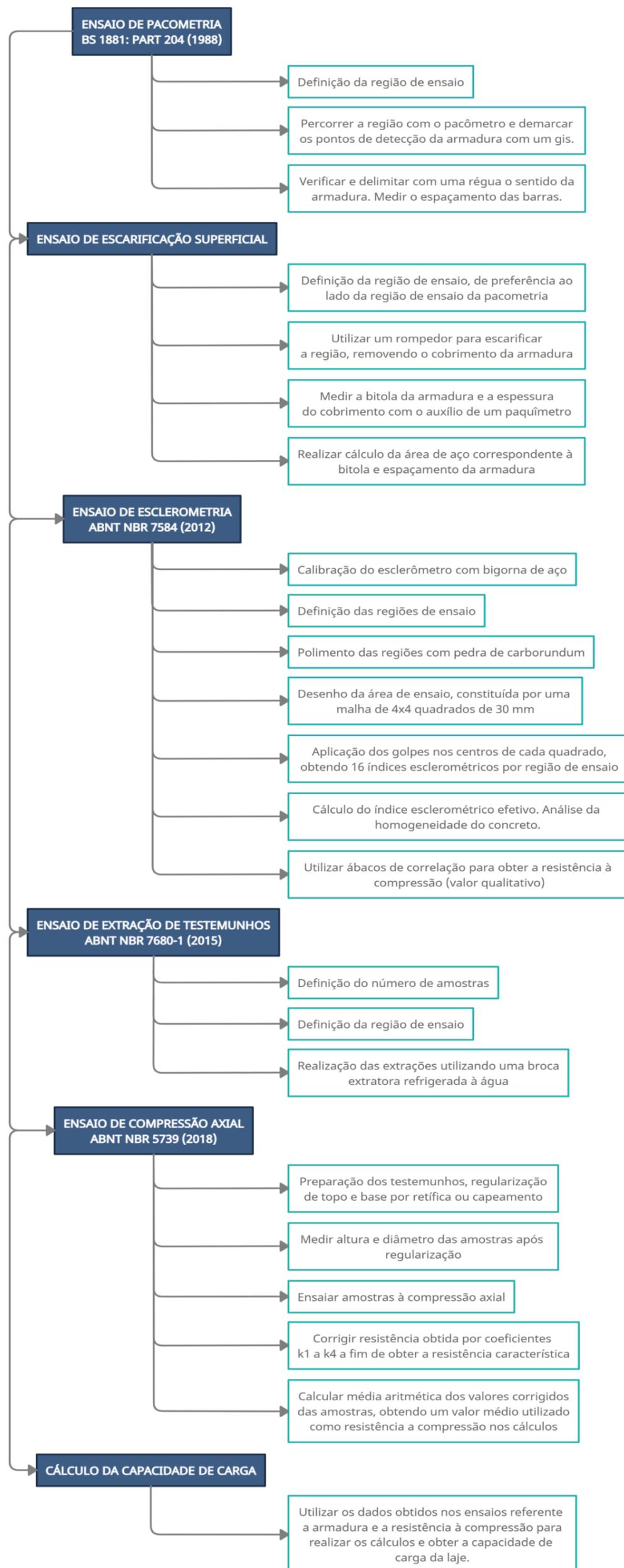
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Ao escolher o ambiente de uso, deve-se atentar para, em casos de ambientes com necessidade de revestimento no piso, acrescer a carga deste revestimento à carga permanente da laje, sendo o restante a carga disponível como carga variável.

