

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Investigação de uma Técnica Alternativa para Monitoramento de
Deformações em Estruturas de Concreto Armado**

Fernanda Petry Pes

Porto Alegre
2022

Fernanda Petry Pes

**INVESTIGAÇÃO DE UMA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA
MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Pes, Fernanda Petry
Investigação de uma técnica alternativa para
monitoramento de deformações em estruturas de concreto
armado / Fernanda Petry Pes. -- 2022.

106 f.

Orientador: Marcelo Maia Rocha.

Coorientador: Paula Manica Lazzari.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. instrumentação. 2. baixo custo. 3. deformações.
4. concreto armado. I. Rocha, Marcelo Maia, orient.
II. Lazzari, Paula Manica, coorient. III. Título.

FERNANDA PETRY PES

**INVESTIGAÇÃO DE UMA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA
MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2022

Prof. Marcelo Maia Rocha	Prof ^a . Paula Manica Lazzari
Dr. Techn. pela Universität Innsbruck	Dr ^a . pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador	Co-orientadora

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Inácio Benvegnú Morsch (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha e Profa. Dra. Paula Manica Lazzari, pelo auxílio na elaboração deste trabalho, pela paciência e disponibilidade.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), especialmente aos professores, pelo ensino de excelência e pela dedicação em prol do aprendizado.

Ao LEME, Laboratório de Ensinos e Métodos Experimentais, e aos seus responsáveis, pelo auxílio prestado durante a minha pesquisa.

Aos colegas, Adriano, Daniel, Lucas, Luiz Henrique e Tobias, pela ajuda na execução do programa experimental.

Agradeço aos meus pais, José e Beatriz, pelo apoio incondicional e todos os ensinamentos passados. Ao meu irmão, Leonardo, pelo companheirismo.

Ao Gustavo, pelo incentivo, apoio e compreensão.

Ao Carlos Eduardo, Charles, Guilherme, Henrique, Maurício e Thiago, por todos os conhecimentos transmitidos e ajuda prestada.

A Renata e ao Gabriel, pela confiança e apoio ao longo deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a concretização desta pesquisa.

A experiência é um troféu composto por todas as armas
que nos feriram.

Marco Aurélio

RESUMO

PES, F.P. **Investigação de Uma Técnica Alternativa Para Monitoramento de Deformações em Estruturas de Concreto Armado.** 2022. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Na construção civil, as variações nas propriedades dos materiais juntamente com as diferentes técnicas construtivas e condições do ambiente, podem não ser totalmente consideradas no cálculo estrutural e ocasionar danos nas estruturas. O Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE) possibilita acompanhar o comportamento estrutural, avaliar as condições da estrutura e inclusive investigar o acontecimento de danos e das possíveis necessidades de intervenções. No entanto, o MIE ainda é pouco implementado devido ao alto custo de instalação e complexidade de operação. Desta forma, o presente trabalho busca desenvolver sistemas de medição de deformações em estruturas de concreto armado através de extensômetros, amplificadores, conversores de sinais e de microprocessadores de baixo custo. Assim, foram construídos dois sistemas de aquisição de dados de baixo custo e relativa facilidade de operação. O sistema de medição I, apresenta uma estrutura simples, baseada no módulo conversor e amplificador HX711. O sistema de medição II é composto por mais componentes eletrônicos, como o amplificador AD620 e o conversor ADS1115. Ainda, para facilitar a instalação de extensômetros em campo, foi desenvolvida uma placa de aço com extensômetros fixados, formando uma ponte de *Wheatstone*. Para avaliar os sistemas, foram realizados ensaios de compressão em um pilar, ensaios de flexão à quatro pontos em vigas, além do monitoramento de pilares de duas edificações residenciais em fase construtiva. Através da elaboração deste estudo, encontraram-se resultados favoráveis à utilização dos sistemas propostos, obtendo-se as deformações das estruturas de concreto armado. Contudo, o sistema de medição II mostrou-se mais eficiente em comparação com o sistema de medição I.

Palavras-chave: *instrumentação; baixo custo; deformações; concreto armado.*

ABSTRACT

PES, F.P. **Investigation of an alternative technique for monitoring deformations in reinforced concrete structures.** 2022. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Variations in material properties along with different construction techniques and environmental conditions may not be fully considered in the structural calculation and cause damage to structures in civil construction. The Structural Health Monitoring (SHM) makes it possible to monitor the structural behavior, assess the structure conditions and even investigate the occurrence of damage and possible intervention needs. However, SHM is still little implemented due to the high cost of installation and operation complexity. In this way, this paper aims to develop systems for measuring deformations in reinforced concrete structures through strain gauges, amplifiers, signal converters and low-cost microprocessors. In this way, two low-cost and relatively easy-to-operate data acquisition systems were built. Measurement system I presents a simple structure, based on the HX711 converter and amplifier module. The measurement system II consists in more electronic components such as the AD620 amplifier and the ADS1115 converter. Also, to facilitate the installation of strain gauges in the field, a steel plate was developed with strain gauges attached, forming a Wheatstone bridge. In order to evaluate the systems, compression tests were carried out on a column, four-point bending tests on beams, in addition to monitoring columns of two residential buildings in the construction step. Favorable results were found for the use of the proposed systems, obtaining the deformations of the reinforced concrete structures in this study. However, measurement system II proved to be more efficient compared to measurement system I.

Key-words: *instrumentation; low cost; deformations; reinforced concrete.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	10
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 DELINEAMENTO	11
2 DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	
ARMADO	13
2.1 TENSÃO E DEFORMAÇÃO	13
2.2 MOMENTO CURVATURA E NÃO LINEARIDADE FÍSICA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES	16
3 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES NÃO LINEARES	22
3.1 MONITORAMENTO ESTRUTURAL	22
3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO	25
3.2.1 Sensores de deformação	26
3.2.1.1 Extensômetros uniaxiais	28
3.2.1.2 Extensômetros tipo roseta dupla	28
3.2.1.3 Ponte de <i>Wheatstone</i>	29
3.2.2 Condicionamento e conversão do sinal	30
3.2.2.1 Amplificador e conversor HX711	31
3.2.2.2 Amplificadores de instrumentação AD620 e INA118	32
3.2.2.3 Conversor ads1115	33
3.2.2.4 Arduino	33
3.2.3 Calibração	34

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
4.1 DESENVOLVIMENTO DA PLACA COM EXTENSÔMETROS ..	36
4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO I.....	38
4.2.1 Método de calibração	40
4.2.2 Fixação das placas em uma edificação residencial.....	44
4.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO II.....	47
4.3.1 Calibração comparativa.....	50
4.3.1.1 Características dos materiais	53
4.3.1.2 Metodologia de instrumentação.....	55
4.3.2 Fixação das placas em uma edificação residencial.....	59
4.4 CUSTOS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 ENSAIO COM A PLACA COM EXTENSÔMETROS	66
5.2 TESTES COM O SISTEMA DE MEDIÇÃO I.....	67
5.2.1 Deformações do pilar no laboratório.....	67
5.2.2 Testes no edifício residencial I	69
5.3 TESTES COM O SISTEMA DE MEDIÇÃO II	72
5.3.1 Deformações das vigas de concreto armado	72
5.3.2 Deformações dos pilares do edifício residencial II.....	84
6 CONCLUSÃO	88
6.1 TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A – CÓDIGO SISTEMA DE MEDIÇÃO I	94

APÊNDICE B – CÓDIGO SISTEMA DE MEDIÇÃO II..... 95

**ANPÊNDICE C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS
EXTENSÔMETROS UTILIZADOS 96**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo das etapas do trabalho	12
Figura 2 - Diagrama tensão x deformação	15
Figura 3 - Diagrama tensão x deformação do concreto comprimido	15
Figura 4 - Diagrama tensão x deformação para aços de armadura passiva	16
Figura 5 - Diagrama momento-curvatura da seção submetida à flexão simples.....	17
Figura 6 – Elemento de viga: (a) viga bi-apoiada; (b) e raio de uma seção transversal	18
Figura 7 – Esquema típico de um sistema de monitoramento computadorizado	26
Figura 8 - Extensômetro de resistência elétrica uniaxial	28
Figura 9 - Extensômetro de resistência elétrica tipo roseta dupla	28
Figura 10 - Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros ativos.....	29
Figura 11 – Módulo conversor amplificador HX711	31
Figura 12 – Módulo amplificador AD620	32
Figura 13 – Conversor ADS1115	33
Figura 14 – Arduino UNO	33
Figura 15 – Exemplo de curva de calibração	34
Figura 16 – Fluxograma da matriz experimental	35
Figura 17 - Ponte de Wheatstone adotada para a placa	36
Figura 18 - Instalação dos extensômetros na placa de aço: (a) colagem dos extensômetros na superfície lixada; (b) cabos soldados aos extensômetros; (c) inserção dos conectores.	37
Figura 19 – Placa com extensômetros	37
Figura 20 - Placa com extensômetros.....	38
Figura 21 - Esquemático do sistema de medição I.....	39
Figura 22 – Sistema de medição I: (a) Placa com extensômetros e parte interna do dispositivo de leitura I; (b) Placa com extensômetros conectada ao dispositivo de leitura I.....	39

Figura 23 - Ensaio de resistência à compressão do CP	40
Figura 24 – Pilar com a placa fixada: (a) posição da placa no pilar (b) fixação da placa nas linhas de referência	41
Figura 25 – Pilar com sensores (a) Instalação dos extensômetros (b) Instalação das cantoneiras	42
Figura 26 - Pilar com sensores fixados.....	42
Figura 27 - Pilar com sensores ligados ao sistema de leitura <i>QuantumX</i> MX840B ...	43
Figura 28 - Placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leitura I	44
Figura 29 - Marcação dos pilares selecionados: (a) planta baixa (em cm); (b) corte esquemático (em m).....	45
Figura 30 - Placas fixadas nos pilares (a) P2, P4 e P6; (b) P1 e P3; (c) P8; (d) Dispositivo de leitura conectado à placa	46
Figura 31 - Esquemático do sistema de medição II.....	47
Figura 32 – Módulo amplificador AD620 adaptado junto ao conversor ADS1115 ...	48
Figura 33 – Dispositivo de leituras II	49
Figura 34 – Cadeia de medição teórica do sistema de medição II	50
Figura 35 – Armaduras das vigas de concreto armado.....	51
Figura 36 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U (vigas VA): (a) representação do reforço na viga (b) reforço na extremidade da viga (c) viga finalizada.....	51
Figura 37 – Vigas com ancoragem nas extremidades do tipo ranhura EBRIG (vigas VD): (a) representação do reforço na viga (b) dimensões do reforço (c) execução do reforço	52
Figura 38 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U e ranhura EBRIG (vigas VDA).....	52
Figura 39 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U e ranhura EBRIG (vigas VDA): (a) representação do reforço na viga (b) execução do reforço (c) reforço finalizado	53
Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão do CP: (a) CP posicionado na prensa; (b) CP rompido	54
Figura 41 - Ensaio de modulo de elasticidade	54

Figura 42 - Instalação dos extensômetros de concreto na viga: (a) superfície lixada e com cola plástica aplicada; (b) colagem do extensômetro; (c) cabos posicionados para soldagem	55
Figura 43 - Placa com extensômetros fixada na viga	56
Figura 44 – Desnível entre a superfície de concreto e a placa	56
Figura 45 – Terço central da viga com sensores fixados	57
Figura 46 – Localização dos sensores fixados na viga	57
Figura 47 – Ensaio das vigas (a) viga com sensores fixados; (b) viga com a placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leituras; (c) ensaio de flexão da viga VDA1.	58
Figura 48 – Modelo 3D com marcação dos pilares instrumentados (a) estrutura modelada até o terceiro pavimento (b) estrutura modelada até a cobertura	60
Figura 49 - Marcação dos pilares selecionados em planta baixa (dados em cm).....	61
Figura 50 – Momentos e altura das placas nos pilares (a) P26 e (b) P31	62
Figura 51 – Placas fixadas nos pilares do edifício residencial (a) placas fixadas nos dois pilares (b) placas protegidas; (c) placa fixada; (d) dispositivo de leitura conectado à placa.....	63
Figura 52 - Pilar com sensores ligados ao sistema de leitura <i>QuantumX</i> MX840B ...	66
Figura 53 - Gráfico carga x deformação do pilar - <i>QuantumX</i> MX840B.....	67
Figura 54 - Placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leitura I	68
Figura 55 - Gráfico carga x deformação do pilar (Ensaio 2)	68
Figura 56 - Curva de calibração do sistema de medição I	69
Figura 57 – Edifício residencial do sistema de medição I	70
Figura 58 – Gráfico deformação x tempo do pilar P2	70
Figura 59 – Gráfico deformação x tempo do pilar P3	71
Figura 60 – Gráfico deformação x tempo do pilar P6	71
Figura 61 – Gráfico deformação x tempo do pilar P8	71
Figura 62 – Ensaio de flexão à quatro pontos nas vigas (a) VT2 antes do ensaio (b) VT2 rompida	72
Figura 63 – Gráfico momento x deformação da viga VT1	74
Figura 64 – Gráfico momento x deformação da viga VT2	74