#### 4.5 ROTEIRO DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DA LAJE

Por fim, foi elaborado um roteiro com as principais etapas dos ensaios realizados, com o intuito de auxiliar os leitores deste trabalho a identificar facilmente a ordem das atividades a realizar. O fluxograma do roteiro pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 40 - Fluxograma de roteiro de ensaios a realizar para determinar a capacidade de carga de uma laje



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo cujo o objetivo é a determinação da capacidade de carga de uma laje existente sem acesso ao projeto estrutural, foi obtido como resultado final que a laje analisada suporta uma carga de  $6,35 \text{ KN/m}^2$ , sendo  $3 \text{ KN/m}^2$  deste valor destinado ao peso próprio da estrutura, sem aplicação de revestimento. Para esta carga, os possíveis usos relacionados à área da educação são: áreas técnicas, salas de leitura, salas administrativas, sanitários, salas de aula, dormitórios, cafés e restaurantes, vestiários e laboratórios. Para chegar nos resultados obtidos, foram realizados os ensaios de pacometria, esclerometria, extração de testemunhos e rompimento de testemunhos à compressão axial, e através dos resultados obtidos nos ensaios, foi calculada a capacidade de carga da laje.

Na realização deste trabalho diversas dificuldades foram encontradas ao longo do caminho, muitas delas por não conhecer a tipologia de construção do elemento estrutural. Estudos em construções sem histórico da obra tendem a ter as mesmas dificuldades, mas com o auxílio dos ensaios as informações serão levantadas no decorrer do trabalho. Neste estudo, inicialmente as características indicavam que a estrutura era de laje maciça, porém, ao realizar a pacometria na face superior da laje, o pacômetro indicou dados desconexos devido ao excesso de armadura. Para uma laje maciça sem armadura negativa, isso não poderia ocorrer, visto que a única armadura seria a positiva, localizada na face inferior da laje. Devido à complexidade de se obter informações precisas da armadura na face superior, ao extrair os testemunhos foram cortados fragmentos de armadura, onde se identificou que a laje não era maciça, e sim uma pré-laje com enchimento maciço. Após isso, ficou claro que o pacômetro estava se perdendo devido à presença de armadura complementar na face superior, e também da treliça utilizada na pré-laje. Assim, é possível comprovar o que foi citado por diversos autores: a importância de correlacionar diferentes ensaios, onde um complementa o outro. Salienta-se também que, mesmo com alguns imprevistos no decorrer do trabalho, todos os resultados foram considerados a favor da segurança da estrutura.

Os ensaios em geral atenderam as necessidades das informações desejadas, porém, foram importantes alguns procedimentos, sendo necessário realizar algumas ressalvas, como:

- a) para evitar distorção nos resultados obtidos, deve-se sempre utilizar equipamentos aferidos e de qualidade;
- b) realizar os ensaios com técnicos de experiência para operação dos equipamentos e realização dos ensaios;

- c) se a necessidade do estudo for atestar ou verificar a segurança estrutural, nunca substituir o ensaio de esclerometria pela extração de testemunhos para verificação da resistência à compressão;
- d) sempre reparar os danos causados à estrutura, retomando o acabamento original;
- e) em caso de imprevistos na realização dos ensaios que interfiram nos resultados, dar preferência, caso possível, por refazer os ensaios, e caso não haja essa possibilidade, considerar os valores sempre a favor da segurança.

Considerando a situação típica no Brasil de construções realizadas sem projeto estrutural, este trabalho se demonstrou muito útil e eficaz na resolução de problemas envolvendo a capacidade de carga desconhecida de uma laje. Através dos ensaios de pacometria, escarificação superficial, esclerometria, extração e rompimento dos testemunhos, afirma-se que é possível obter resultados seguros para avaliar a capacidade de carga do elemento estrutural, sem causar grandes danos à estrutura.

Este trabalho conclui-se com a apresentação de algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros visando avaliar capacidade de carga de elementos estruturais sem projeto disponível ou devido à necessidade de novos usos:

- a) realização de ensaios sistêmicos de esclerometria para elaboração de curvas de correlação;
- b) inclusão de avaliação das deformações nos elementos em paralelo à determinação de capacidade de carga;
- c) determinação da capacidade de carga de lajes com diferentes tipologias de construção (laje maciça, laje plana, entre outras).