Figura 65 – Gráfico momento x deformação da viga VA1	75
Figura 66 – Gráfico momento x deformação da viga VA2	75
Figura 67 – Gráfico momento x deformação da viga VD1	76
Figura 68 – Gráfico momento x deformação da viga VD2	76
Figura 69 – Gráfico momento x deformação da viga VDA1	77
Figura 70 – Gráfico momento x deformação da viga VDA2.....	77
Figura 71 – Gráfico momento x deformação da viga VDB1	78
Figura 72 – Gráfico momento x deformação da viga VDB2.....	78
Figura 73 – Gráfico momento x deformação da viga VT1 com modelo analítico.....	79
Figura 74 – Gráfico momento x deformação da viga VT2 com modelo analítico.....	80
Figura 75 – Curvas de calibração das vigas	81
Figura 76 – Gráfico momento-deformação das vigas	81
Figura 77 – Curvas de calibração conforme funções lineares.....	82
Figura 78 – Curva de calibração (menor, média e maior)	83
Figura 79 – Gráfico tensão-deformação dos ensaios com as vigas e pilar	83
Figura 80 – Edifício residencial do sistema de medição II	84
Figura 81 – Gráfico deformação x tempo do pilar P31	86
Figura 82 – Gráfico deformação x tempo do pilar P26	86
Figura 83 – Gráfico deformação x tempo do pilar P31 ajustado	87
Figura 84 – Gráfico deformação x tempo do pilar P26 ajustado	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de custos da placa com extensômetros	64
Tabela 2 – Relação de custos do dispositivo de leitura I	64
Tabela 3 – Relação de custos do dispositivo de leitura II	65
Tabela 4 – Resultados dos ensaios com as vigas	73
Tabela 5 – Cargas e Deformações do pilar P31	85
Tabela 6 – Cargas e Deformações do pilar P26	85

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

b	Largura da seção transversal
d	Altura útil da armadura de tração
d'	Altura útil da armadura de compressão
l	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
x_{II}	Posição da linha neutra na seção no Estádio II
y	Distância do centro de gravidade até a fibra mais comprida/tracionada
y_t	Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada da seção transversal

LETRAS MAIÚSCULAS

A'_s	Armadura de compressão
A_s	Armadura de tração
E	Módulo de elasticidade
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_s	Módulo de deformação do aço
F	Força
G	Ganho do amplificador
I	Momento de inércia
I_c	Momento de inércia da seção bruta
I_{II}	Momento de inércia da seção fissurada do concreto no Estádio II
K	Fator do extensômetro (<i>gauge factor</i>)
LSB	<i>Least significant bit</i>
M	Momento fletor

M_r	Momento de fissuração
M_a	Momento fletor da seção crítica
R	Resistência elétrica
ΔR	Variação da resistência
S1	Fator topográfico
S2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e de sua altura sobre o terreno
S3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
V_{in}	Tensão de entrada
V_{out}	Tensão de saída
V_o	Velocidade básica do vento

LETRAS GREGAS

α	Fator de correlação de resistência à tração na flexão com resistência à tração direta
ε	Deformação específica
ε_1	Deformação longitudinal
ε_2	Deformação transversal
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração direta do concreto
f_{cm}	Resistência média de compressão do concreto
l	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
ρ	Raio de curvatura
σ	Tensão mecânica;
ν	Coefficiente de Poisson

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo recurso mais consumido no mundo, sendo altamente dominado e bem aproveitado, tanto por projetistas, construtores, empregados da engenharia civil, quanto por outros interventores do processo. Essa enorme aceitação do concreto e a crescente utilização do mesmo no Brasil é referente à diversos aspectos, como a abundância de seus materiais constituintes, a facilidade de aplicação do material, que é capaz de moldar-se a qualquer forma, e também ao seu custo-benefício (ANDRADE, 2005). A partir dos artifícios da engenharia e com o avanço da tecnologia do concreto, tornou-se possível construir edifícios com estruturas cada vez mais esbeltas e ousadas (TORRICO, 2010). No entanto, devido às variações que podem ocorrer nas propriedades do concreto, as quais dependem de diversas condições; tais como: técnicas construtivas, natureza e proporções dos constituintes, condições de carregamento e do meio ambiente; torna-se relevante o desenvolvimento de métodos para verificar o desempenho dos elementos de concreto (LORENZI; CAMPAGNOLO; SILVA FILHO; 2006).

No cálculo estrutural, costuma-se considerar uma estrutura com apoios indeslocáveis e com cargas distribuídas de forma regular. Essa situação pode não ser a mais realista, pois recalques diferenciais nas fundações e fissuras na estrutura podem modificar o arranjo adotado, tanto para os esforços nos pilares, quanto para a geometria. Efeitos construtivos, inusitados ou difíceis de simular são condições que estimulam diferentes configurações para os esforços das estruturas. Quanto mais alto for um edifício, esses efeitos tornam-se ainda mais significativos e proporcional será o aumento de esforços nos primeiros pavimentos. Assim, para o entendimento do real comportamento estrutural e para o controle de qualidade, torna-se importante o monitoramento estrutural. Em outros países, têm-se obtido benefícios no controle de recalques diferenciais, vibrações e na correção de imperfeições geométricas em estágios iniciais da construção, através do monitoramento de pontes e viadutos (NAHUM; OLIVEIRA; 2010).

Para avaliar o comportamento de estruturas existentes e em fase de construção, verificar os resultados dos modelos analíticos e numéricos adotados no dimensionamento de estruturas, investigar a existência de danos ou deteriorações, pode-se empregar o Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE). O MIE consiste em desenvolver sistemas de aquisição de dados,

qualificados para adquirir, tratar e processar os sinais dos sensores fixados em estruturas e apresentar uma resposta confiável quanto ao comportamento estrutural (SANTOS, 2014). Contudo, ainda é pouco implementado em obras de construção civil devido ao alto custo associado à instalação do sistema e complexidade de operação (GALANTE; GARCIA, 2014).

Através do MIE, Ye et al (2012) monitoraram as tensões na base em balanço de um edifício de 245 m de altura localizado na China. Osman e Malak (2017) avaliaram o comportamento da torre do relógio Makkah durante o período de construção e serviço, obtendo deformações através de sensores. Glisic et al (2013) observaram recalques diferenciais através de um monitoramento de dez anos em um edifício alto em Singapura. Gao et al (2020), realizaram o monitoramento das deformações de um edifício de 335 m de altura e a simulação do processo de construção através do método de elementos finitos.

Considerando a importância do desenvolvimento de soluções de baixo custo e com relativa facilidade de implementação e utilização, que permitam avaliar o comportamento das estruturas durante as etapas construtivas e de uso, o presente trabalho consiste na investigação de uma técnica alternativa para o monitoramento de deformações em estruturas de concreto armado. Assim, através de dois sistemas de medição desenvolvidos, foram medidas deformações em vigas e pilares de concreto armado.

1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A partir do monitoramento das edificações, é possível avaliar e obter um melhor entendimento do comportamento das estruturas de concreto, pois pode-se medir as deformações e transformá-las em cargas variáveis e permanentes da estrutura, comparando-as com premissas de projetos seguidas conforme o preconizado pelas normas brasileiras. Assim, torna-se relevante determinar as propriedades da estrutura real, a partir da análise experimental e comparar com os valores do modelo numérico, fazendo-se uma validação dos resultados e métodos utilizados. Ainda, considerando a importância da análise faseada em edifícios altos, onde avalia-se o encurtamento dos pilares durante a fase construtiva, o monitoramento de estruturas pode contribuir para o refinamento dos modelos numéricos. Além disso, se considerar que para o dimensionamento de pilares, existem diversas hipóteses de difícil verificação e alto grau de imprecisão, torna-se ainda mais relevante esta análise.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um sistema de baixo custo para o monitoramento de deformações em estruturas de concreto armado.

Os objetivos específicos podem ser descritos como:

- a) testar sensibilidade, viabilidade e aplicabilidade de equipamentos de baixo custo que possam ser perdidos em obra;
- b) obter as deformações de pilares e vigas através de ensaios laboratoriais;
- c) realizar um acompanhamento experimental junto com um modelo numérico em busca de monitorar as deformações dos pilares de um edifício residencial durante o período de construção.

1.3 DELINEAMENTO

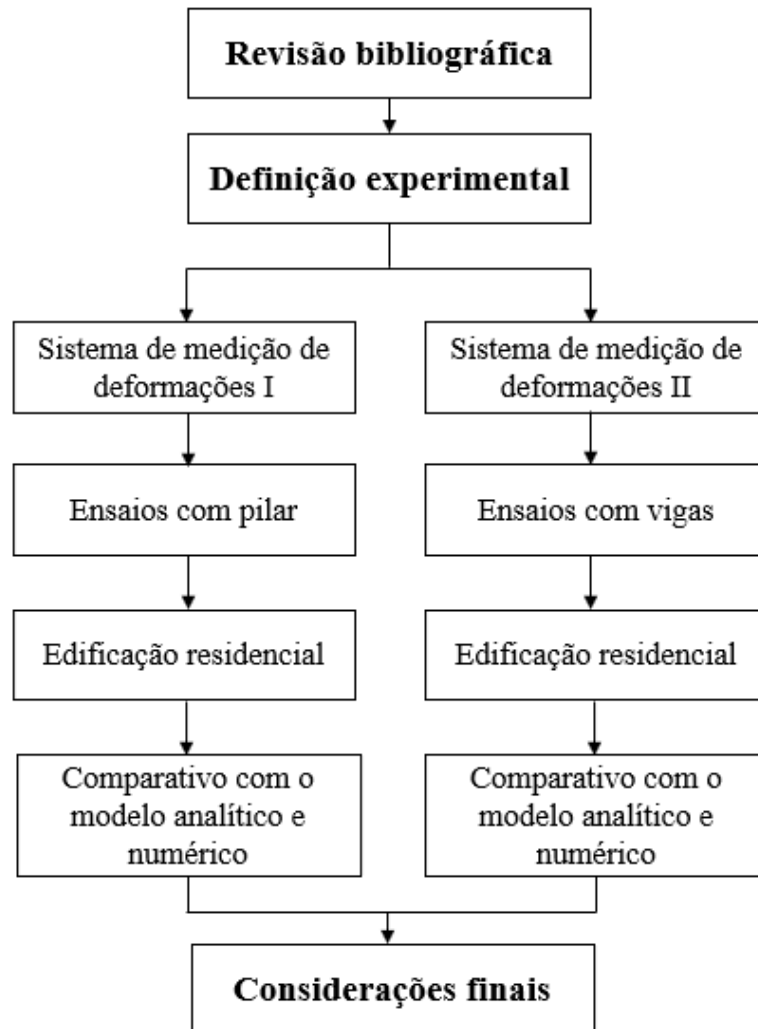
O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, os quais englobam as etapas apresentadas no organograma da Figura 1. O primeiro capítulo encarrega-se de introduzir o tema, justificar a realização do estudo e os principais objetivos.

O capítulo 2 e 3 apresentam a revisão bibliográfica sobre concreto armado e sistemas de medição. No capítulo 2 foram abordados conceitos de deformações no concreto armado adotados para a realização da pesquisa. Já no capítulo 3 aborda-se conceitos de monitoramento estrutural e sua abrangência, além de etapas e componentes eletrônicos de sistemas de aquisição de dados de deformações. O capítulo 4 é composto pela metodologia experimental do estudo, na qual foram desenvolvidos dois sistemas de medição de deformações, ensaios laboratoriais e monitoramento de dois edifícios residenciais em construção.

O capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos para o sistema de medição I e o sistema de medição II. Ao final, foram comparados os resultados analíticos com os resultados experimentais.

O capítulo 6 consiste nas principais conclusões do trabalho e são realizadas sugestões para trabalhos futuros.

Figura 1 - Esquema ilustrativo das etapas do trabalho



(Fonte: AUTORA, 2022)

2 DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Segundo Montoya et al. (1973, p. 102), o concreto pode ser caracterizado como um pseudo sólido que possui o comportamento composto de três modos reológicos básicos: elástico, plástico e viscoso. Ainda, observa-se que apesar da inexistência de carga, o concreto tende a aumentar a resistência e reduzir de volume. Essas características do material estão relacionadas a sua complexidade heterogênea que coexistem as fases sólida (cimento e agregado), líquida (água) e gasosa (ar aprisionado) cujas reações químicas influenciadas pela propagação de água na parte interna do elemento, temperatura e troca de água com o ambiente ocorrem ao longo do tempo.

Neste capítulo, apresentam-se alguns conceitos sobre deformações no concreto armado, especialmente os relacionados com o tema deste trabalho, partindo de tensão, deformação, momento curvatura e não linearidade física em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples.

2.1 TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Uma estrutura é considerada deformada quando sofre mudanças nas suas dimensões, decorrentes de agentes diretos, como tráfego e vento, ou indiretos, como fissuras e mudanças de temperatura. Através da variação do comprimento e o comprimento inicial do elemento, tem-se a deformação, conforme a Equação 1:

$$\varepsilon = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (1)$$

Onde:

ε = Deformação específica;

l_0 = comprimento inicial;

l = comprimento final.

A deformação axial está relacionada ao estado interno de compressão ou tração de um material, resultado de um carregamento sofrido em um ponto. As deformações elásticas lineares podem ser analisadas através do módulo de elasticidade dos materiais constituintes do concreto armado, que através de ensaios experimentais avalia a deformabilidade do material. Por meio desses ensaios, são obtidos os diagramas tensão-deformação do concreto ou do aço. Assim, quando um carregamento uniaxial de compressão é aplicado a um corpo de prova de concreto, através da sua área e a força aplicada, determina-se a tensão que o concreto foi solicitado, conforme a Equação 2 (HIBBELER, 2006).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ = Tensão mecânica;

F = Força;

A = Área.

Em 1678, Robert Hooke definiu a relação existente entre tensões e deformações de corpos submetidos a esforços mecânicos. Para deformações elásticas, as tensões de um determinado corpo de prova podem ser obtidas através da Lei de Hooke, conforme a Equação 3.

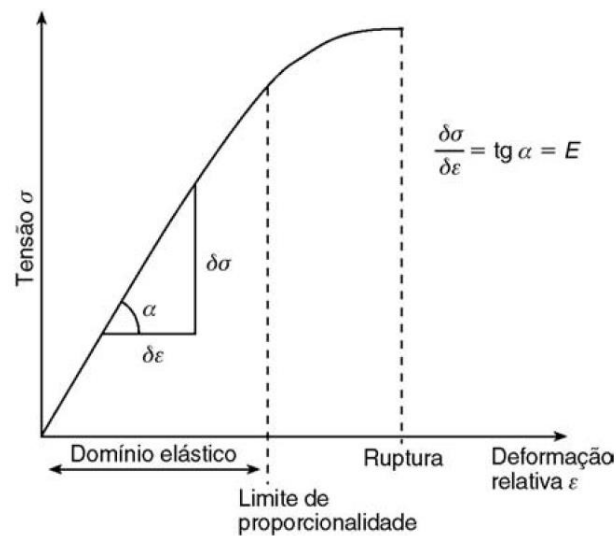
$$\sigma = E \varepsilon \quad (3)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade.

Assim, o comportamento linear do material é representado através de uma reta no diagrama tensão-deformação, onde o aumento de tensões é proporcional ao aumento de deformações. Na Figura 2, pode ser observado um diagrama típico tensão-deformação (BALBINOT; BRUSAMARELLO; 2011).

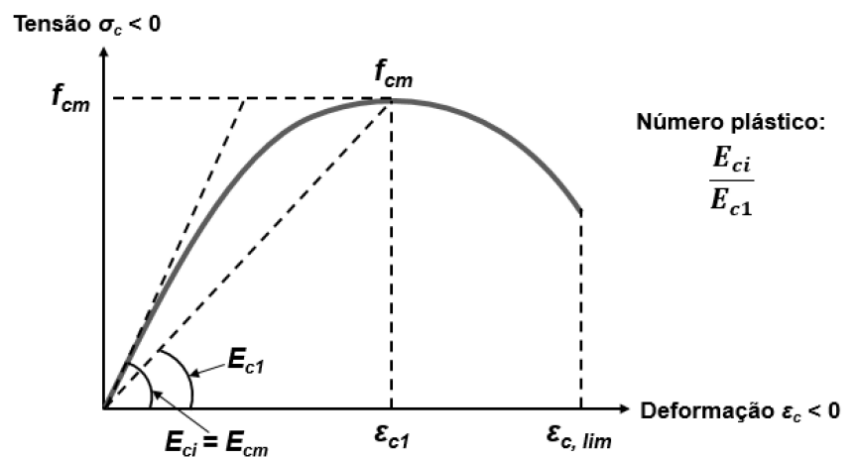
Figura 2 - Diagrama tensão x deformação



(Fonte: BALBINOT; BRUSMARELLO 2011)

Conforme a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), para tensões de compressão menores que metade da resistência à compressão do concreto, pode-se admitir uma relação linear entre tensões e deformações. A partir disso, o concreto apresenta um comportamento não-linear, devido ao aumento de tensão não manter uma proporcionalidade de deformação ao longo do carregamento. Na Figura 3, encontra-se o gráfico tensão-deformação do concreto comprimido, proposto pelo Código Modelo da *fib* 2010 (2012).

Figura 3 - Diagrama tensão x deformação do concreto comprimido



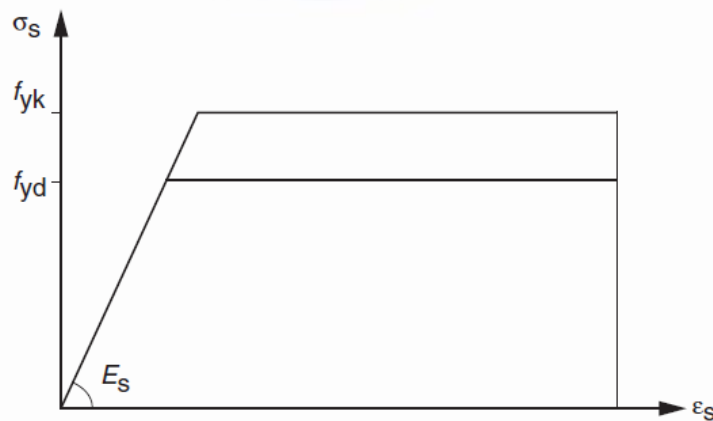
(Fonte: CÓDIGO MODELO DA FIB 2010, 2012, apud LAZZARI, 2016)

O concreto apresenta naturalmente um comportamento singular e heterogêneo, em razão de ser um material composto por água, cimento e agregados. Assim, em conjunto com o aço, torna-se altamente complexo devido a interação entre esses materiais. O concreto é um material frágil, devido a sua ruptura ser brusca. Por outro lado, o aço que compõem o concreto armado, é um

material dúctil, por ser submetido a grandes deformações antes da ruptura (HIBBELER, 2006). Assim, os materiais são considerados dúcteis ou frágeis, dependendo de suas características de tensão-deformação.

O diagrama tensão-deformação dos aços empregados na construção civil pode apresentar ou não patamar de escoamento. A resistência característica de escoamento do aço à tração (f_{yk}) é a máxima tensão que a barra consegue suportar, pois, após atingir este valor de tensão, o aço passa a sofrer deformações irreversíveis. Na Figura 4, observa-se o diagrama tensão-deformação do aço, conforme a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 4 - Diagrama tensão x deformação para aços de armadura passiva



(Fonte: NBR 6118:2014)

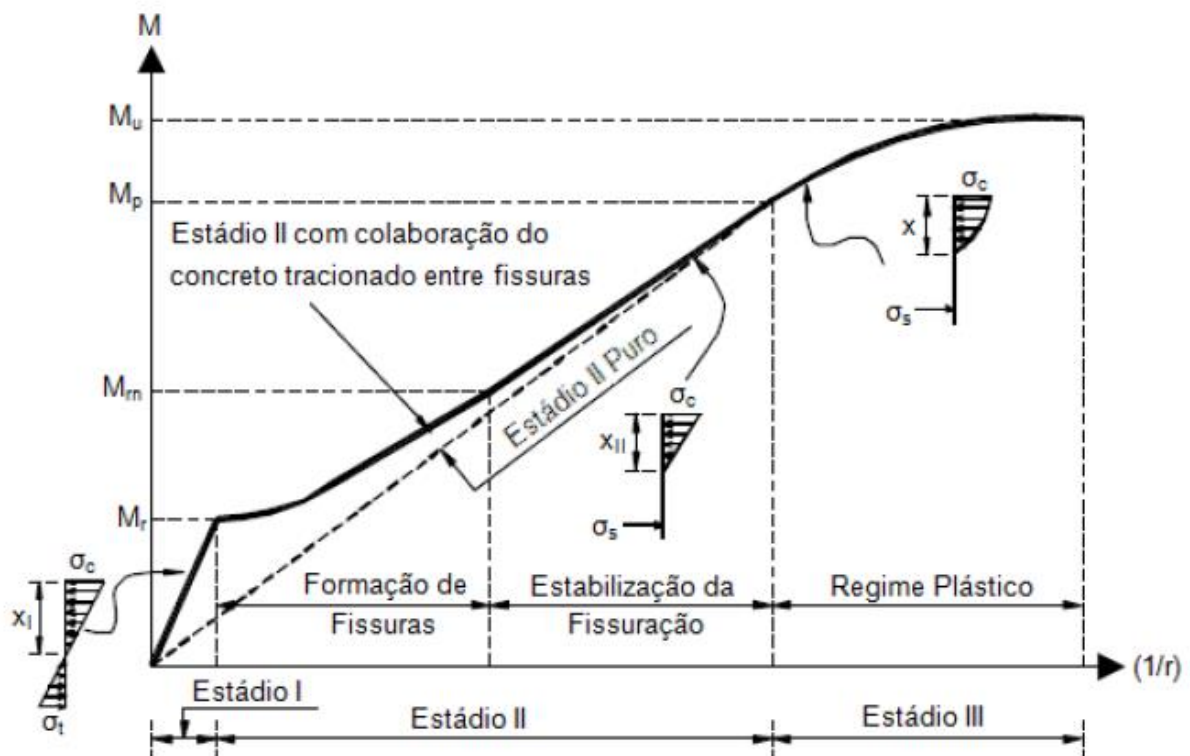
Assim, através da equação 3, estimou-se que a deformação para um dos pilares dos edifícios residências deste estudo, é aproximadamente 18μ para um pavimento. Para isso, verificou-se no modelo numérico da estrutura que um pilar com seção 25×41 cm recebe uma carga de peso próprio de 60000 N por pavimento e considerou-se o módulo de elasticidade 33000 MPa. Desta forma, os níveis de deformações que pretende-se medir durante a fase construtiva dos edifícios residências variam de 0,018 mm/m a 0,144 mm/m, considerando que o monitoramento será realizado em até oito pavimentos.

2.2 MOMENTO CURVATURA E NÃO LINEARIDADE FÍSICA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

A não linearidade física no concreto armado considera que os seus materiais constituintes não apresentam a relação tensão-deformação linear. Segundo Silva (2012), o efeito não-linear nas

vigas de concreto armado pode se manifestar pelo desenvolvimento de fissuras, bem como por deformações excessivas, ocasionando perdas de rigidez na estrutura. Assim, quando a estrutura for submetida a carregamentos, as propriedades dos materiais alteram-se e geram uma resposta não-linear. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a relação momento-curvatura para cada seção do elemento e valor da força normal atuante é uma das principais formas de considerar a não linearidade física. A formação de fissuras do concreto e a plastificação dos materiais, conforme a intensidade das solicitações, podem ser observadas no diagrama momento-curvatura da seção submetida à flexão simples, na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama momento-curvatura da seção submetida à flexão simples



(Fonte: SILVA, 2012)

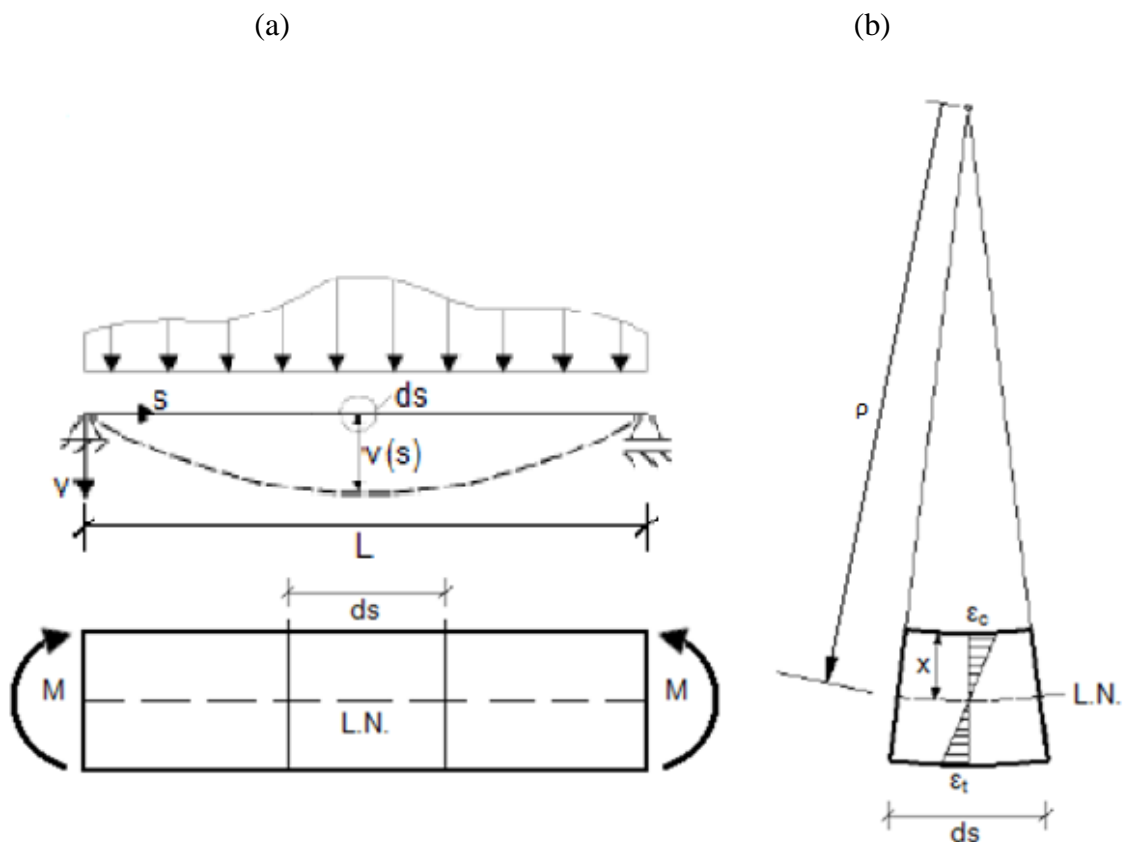
Assim, caracterizam-se três estágios de deformação de uma viga de concreto armado na flexão normal simples, que são denominadas: Estádio I, Estádio II e Estádio III. Os Estádios I e II correspondem às situações de serviço e o Estádio III corresponde ao estado-limite último (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO; 2009).