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R-13**: Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. 1 ed. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2013. 86 p.
- ANDRADE, Maria del Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1992. 108 p. Tradução e adaptação: Antonio Carmona e Paulo Helene.
- ARÊDE, Antonio; COSTA, Aníbal. Inspeção e diagnóstico estrutural de construções históricas. **A intervenção no patrimônio. Práticas de conservação e reabilitação**, Porto, v. 1, n. 1, p. 55-88, 01 jan. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 24 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:2019 VERSÃO CORRIGIDA:2019**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015 VERSÃO CORRIGIDA:2016**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1**: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 8 p.
- BATISTA, Pedro Igor Bezerra; SILVA, João Alberto Fernandes da; MACEDO, José Vitor da Silva; MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. Inspeção e recuperação de estruturas de concreto armado: estudo de caso da Escola Politécnica de Pernambuco. In: CONAPESC, 3., 2018, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Conapesc, 2018. p. 1-12.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado em tempo - Vol. 1**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2015. 270 p. 1 v.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881 :PART 204**: Testing concrete Part 204. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. London: BSI, 1988. 13 p.

CAMPOS FILHO, Américo. **Projeto de lajes maciças de concreto armado**. Porto Alegre: UFRGS, 2014. 45 p.

CANDIAN, André Luiz. **Metodologia para avaliação de estruturas de concreto armado degradadas utilizando ensaios dinâmicos**. 2017. 144 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EDUFSCAR, 2014. 424 p.

CASTRO, Elisângela de. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CHIES, Josué Argenta. **Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

CÓIAS, Vitor. **Inspecções e ensaios na reabilitação de edifícios**. 10. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2008. 448 p.

CREMONINI, Ruy Alberto. **Análise de estruturas acabadas: contribuição para a determinação da relação entre as resistências potencial e efetiva do concreto**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro, 2002

FARIAS, Vinícius Pereira; BOLINA, Fabrício Longhi. Dimensionamento Elástico e Plástico de Lajes de Concreto Armado: Uma Análise sob a Perspectiva do Consumo dos Materiais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 10., 2018, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CBPE, 2018. p. 1-10.

FERREIRA, Joana Alexandra de Almeida. **Técnicas de diagnóstico de patologias em edifícios**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2010.

HELENE, Paulo. Análise da resistência à compressão do concreto em estruturas acabadas com vistas à revisão da segurança estrutural. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 64-89, 30 jan. 2011. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i1.7>.

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LORENZI, A.; REGINATO, L.A.; LORENZI, L.S.; SILVA FILHO, L.C.P. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. **Revista de Engenharia Civil Imed**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 3-13, 30 jun. 2016. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A.. <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n1p3-13>.

MACHADO, Mauricio Dornellas. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. 2005. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARTINS, Adriel Shumacher Fernandes da Silveira; MAIA FILHO, Hercilio Macena. Verificação da resistência do concreto *in loco*: métodos de ensaios mais usuais. **Vetor**, Rio Grande, v. 25, n. 2, p. 25-40, jun. 2015.

MAZER, Wellington. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Curitiba: UTFPR, 2008. 158 p.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; CAPRARO, Ana Paula Brandão; RÉUS, Giovana Costa; ESCOBEDO, Marcel Luiz. Resistência a compressão em testemunho de concreto: influência do fator de esbeltez, diâmetro da amostra e método de extração. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 13, n. 1, p. 240-250, 29 mar. 2017. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v13i1.41073>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. ISBN.: 978-85-98576121.

MONTOYA, Pedro Jiménez; MESEGUER, Álvaro García; CABRÉ, Francisco Morán. **Hormigón armado**. 10. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, Sa, 1979. 705 p.

MONTOYA, Pedro Jiménez; MESEGUER, Álvaro García; CABRÉ, Francisco Morán. **Hormigón armado**. 14. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, Sa, 2000. 844 p.

NEVILLE, Adam M. Consideration of durability of concrete structures: past, present, and future: Past, present, and future. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 34, n. 2, p. 114-118, mar. 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02481560>.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2016. 803 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

PADRÃO, José Avelino Loureiro Moreira. **Técnicas de inspeção e diagnóstico em estruturas**. 2004. 556 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2004.