No Estádio I, a seção permanece no estado elástico, sob a ação de um momento fletor de pequena intensidade e a tensão de tração no concreto não ultrapassa sua resistência característica à tração. As tensões atuantes e as deformações são proporcionais, correspondendo

ao trecho linear do diagrama tensão-deformação, não havendo o desenvolvimento de fissuras visíveis. Ainda, a lei de Hooke é válida para esse estágio. No Estádio II, a seção encontra-se no estado de fissuração, quando os esforços de tração passam a ser resistidos somente pelo aço pois atingiu-se a resistência do concreto à tração. Admite-se que a tensão de compressão no concreto permanece linear e as fissuras de tração na face tracionada do concreto são visíveis. No Estádio III, o momento fletor é aumentado até um valor próximo ao de ruína. Assim, a fibra mais comprimida do concreto começa a plastificar após a deformação específica de 0,2%, até atingir sem aumento de tensão, 0,35%. O diagrama de tensões no concreto ocorre conforme um diagrama parábola-retângulo (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO; 2009).

A deformação de uma viga em concreto armado submetida à flexão pode ser obtida através da sua curvatura. Na Figura 6a, observa-se uma viga bi-apoiada com comprimento L , submetida à uma carga distribuída perpendicularmente ao seu eixo s . A Figura 6b corresponde a um elemento infinitesimal de viga de comprimento (ds) .

Figura 6 – Elemento de viga: (a) viga bi-apoiada; (b) e raio de uma seção transversal



(Fonte: adaptado de SILVA, 2012)

Assim, a curvatura pode ser obtida como o inverso do raio de curvatura (ρ) e pode ser calculada a partir da Equação 4 (HIBBELER, 2006).

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\varepsilon}{y} \quad (4)$$

Onde:

ρ = Raio de curvatura;

y = Distância do centro de gravidade até a fibra mais comprimida/tracionada.

Se o material apresenta um comportamento linear, aplica-se a lei de Hooke (Equação 3) e a equação da flexão, representada na Equação 5.

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (5)$$

Onde:

σ = Tensão;

M = Momento fletor;

I = Momento de inércia.

Substituindo a Equação 3 e Equação 5, tem-se a Relação Momento-Curvatura, descrita na Equação 6:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (6)$$

Contudo, a linearidade permanece somente no Estádio I. Posteriormente, o diagrama momento-curvatura apresenta um comportamento não-linear devido à formação de fissuras. Assim, para considerar a perda de rigidez da seção, a NBR 6118 (ABNT, 2014) sugere a utilização da equação de rigidez equivalente para o cálculo de flechas em vigas. Desta forma, inicialmente calcula-se o momento de fissuração, conforme a Equação 7:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (7)$$

Onde:

M_r = Momento de fissuração;

α = Fator de correlação de resistência à tração na flexão com resistência à tração direta;

f_{ct} = Resistência à tração direta do concreto;

I_c = Momento de inércia da seção bruta;

y_t = Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada da seção transversal.

Então, calcula-se a relação entre os módulos de deformação do aço e do concreto, conforme a Equação 8.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (8)$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de elasticidade secante do concreto;

E_s = Módulo de deformação do aço.

Assim, obtém-se o momento de inércia da peça de concreto fissurada, através da Equação 9.

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1) A'_s (x_{II} - d')^2 + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 = 0 \quad (9)$$

Onde:

I_{II} = Momento de inércia da seção fissurada do concreto no Estádio II.

b = largura da seção transversal;

d = altura útil da armadura de tração;

d' = Altura útil da armadura de compressão;

A_s = armadura de tração;

A'_s = armadura de compressão;

x_{II} = posição da linha neutra na seção no Estádio II.

Por fim, calcula-se a rigidez equivalente, conforme a Equação 10.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \quad (10)$$

Onde:

M_a = Momento fletor da seção crítica;

Assim, as equações apresentadas neste capítulo serviram de embasamento para estimar os níveis de deformações que buscam-se medir nas etapas seguintes e verificar a resolução necessária para os sistemas de medição propostos. Além disso, os dados experimentais também são comparados com os valores obtidos analiticamente.

3 MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES NÃO LINEARES

O desenvolvimento dessa pesquisa busca construir um sistema de medição para monitoramento de deformações em estruturas de concreto armado. Assim, ao longo desse capítulo, será apresentado em qual contexto o monitoramento estrutural está inserido atualmente, além das etapas e componentes eletrônicos necessários para o desenvolvimento do sistema de medição de deformações.

3.1 MONITORAMENTO ESTRUTURAL

O Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE), em *inglês Structural Health Monitoring (SHM)*, busca avaliar o comportamento da estrutura submetida a diferentes condições de carregamentos, investigar a existência de danos ou deteriorações, calibrar e entender os resultados dos modelos analíticos e numéricos adotados no dimensionamento de estruturas (ANDRADE, 2012). Segundo Assis (2007), para monitorar uma estrutura, realiza-se as seguintes etapas: medição, aquisição e tratamento de dados, avaliação e armazenamento das informações.

Nahum e Oliveira (2010) compararam as cargas nos pilares, obtidas através do *software* comercial CAD/TQS com as cargas medidas no monitoramento de sete pilares de um edifício de 126 m de altura na cidade de Belém. Para monitorar os pilares, antes da concretagem dos mesmos, foram adicionadas 3 barras extras com extensômetros elétricos fixados para medir as deformações ao longo do tempo. As barras foram posicionadas em dois níveis da altura dos pilares. Foram feitas medições em etapas pré-fixadas até o término da estrutura, onde as leituras foram realizadas através de um módulo *Spider*. Para cinco dos sete pilares selecionados, os esforços normais encontrados experimentalmente foram superiores em até 5% aos valores estimados pelo programa CAD/TQS. Para os outros dois pilares, os valores estimados foram superiores em 7% e 14% para a etapa de carregamento considerada.

Schwetz (2011) analisou a adequação de métodos de cálculo utilizados na modelagem de lajes nervuradas através da instrumentação de três lajes nervuradas de concreto armado em escala real, de um modelo reduzido de microconcreto armado em escala 1:7,5 e da modelagem numérica no *software* SAP2000 e CAD/TQS. Assim, foram medidas as deformações e

deslocamentos verticais das estruturas submetidas a diferentes carregamentos. Os dados obtidos experimentalmente indicaram comportamentos similares com as estimativas da análise numérica, verificando que os modelos numéricos são satisfatórios para simular lajes nervuradas de concreto armado.

Segundo Xia et al (2014), monitorar a deformação de estruturas com alturas elevadas sob diferentes condições do ambiente é complexo e importante para avaliar a segurança e o comportamento estrutural. Assim, os autores calcularam o deslocamento horizontal e o ângulo de inclinação de um edifício de 600 m de altura, através de um monitoramento estrutural de longo prazo composto com mais de 400 extensômetros fixados em diferentes alturas, a fim de obter deformações. Através de uma análise de erros, foi observado que os deslocamentos calculados apresentam maior precisão do que os mesmos medidos através de GPS (*Global Positioning System*) e as inclinações calculadas possuem precisão similar às medidas a partir de um inclinômetro.

Viapiana (2016), realizou um estudo de confinamento de pilares curtos de concreto de ultra alto desempenho submetidos à compressão centrada. Para a instrumentação dos pilares, este autor fixou extensômetros elétricos de resistência nas armaduras longitudinais, nas armaduras transversais e na face do concreto. Os deslocamentos verticais foram obtidos através de dois transdutores de deslocamento.

Osman e Malak (2017) avaliaram a integridade e segurança da torre do relógio Makkah, na Arábia Saudita, através do monitoramento do edifício durante a fase de construção e utilização. Para isso, foram fixados sensores de deformações nas áreas com tensões críticas.

Silva (2020) desenvolveu um sistema de aquisição de dados de baixo custo com o objetivo de obter dados relativos a sensores de deformações (extensômetros), de deslocamento e força. Assim, foi criado um *hardware* com sete canais, onde quatro possuem $\frac{1}{4}$ de Ponte de *Wheatstone* (PW), um canal possui $\frac{1}{2}$ PW, um canal com PW completa e um canal para transdutor potenciométrico de deslocamento. Os canais com $\frac{1}{4}$ de PW foram criados para viabilizar a ligação com extensômetros tipo rosetas, os quais devem possuir três canais. Ainda, foi empregado um Arduino MEGA, um módulo *Bluetooth*, seis amplificadores HX711 e circuitos elétricos tipo Ponte de *Wheatstone*. O custo para a construção desse sistema em julho de 2018 foi de aproximadamente US\$ 89,00, enquanto o custo do equipamento comercial de referência modelo *QuantumX-MC840A* do fabricante HBM, adquirido em setembro de 2011

foi R\$ 14571,43. Para avaliar o sistema desenvolvido, foram realizados ensaios de flexão à quatro pontos em seis vigas de concreto armado, obtendo-se um comportamento satisfatório em quatro das seis vigas. Assim, o autor concluiu que para ensaios de curta duração, o sistema de aquisição de dados desenvolvido apresentou-se compatível com a proposta da pesquisa.

Segundo Gao et al (2020), as variações do concreto armado ao longo do tempo ocasionam deformações adicionais que não podem ser totalmente consideradas no desenvolvimento de projetos. Para edifícios altos, as deformações serão ainda maiores devido ao longo período de construção, cargas e processos construtivos complexos. Assim, para avaliar o efeito de tais características, os autores realizaram o monitoramento das deformações de um edifício de 335 m de altura. Posteriormente, o processo de construção foi simulado através do método de elementos finitos. Para monitorar as deformações durante a construção do 10º ao 48º pavimento, foram utilizados 128 extensômetros, 64 sensores de temperatura e 18 acelerômetros. A comparação dos dados numéricos com os experimentais mostrou que a análise pelo método dos elementos finitos é consistente com o monitoramento, validando o modelo numérico para análise de deformações. Ainda, a análise numérica apresentou que a qualidade do concreto possui grande influência na deformação não-linear e quando a construção é interrompida por mais de três meses, deve ser atualizado o nivelamento da edificação. Ainda, são de grande impacto os efeitos de diferentes estações do ano na retração e fluência do concreto para a deformação vertical de edifícios altos.

Segundo Iyama, Chih-Chun e Araki (2021), a maioria dos sistemas de monitoramento da integridade estrutural estimam o comportamento da estrutura através de acelerações, as quais não medem diretamente as tensões ou danos de elementos estruturais. Assim, uma técnica alternativa é usar medições de deformações. Desta forma, os autores fixaram acelerômetros e extensômetros em um edifício existente localizado no Japão, de estrutura metálica e com três pavimentos, com o objetivo de medir acelerações e deformações durante o carregamento de pequenos terremotos. Os sensores foram conectados a um registrador de dados comercial da marca *Kyowa Electric Instruments* e através dos resultados experimentais, obteve-se a rigidez de vigas e pilares, comparando-as com a rigidez local analítica. Por fim, a rigidez local baseada na medição dos sensores coincidiu com o valor analítico e as deformações medidas foram compatíveis com os resultados da análise numérica. Contudo, para analisar a mudança na rigidez local dos elementos estruturais durante terremotos severos, deve-se realizar mais

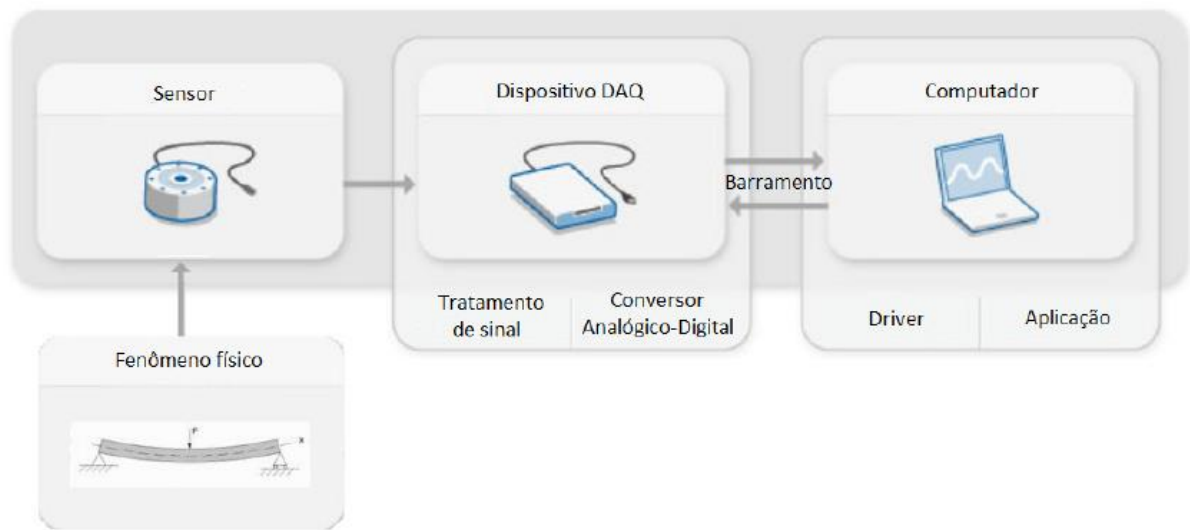
medições. Além disso, para investigar e melhorar a aplicabilidade dos resultados, é necessário medir deformações semelhantes para diversos edifícios.

Borges (2021), desenvolveu um dispositivo de baixo custo baseado em acelerômetros para o monitoramento de integridade estrutural (MIE). O dispositivo foi submetido a ensaios e extração das frequências naturais de um modelo de dimensões reduzidas, mostrando-se confiável para o emprego em MIE. Ainda, o autor ressalta que para o desenvolvimento de um sistema de medição adequado, deve-se atender à requisitos específicos conforme as condições a que o mesmo será implementado, tais requisitos são: agressividade do ambiente, nível de interferências ao sinal, fonte de energia, amplitude esperada do sinal e conectividade com a internet.

3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O monitoramento das estruturas pode ser realizado através de uma instrumentação, que integra diversos dispositivos e sistemas auxiliares, tais como: sensoriamento, aquisição de dados, processamento de dados, comunicação e verificação de dados. O dispositivo de aquisição de dados (DAQ) é responsável por coletar as informações dos sensores. Ainda, este dispositivo deve atender determinadas especificações, como: número de canais (número de sinais que podem ser lidos ao mesmo tempo), taxas de amostragem (frequência com que as conversões são efetuadas), resolução (representação digital do sinal analógico, em *bits*), alcance (voltagem máxima e mínima do sinal) e ganho (amplificação do sinal). Assim, o DAQ é formado através de conversor analógico-digital e condicionador de sinal. Por fim, demanda-se de um computador conciliado com *driver* para comunicação do dispositivo com um programa para verificação de dados (ANDRADE, 2012). Na Figura 7, representa-se a sequência das etapas de um sistema de medição.

Figura 7 – Esquema típico de um sistema de monitoramento computadorizado



(Fonte: ANDRADE, 2012)

Dessa forma, torna-se possível medir grandezas físicas, como deslocamentos, deformações, parâmetros dinâmicos, temperatura, entre outras. A escolha da grandeza a ser medida está relacionada ao objetivo do monitoramento, podendo ser para verificação de manifestações patológicas, prevenção de problemas futuros ou análise do comportamento estrutural. Para cada uma dessas grandezas, emprega-se diferentes tipos de sensores. Assim, através de sensores de deformação, obtém-se deformações causadas por esforços de tração ou compressão em determinado corpo (BALBINOT; BRUSAMARELLO; 2011).

3.2.1 SENSORES DE DEFORMAÇÃO

As deformações podem ser medidas através de sensores mecânicos, sensores elétricos, sensores acústicos e fibras ópticas (ANDRADE, 2012). Entretanto, os sensores elétricos são o método mais utilizado para identificar a distribuição de tensão em uma estrutura. Assim, para um melhor entendimento dos sensores elétricos, esta seção contempla conceitos e formulações analíticas dos extensômetros, os quais foram adotados para o desenvolvimento deste trabalho.

Os autores Andolfato, Camacho e Brito (2004), descrevem os extensômetros como sensores de deformação compostos por um fio metálico fino (grade) colado em uma base isolante e flexível. Os extensômetros são baseados na variação da resistência de um condutor ou semicondutor, quando submetidos à tensão mecânica. A resistência elétrica é caracterizada pela Equação 11.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (11)$$

Onde:

R = Resistência elétrica;

ρ = Resistividade;

l = Comprimento do fio;

A = Seção do fio.

Os sensores são fixados no elemento cujas deformações buscam-se medir. Após a aplicação de esforços externos, a estrutura sofre deformações que são diretamente transmitidas para a base do extensômetro. Quando os fios metálicos da base sofrem deformações mecânicas, acontece uma mudança de comprimento que ocasiona uma variação da resistência elétrica. O fator do extensômetro, K, corresponde a sensibilidade do sensor à deformação do material metálico. Este fator é uma constante que costuma ter um valor próximo a 2,1, fornecido pelo fabricante do sensor. Na Equação 12, descreve-se K:

$$K = \frac{\Delta R}{R \varepsilon} \quad (12)$$

Onde:

K = Fator do extensômetro (*gauge factor*);

ΔR = Variação da resistência;

R = Resistência;

ε = Deformação.

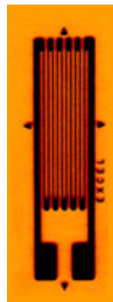
Para a colagem, deve ser utilizada uma cola apropriada, que transmita a deformação do objeto adequadamente para o extensômetro. Tal inserção exige que o contato do sensor com a estrutura seja em uma superfície limpa e preparada. Conforme as tensões na superfície e eixos principais, pode-se utilizar diferentes tipos de extensômetros e determinar suas direções. Para a realização

deste trabalho, adotou-se extensômetros uniaxiais e do tipo roseta dupla. Na sequência serão apresentados os detalhes desses sensores e no apêndice C encontram-se especificações técnicas dos sensores utilizados.

3.2.1.1 Extensômetros uniaxiais

Os extensômetros uniaxiais são os de formato mais simples. As resistências usuais são 120 ohm ou 350 ohm. Devido ao aquecimento da grade gerado pelas soldas de conexão, prefere-se as resistências maiores. Costuma-se utilizar uma grade uniaxial, quando é possível identificar o eixo principal da tensão, pois o extensômetro deve ser colado na direção do alongamento ou encurtamento das linhas da grade (BALBINOT; BRUSAMARELLO; 2011). Na Figura 8, observa-se o extensômetro de resistência elétrica uniaxial.

Figura 8 - Extensômetro de resistência elétrica uniaxial

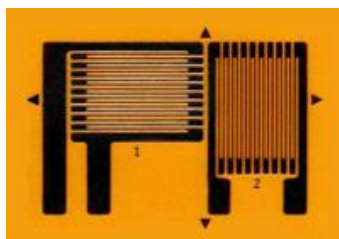


(Fonte: EXCEL SENSORES, 2021)

3.2.1.2 Extensômetros tipo roseta dupla

Os extensômetros do tipo roseta dupla são compostos por duas grades em uma mesma base. Costuma-se utilizar para análise de tensões biaxiais, onde busca-se medir as deformações em duas direções, 0° e 90° (BALBINOT; BRUSAMARELLO; 2011). Na Figura 9, encontram-se os extensômetros tipo roseta dupla.

Figura 9 - Extensômetro de resistência elétrica tipo roseta dupla

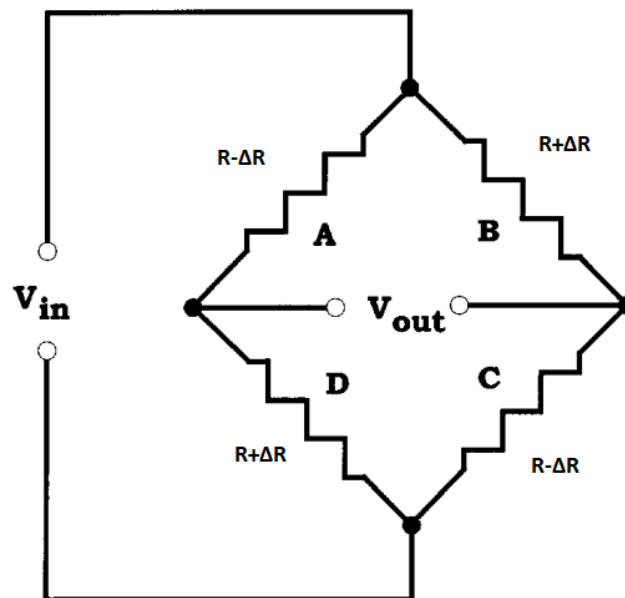


(Fonte: EXCEL SENSORES, 2021)

3.2.1.3 Ponte de *Wheatstone*

Para a compensação de temperatura, além da fabricação dos extensômetros com diferentes ligas e metais, como Constantan, Isoelastica e Karma, é possível empregar a ponte de *Wheatstone* para anular efeitos térmicos. Para melhorar a precisão da medida de resistência, também pode-se utilizar a configuração de ponte de *Wheatstone* (BALBINOT; BRUSAMARELLO; 2011). Conforme o tipo de esforço que busca-se medir, adotam-se diferentes configurações. Para esta dissertação, a configuração da ponte de *Wheatstone* abrange quatro extensômetros ativos em um campo uniaxial de tensões, dois posicionados na direção da deformação principal e dois posicionados transversalmente, conforme a Figura 10:

Figura 10 - Ponte de *Wheatstone* com quatro extensômetros ativos



(Fonte: adaptado de WEBSTER, 1999)

Segundo Hoffmann (1989), o sinal de saída dessa configuração pode ser calculado pela seguinte Equação 13.

$$V_{out} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_B}{R_B} + \frac{\Delta R_C}{R_C} - \frac{\Delta R_D}{R_D} \right) V_{in} \quad (13)$$

Através da Equação 12, obtém-se a Equação 14:

$$V_{out} = \frac{1}{4}(K\varepsilon_1 - K\varepsilon_2 + K\varepsilon_1 - K\varepsilon_2)V_{in} \quad (14)$$

Além da deformação no sentido em que a força é aplicada, acontece uma diminuição (ou aumento) da seção transversal do corpo. Para materiais com propriedades mecânicas iguais em todas as direções, a deformação transversal e longitudinal é demonstrada pelo coeficiente de Poisson, conforme a Equação 15.

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 \nu \quad (15)$$

Substituindo a Equação 15, escreve-se a Equação 16:

$$V_{out} = \frac{1}{2}K\varepsilon_1(1 - \nu)V_{in} \quad (16)$$

Assim, conforme a Equação 17, encontra-se a deformação na direção principal:

$$\varepsilon_1 = \frac{V_{out}}{V_{in}} \frac{1}{K(1 - \nu)} \quad (17)$$

Onde:

ε_1 = Deformação longitudinal;

ε_2 = Deformação transversal;

ν = Coeficiente de Poisson;

V_{in} = Tensão de entrada;

V_{out} = Tensão de saída.

3.2.2 CONDICIONAMENTO E CONVERSÃO DO SINAL

Após captar a variável medida, torna-se necessário adequar o sinal para facilitar sua interpretação e manuseio, pois, o sinal dos sensores é de baixa intensidade. Desta forma,

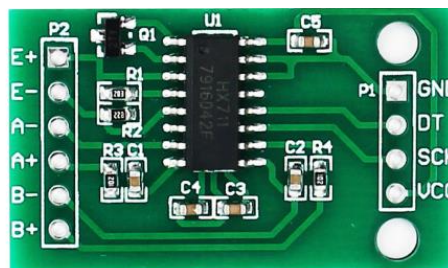
utilizam-se amplificadores, a fim de viabilizar a leitura. No entanto, para que não ocorra distorções no sinal, Holman (2012) ressalta a importância de conhecer e atender os limites dos amplificadores.

Outra etapa do sistema de medição, consiste na leitura e armazenamento dos dados, onde o sinal apresenta-se no modo analógico ou digital. Os dados do sinal analógico são representados por um comportamento contínuo, enquanto o sinal digital apresenta os dados de forma discreta, através de incrementos, em um intervalo finito de valores. A conversão de um sinal analógico para o digital, é realizada através de um conversor analógico-digital. Assim, é possível representar um valor analógico de voltagem em uma sequência binária. Ainda, para obter uma resposta digital próxima ao sinal analógico, verifica-se a resolução desses conversores (MEASUREMENT COMPUTING, 2012). Por fim, os dados digitais são recebidos por computadores, onde serão interpretados e armazenados.

3.2.2.1 Amplificador e Conversor HX711

O módulo conversor amplificador HX711 pode ser empregado com o propósito de captar a diferença de potencial da ponte de *Wheatstone*, amplificar esse sinal analógico proveniente dos sensores e converter para o digital. Devido a sua resolução ser 24 bits, possui elevada sensibilidade e rapidez no tempo de conversão. Ainda, por ser um amplificador e conversor dentro do mesmo esquema elétrico de ligação, torna-se fácil de usar e com uma estrutura simples. No entanto, a entrada de energia é realizada através de um transistor, que pode não regular a alimentação de maneira adequada para determinados sinais, podendo gerar ruídos na exibição dos dados e esconder o sinal a ser lido. O ganho deste amplificador é limitado a 128 vezes (AVIA SEMICONDUCTOR, 2022). Na Figura 11, encontra-se o amplificador e conversor HX711.