PALACIOS, María del Pilar Guzmán. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto**. 2012. 165 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**: conforme NBR 6118/2014. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 51 p.

PROCEQ. **Profoscope**: instruções de operação. 2014. Disponível em: [https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms/import\\_data/files/Profoscope\\_Operating%20Instructions\\_Portuguese\\_high.pdf](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Profoscope_Operating%20Instructions_Portuguese_high.pdf). Acesso em: 10 maio 2020.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

RINCÓN, I T; CARRUYO, A R; ANDRADE, C; HELENE, Paulo R. L.; DIAS, J. **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado**. Rio de Janeiro: Cytel, 1997. 205 p.

SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **Utilização de métodos não destrutivos e semidestrutivos na avaliação de pontes de concreto**. 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANABLIA, Matheus Barboza; SILVA, Carlos Adriano Rufino da. **Ensaaios não destrutivos em estruturas de concreto**. [s.l.]: -, 2017. 17 p.

SANTOS, Ícaro Mariani Ribeiro dos. **Resistência à compressão de testemunhos extraídos de concreto: efeito do diâmetro, da direção de extração e das classes de resistência**. 2016. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SANTOS, Iris Sterfanie; CRUZ, Lana Laís P. da; ROSÁRIO, Leonardo Medina. Investigação patológica em terminal de integração com estrutura de concreto armado – estudo de caso. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. L.], v. 11, n. 3, p. 218-229, 17 set. 2019.

SANTOS, José Manuel Martins Neto dos. **Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão**. O caso da ponte nossa senhora da guia. 2008. 235 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2008.

SANTOS, S. Pompeu. **A Reabilitação Estrutural do Património Construído**: aspectos básicos. Lisboa: LNEC, 2003. 56 p.

SARAIVA, Victor Alexandre Henrique Silva. **Sistema de recuperação e reforço estrutural de concreto armado**. 2015. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; HELENE, Paulo. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon: Geraldo Cechella Isaia, 2011.

SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; LORENZI, A.; CAMPAGNOLO, J. L.; STRIEDER, A. J.; QUININO, U. C. de M.; CAETANO, L. F.. Estudos de caso sobre avaliação de estruturas

de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 1, n. 3, p. 186-198, 30 set. 2011. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i3.14>.

VEIGA, Maria do Rosário; SILVA, António Santos; CARVALHO, Fernanda; AGUIAR, José. **Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos**. 4. ed. Lisboa: LNEC, 2004. 138 p.

VIEIRA FILHO, José Orlando. **Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos de broqueamento**. 2007. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

## ANEXO A – TABELA 9

Tabela 9 – Valores de  $k$  e  $\varphi$  para cálculo do momento fletor em lajes retangulares armadas em cruz

$l_x / l_y$	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\varphi$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Tipo de Lajes	Valores de $k$												
	0,099	0,096	0,093	0,090	0,078	0,075	0,072	0,069	0,051	0,049	0,046	0,044	0,042
	0,094	0,090	0,087	0,084	0,070	0,067	0,064	0,061	0,043	0,041	0,038	0,036	0,034
	0,071	0,069	0,067	0,065	0,068	0,056	0,054	0,053	0,041	0,039	0,037	0,036	0,034
	0,089	0,085	0,081	0,078	0,064	0,060	0,057	0,054	0,037	0,034	0,032	0,030	0,028
	0,053	0,052	0,051	0,050	0,048	0,044	0,042	0,041	0,033	0,032	0,031	0,029	0,028
	0,068	0,066	0,064	0,062	0,053	0,051	0,049	0,047	0,035	0,033	0,032	0,030	0,029
	0,065	0,062	0,060	0,058	0,049	0,047	0,045	0,043	0,030	0,029	0,027	0,025	0,024
	0,051	0,050	0,049	0,047	0,042	0,040	0,039	0,038	0,029	0,028	0,027	0,025	0,024
	0,049	0,048	0,046	0,045	0,039	0,037	0,036	0,035	0,026	0,024	0,023	0,022	0,021

Fonte: Adaptado de Montoya (1979)