Figura 11 – Módulo conversor amplificador HX711

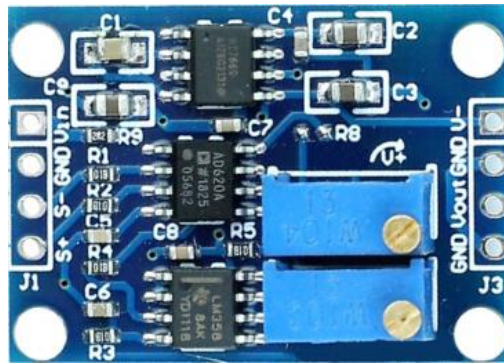


(Fonte: USINAINFO, 2022)

3.2.2.2 Amplificadores de Instrumentação AD620 e INA118

O amplificador de instrumentação AD620 possui um bom desempenho para amplificar os sinais baixos dos sensores. Este amplificador caracteriza-se pelo baixo nível de ruído e alta precisão para utilização em sistemas de medição. Diferente do HX711, a entrada de energia apresenta baixa polarização. Ainda, através de dois potenciômetros, pode-se amplificar o sinal de entrada e regular o ponto zero. Assim, o ganho pode ser ajustado através da inclusão de resistores, sendo limitado até 1000 vezes. O amplificador de instrumentação INA118 apresenta um desempenho similar ao AD620, podendo ser aplicado nas mesmas finalidades. Na Figura 12, observa-se o módulo amplificador AD620.

Figura 12 – Módulo amplificador AD620



(Fonte: USINAINFO, 2022)

O ganho do amplificador depende do resistor que deve ser ligado entre os pinos 1 e 8 do chip. Então, pode-se ajustar o ganho utilizando resistores de 0,1% a 1%. Assim, através da Equação 18, pode-se calcular qual a resistência do resistor necessária para obter o ganho esperado.

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G - 1} \quad (18)$$

Onde:

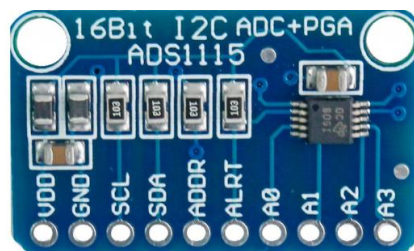
R_g = Resistência;

G = Ganho.

3.2.2.3 Conversor ADS1115

O Conversor Analógico Digital ADS1115, representado na Figura 13, realiza a conversão de sinais analógicos para sinais digitais com resolução de 16 bits e possui tensão de operação de 2V a 5,5V, viabilizando com alta precisão a integração com microcontroladores como o Arduino, que foi utilizado neste trabalho (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Figura 13 – Conversor ADS1115

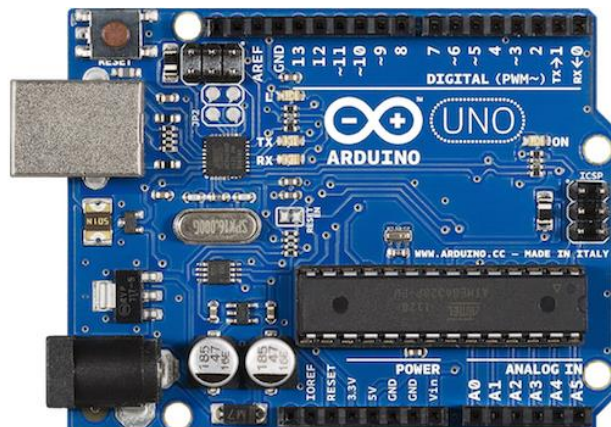


(Fonte: USINAINFO, 2022)

3.2.2.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma de código aberto baseada em *hardware* e *software*, aplicada em milhares de projetos, cujas aplicações são cotidianas e até de instrumentos científicos. O Arduino Uno é um microcontrolador que possui entradas e saídas, analógicas e digitais, dispostas em uma única placa e o seu funcionamento ocorre através da programação em linguagem C (ARDUINO, 2021). Desta forma, o Arduino Uno, conforme Figura 14, pode ser programado para receber os dados dos conversores na forma digital e exibi-los em um *display* ou computadores.

Figura 14 – Arduino UNO

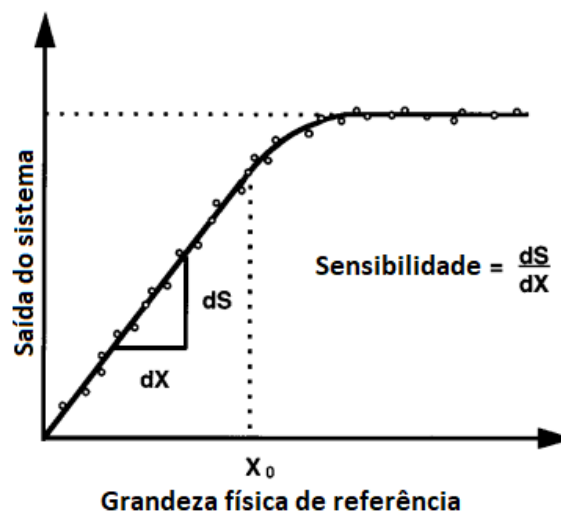


(Fonte: USINAINFO, 2022)

3.2.3 CALIBRAÇÃO

Segundo Hoffmann (1989), ao desenvolver um sistema de medição, espera-se que o valor a ser medido e o valor real correspondam um ao outro. Tal correspondência pode ser obtida através da calibração. Normalmente, um sensor ou um sistema de medição, são calibrados fornecendo uma grandeza física conhecida ao sistema e registrando os dados de saída. Assim, através da relação entre a variação da grandeza física de referência e a variação dos dados de saída do sistema de medição, obtém-se uma curva de calibração, conforme exemplificado na Figura 15. Neste exemplo, o sensor tem uma resposta linear para valores da grandeza física menores que X_0 . Já para valores maiores que X_0 , a curva de calibração perde sensibilidade até o sinal atingir o valor limite de saída. Este comportamento indica a saturação do sistema, que torna-se ineficiente para medições superiores a este valor. Ainda, em alguns casos, o sensor pode não responder a valores muito pequenos de grandezas físicas (WEBSTER, 1999). Então, através da calibração pode-se verificar, corrigir e aprimorar todas as etapas apresentadas precedentemente.

Figura 15 – Exemplo de curva de calibração



(Fonte: adaptado de WEBSTER, 1999)

Se a curva de calibração de um sistema para os valores de entrada não for uma linha reta, o sistema ainda pode ser altamente preciso. Contudo, em muitas aplicações o comportamento linear é mais desejável. A conversão de uma leitura é mais conveniente se for necessário apenas multiplicar por uma constante fixa ao invés de utilizar uma curva de calibração não linear ou calcular a partir de uma equação de calibração não linear. Assim, costuma-se relacionar os resultados obtidos a compatibilidade com o comportamento linear (DOEBELIN, 1990).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta o programa experimental que foi executado em duas etapas: a primeira consiste no desenvolvimento e calibração da instrumentação adotada para o desenvolvimento de um sistema de medição que é amplificado pelo módulo amplificador e conversor HX711. A segunda etapa consiste em desenvolver e calibrar outro sistema de medição que é amplificado através do amplificador AD620 e a conversão do sinal analógico para digital é realizada pelo conversor ADS1115. A calibração dos dois sistemas de medição foi realizada no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para atingir os objetivos deste trabalho e obter as pequenas deformações ocasionadas nos pilares de concreto armado, buscou-se desenvolver um sistema prático para a instalação dos extensômetros em campo, onde o manuseio e instalação dos sensores se torna difícil ou inviável. Como os extensômetros são sensores delicados que exigem cuidado e tempo no processo de colagem, desenvolveu-se placas de aço de 0,5 mm com extensômetros fixados a fim de agilizar o processo de aderência aos pilares de dois edifícios residenciais que estão em fase de construção. Ainda, os sistemas de leituras comerciais costumam ser de custos elevados e dependem de computadores, dificultando o manuseio para análises em obras. Assim, foi desenvolvido dois dispositivos de leitura de baixo custo e fácil mobilidade para medição dos dados. No fluxograma da Figura 16, observa-se a matriz experimental com as principais diferenças entre os sistemas de medição desenvolvidos.

Figura 16 – Fluxograma da matriz experimental

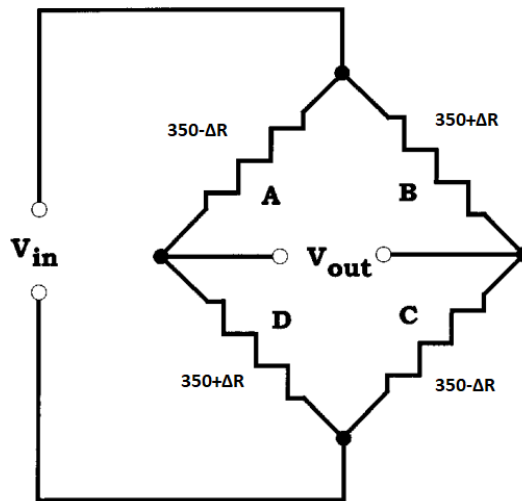


(Fonte: AUTORA, 2022)

4.1 DESENVOLVIMENTO DA PLACA COM EXTENSÔMETROS

Em busca de uma maneira simples de fixar extensômetros em estruturas no campo, foi desenvolvida uma placa de aço composta com quatro extensômetros em uma ponte de *Wheatstone*, operando em modo completo, conforme Figura 17.

Figura 17 - Ponte de *Wheatstone* adotada para a placa

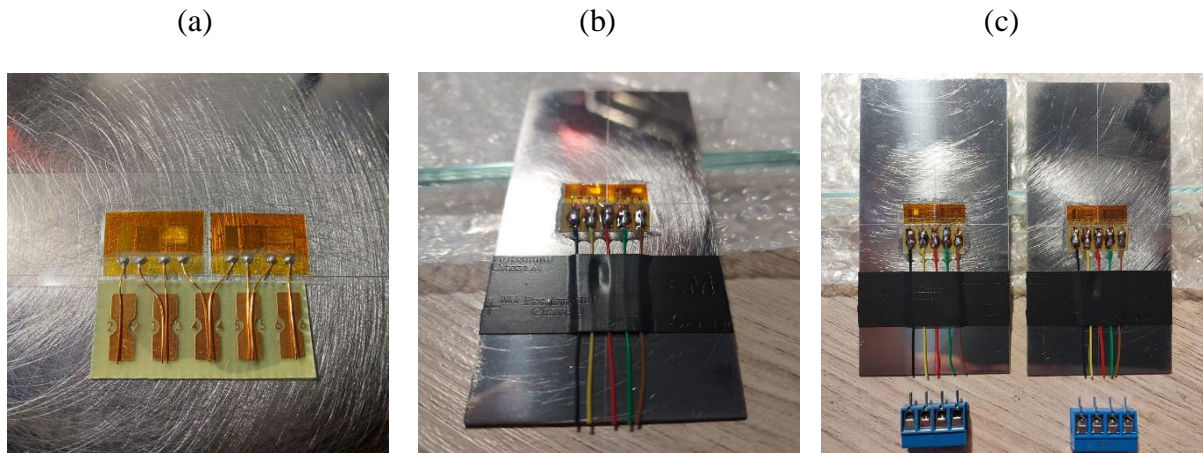


(Fonte: adaptado de WEBSTER, 1999)

Os extensômetros adotados são da marca Excel Sensores, modelo roseta dupla a 90° com grelhas lado a lado tipo PA-06-125TG-350LEN. Desta forma, para compor a ponte, colou-se dois desses sensores em cada placa.

A instalação dos extensômetros iniciou pela marcação dos eixos centrais da placa para auxiliar no posicionamento dos sensores. Em seguida, a placa foi lixada e higienizada com álcool isopropílico. A partir disto, um dos sensores foi posicionado próximo às linhas de referência, utilizando uma fita adesiva. Para colar o extensômetro, foi adotado um adesivo instantâneo com secagem rápida, mantendo o sensor pressionado com o adesivo sobre a superfície por 30 segundos. Em seguida, foi realizado o mesmo procedimento para aderir o outro sensor à placa. Então, os terminais de soldagem foram colados abaixo dos sensores e realizou-se o processo de soldagem. Na Figura 18a, observam-se os sensores e terminais de soldagem aderidos a placa de aço. Na Figura 18b, encontram-se os cabos soldados aos sensores. Na figura 18c, adicionaram-se os conectores azuis (tipo KRE), que serão soldados aos cabos e utilizados para conectar o dispositivo de leitura à placa. As dimensões da placa são 5 cm x 10 cm.

Figura 18 - Instalação dos extensômetros na placa de aço: (a) colagem dos extensômetros na superfície lixada; (b) cabos soldados aos extensômetros; (c) inserção dos conectores.



(Fonte: AUTORA, 2022)

Em seguida, foram soldados os conectores aos cabos e realizou-se uma proteção com epóxi sobre as áreas mais frágeis. Por fim, a placa está pronta para ser colada nas estruturas, basta lixar e higienizar a superfície dos elementos e fixar a chapa com adesivo epóxi. Na Figura 19, apresenta-se a placa finalizada. Na Figura 20, observa-se oito das dezessete placas desenvolvidas para este trabalho.

Figura 19 – Placa com extensômetros



(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 20 - Placa com extensômetros

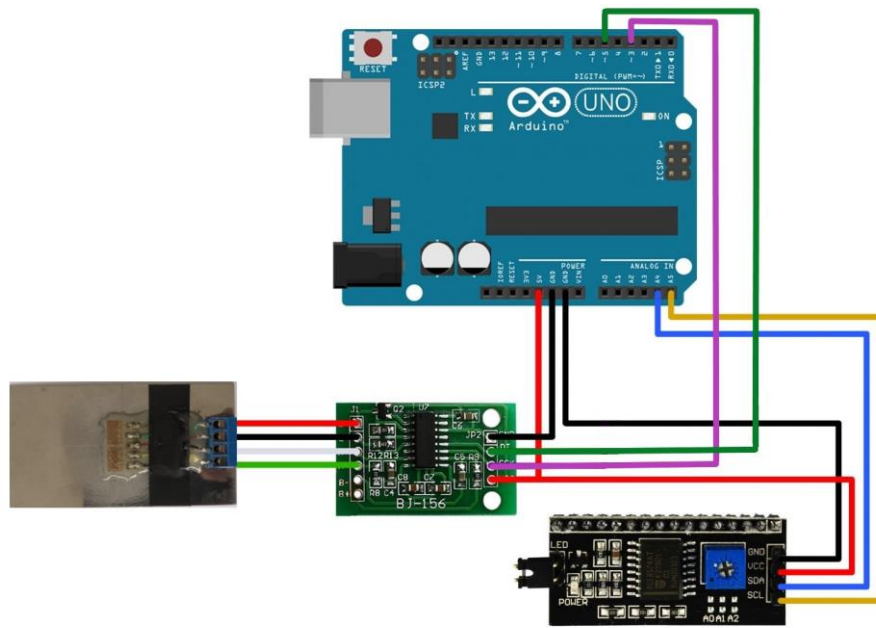


(Fonte: AUTORA, 2022)

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO I

Para o sistema de medição I, foi desenvolvido um dispositivo de leitura composto por um Arduino UNO, um módulo conversor e amplificador HX711, um *display* LCD 16x2 com módulo I²C e uma pilha 9v. Os dados obtidos são valores de tensão diferencial entre A+ e A-, amplificados e convertidos para um sinal digital. Utilizou-se um código para Arduino para o dispositivo digitalizar as leituras dos sinais, conforme apresentado no Apêndice A. A resolução deste equipamento é 24 bits. Na Figura 21, observa-se o esquemático do sistema de aquisição de dados.

Figura 21 - Esquemático do sistema de medição I

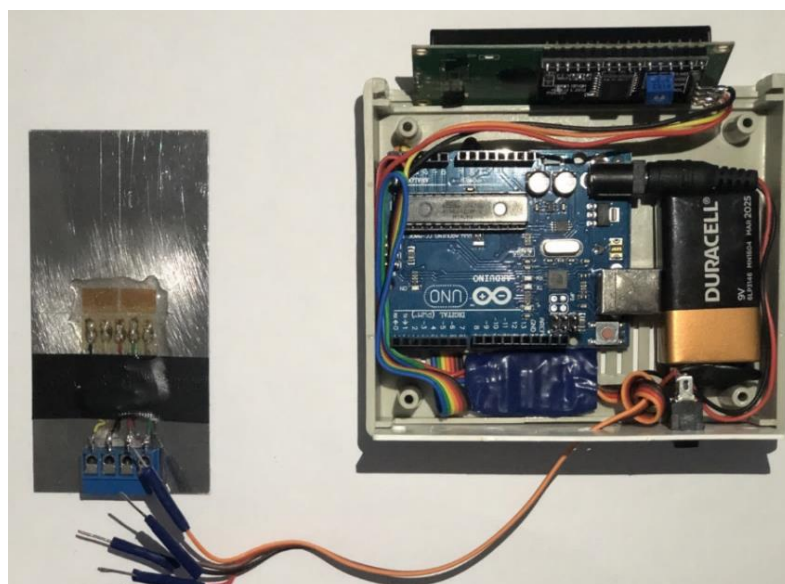


(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 22a, encontra-se a composição interna do dispositivo de leitura e na Figura 22b, o sistema completo, ou seja, a placa com os extensômetros conectada ao dispositivo de leitura ligado, exibindo o sinal digital.

Figura 22 – Sistema de medição I: (a) Placa com extensômetros e parte interna do dispositivo de leitura I; (b) Placa com extensômetros conectada ao dispositivo de leitura I

(a)



(b)



(Fonte: AUTORA, 2022)

4.2.1 Método de calibração

Para calibrar a placa com os extensômetros de aço, foi realizado um ensaio de compressão simples no LEME, onde confeccionou-se um pilar de concreto com traço para resistência à compressão (f_{ck}) de 35 MPa. A seção transversal do pilar é 20,5 cm x 20,5 cm, e a altura é 60 cm.

Para determinar a carga a ser aplicada no ensaio de compressão simples, rompeu-se dois corpos de prova (CPs) para verificar a resistência à compressão do concreto, obtendo-se o valor de 38,3 MPa para a resistência média de compressão do concreto (f_{cm}). Na Figura 23, encontra-se um dos corpos de prova rompido.

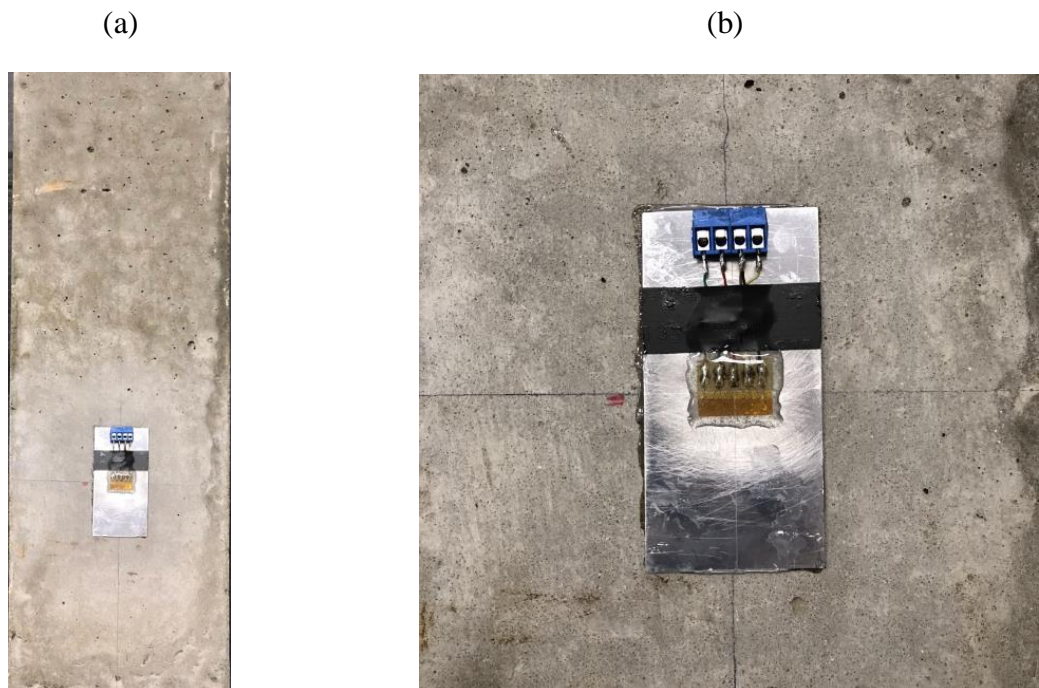
Figura 23 - Ensaio de resistência à compressão do CP



(Fonte: AUTORA, 2022)

Para determinar a deformação específica do concreto, foram utilizados extensômetros de concreto da marca *Kyowa*, tipo KFG-20-120-C1-CC, e transdutores de deslocamento (LVDTs). Assim, os deslocamentos verticais dos LVDTs foram convertidos para deformação. A instrumentação do pilar começou pela aderência da placa com extensômetros. Desta forma, marcou-se linhas de referência para posicionar a placa e a superfície foi lixada e higienizada. Após, a placa foi posicionada sobre as linhas de referência e para colagem utilizou-se o adesivo epóxi de secagem rápida da marca Poxipol, mantendo a placa pressionada sobre a superfície por alguns segundos. Na Figura 24, observa-se o pilar com a placa de extensômetros de aço.

Figura 24 – Pilar com a placa fixada: (a) posição da placa no pilar (b) fixação da placa nas linhas de referência



(Fonte: AUTORA, 2022)

Em seguida, iniciou-se o processo de instalação dos extensômetros de concreto. Como o concreto é um material poroso, antes de colar os extensômetros foi necessário lixar e regularizar a superfície com massa plástica a fim de homogeneizar a face. Após a cura da cola plástica, pode-se então lixar e limpar a superfície novamente. Posicionou-se os extensômetros sobre as linhas de referência, utilizando uma fita adesiva. Para colar, adotou-se um adesivo instantâneo de secagem rápida, mantendo o sensor pressionado por alguns segundos. Também foram soldados os cabos aos extensômetros e testou-se as resistências dos mesmos. Foi colocada fita isolante sobre os extensômetros e os cabos.

Na Figura 25a, observa-se o pilar com a placa de extensômetros de aço colada no centro da seção transversal e no lado direito da placa, encontra-se um extensômetro de concreto colado ainda sem ser soldado aos cabos e sem a proteção com fita isolante. Já no lado esquerdo da placa, têm-se um extensômetro de concreto colado com os cabos soldados e protegido com fita isolante. Em seguida, foram fixadas as cantoneiras que servem de apoio para os LVDTs, conforme exibe a Figura 25b.

Figura 25 – Pilar com sensores (a) Instalação dos extensômetros (b) Instalação das cantoneiras



(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 26, têm-se o pilar com todos os sensores fixados. No eixo transversal e altura de 20 cm da base do pilar, encontra-se a placa com extensômetros. Em cada lado da placa, está posicionado um LVDT e um extensômetro de concreto protegido por fita isolante.

Figura 26 - Pilar com sensores fixados



(Fonte: AUTORA, 2022)

Nesta etapa inicial do programa experimental, foram realizados dois ensaios onde aplicaram-se cargas de até 50% da carga de ruptura dos CPS, através da prensa universal disponível no LEME. No primeiro ensaio, o principal objetivo era avaliar se o comportamento da placa seria semelhante ao comportamento dos outros sensores. Então, todos os sensores estavam ligados ao sistema de leitura de dados universal do LEME, composto por dois módulos do equipamento *QuantumX MX840B*, da marca HBM. Foi utilizado o *software Catman Easy* e a frequência de leitura foi 2 Hz. As cargas foram aplicadas de forma contínua. Na Figura 27, pode ser observado o pilar com os sensores ligados ao sistema do LEME e, à direita, sem estar conectado, o dispositivo de leitura desenvolvido.

Figura 27 - Pilar com sensores ligados ao sistema de leitura *QuantumX MX840B*



(Fonte: AUTORA, 2022)

O segundo ensaio foi realizado para calibração do sistema de medição desenvolvido. Então, as cargas foram aplicadas de forma estática para que fosse possível registrar os dados do dispositivo a cada acréscimo de 50 kN, até atingir 800 kN. A placa com extensômetros foi conectada ao dispositivo de leitura de dados desenvolvido para este trabalho e os extensômetros de concreto e LVDTs foram ligados ao sistema de leitura de dados do LEME, conforme Figura 28.

Figura 28 - Placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leitura I



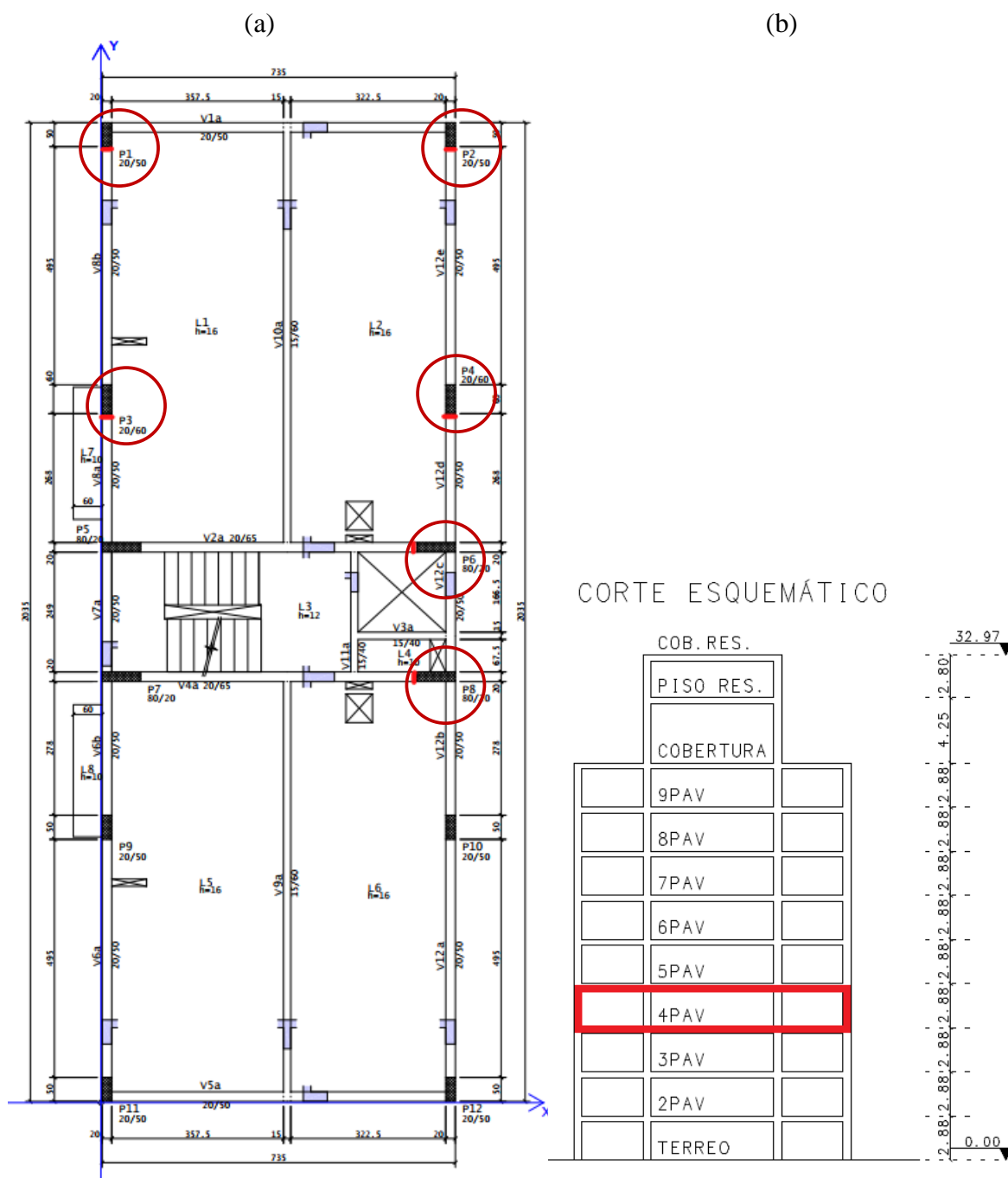
(Fonte: AUTORA, 2022)

4.2.2 Fixação das placas em uma edificação residencial

A edificação é de uso residencial e localiza-se na cidade de Porto Alegre – RS. O edifício é composto pelo pavimento térreo, oito pavimentos tipo, cobertura, piso e cobertura dos reservatórios, conforme representado no corte esquemático da Figura 29. O pé-direito estrutural foi considerado 2,88 m entre lajes, somando uma altura total do edifício de 32,97 m. Cada pavimento tipo possui dois apartamentos de aproximadamente 65 m². As dimensões em planta são de 7,35x20,35 m, conforme disposto na Figura 29. A estrutura foi dimensionada em concreto armado convencional em zona urbana e adotou-se a resistência a compressão (f_{ck}) de 35 MPa. A fixação das placas na edificação residencial ocorreu quando a construção da mesma estava executando o quinto pavimento. Desta forma, as placas foram coladas nos pilares do

quarto ao quinto pavimento, conforme Figura 29b, pois este andar ainda estava totalmente escorado. Foram escolhidos seis pilares para colagem das placas, que são: P1, P2, P3, P4, P6 e P8, conforme a planta baixa do pavimento tipo da estrutura. Na Figura 29a, os pilares selecionados estão com uma marcação em vermelho.

Figura 29 - Marcação dos pilares selecionados: (a) planta baixa (em cm); (b) corte esquemático (em m)



(Fonte: AUTORA, 2022)

Como próximo aos apoios a tensão pode não ser uniforme, as placas foram posicionadas a uma altura de aproximadamente 90 cm do piso. Foi colada uma placa na face menor de cada pilar selecionado, admitindo-se que os momentos gerados nestes locais são baixos e para esta análise, podem ser desconsiderados. Para aderir as placas aos pilares, foi replicado o mesmo processo de colagem realizado no laboratório. Na Figura 30a, é possível observar os pilares P2, P4 e P6 com as placas fixadas e na Figura 30b encontra-se os pilares P1 e P3. Na Figura 30c, tem-se o pilar P8 com a placa fixada e na Figura 30d visualiza-se o dispositivo de leitura conectado à placa.

Figura 30 - Placas fixadas nos pilares (a) P2, P4 e P6; (b) P1 e P3; (c) P8; (d) Dispositivo de leitura conectado à placa

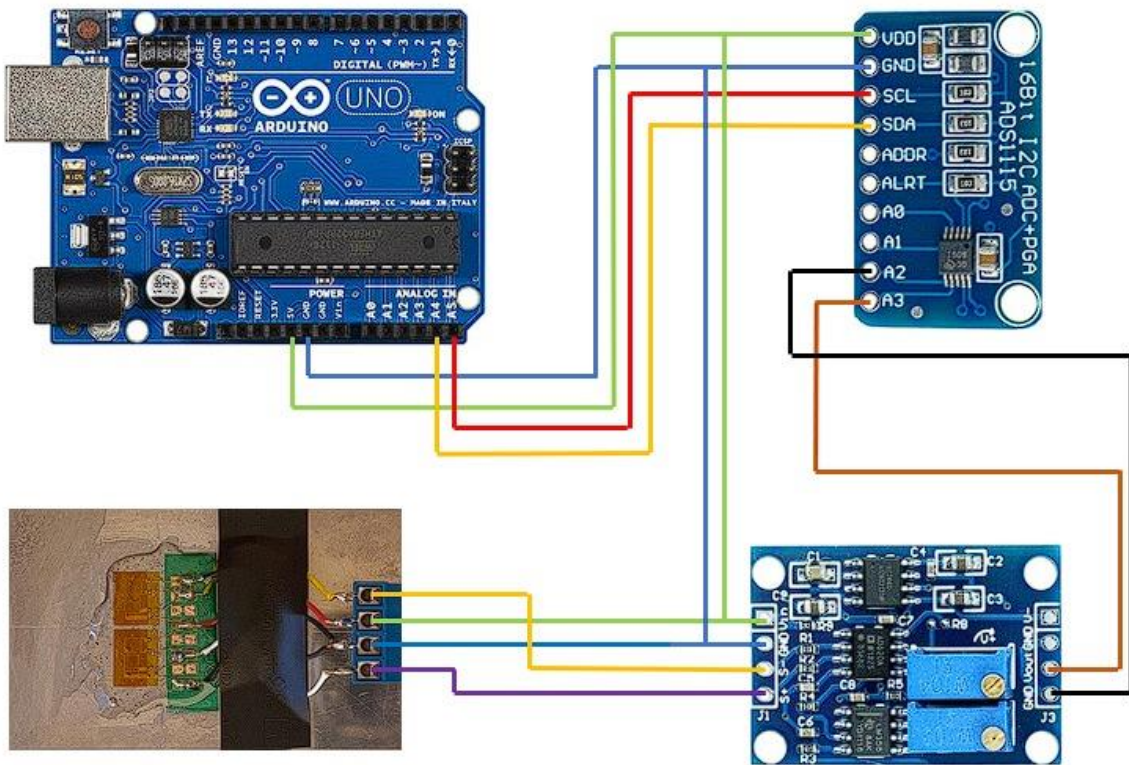


(Fonte: AUTORA, 2022)

4.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO II

O sistema de medição II é composto por um dispositivo de leitura desenvolvido através de um Arduino UNO, um módulo amplificador AD620 e um conversor ADS1115. Os dados obtidos são valores de tensão diferencial entre A+ e A-, amplificados e convertidos para um sinal digital. Utilizou-se um código para Arduino para o dispositivo digitalizar as leituras dos sinais. Na Figura 31, observa-se o esquemático do sistema de aquisição de dados. Este dispositivo possibilita obter o sinal das placas com um ganho maior e resolução menor, comparando-o com o dispositivo desenvolvido anteriormente.

Figura 31 - Esquemático do sistema de medição II

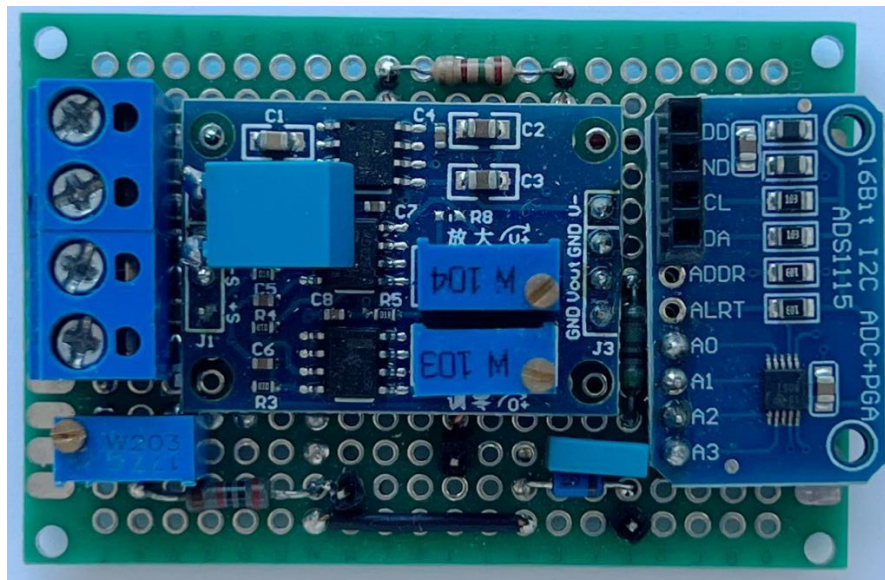


(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 32, encontra-se o módulo amplificador AD620 ligada ao conversor ADS1115. Assim, o potenciômetro W104 está ligado em paralelo a um resistor de 150 ohm e possui a função de regular o ganho do sistema, enquanto o potenciômetro W103 regula a tensão de referência. Além dos dois potenciômetros que compõe o amplificador A620, foi adicionado mais um potenciômetro com a função de balancear a Ponte de *Wheatstone* da placa com

extensômetros, para que a leitura inicial seja ajustada para zero. Assim, a tensão foi regulada para ficar próxima a 1 V, da maneira que quando a tensão da ponte variar devido à compressão da estrutura, a tensão aumente e permaneça dentro dos limites do sistema, que podem variar de 0 a 4 V. A tensão de alimentação do sistema é 5 V. No caso de a tensão ser regulada com valores próximos ao limite máximo, quando a ponte for carregada e gerar aumento de tensões, provavelmente as variações do sinal vão atingir valores que estão fora dos limites de operação e nenhuma informação poderá ser lida. Ainda, conforme especificado no referencial teórico, o ganho deste amplificador pode ser de até 10000. Contudo, para diminuir o risco de alguma ponte desbalanceada ultrapassar os limites do amplificador, o ganho foi ajustado para ser de 330 vezes. Ainda, tornou-se necessário adicionar um diodo *Schottky* para proteger a entrada do ADS1115, pois a saída do módulo AD620 pode excursionar negativa, em -5V, o que queimaria o conversor. Desta forma, o diodo permite a passagem de corrente elétrica somente no sentido positivo. Foi utilizada uma programação via IDE do Arduino baseada no modo diferencial para que a resolução seja 16 bits, conforme descrito no Apêndice B.

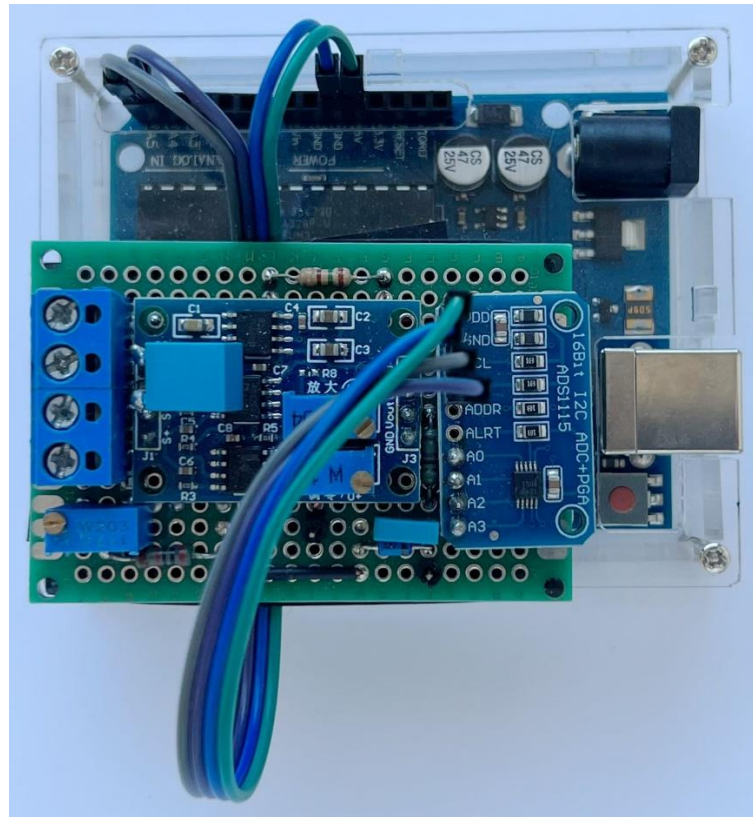
Figura 32 – Módulo Amplificador AD620 adaptado junto ao conversor ADS1115



(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 33, é possível observar a ligação da placa com o conversor e amplificador ao Arduino UNO. A partir disso, o dispositivo de leitura pode ser conectado à fonte de alimentação, que para esse trabalho foi adotada a entrada USB de um *notebook*. Desta forma, verifica-se que por meio deste método de alimentação, a tensão de entrada do sistema varia entre 4,7V e 4,9V.

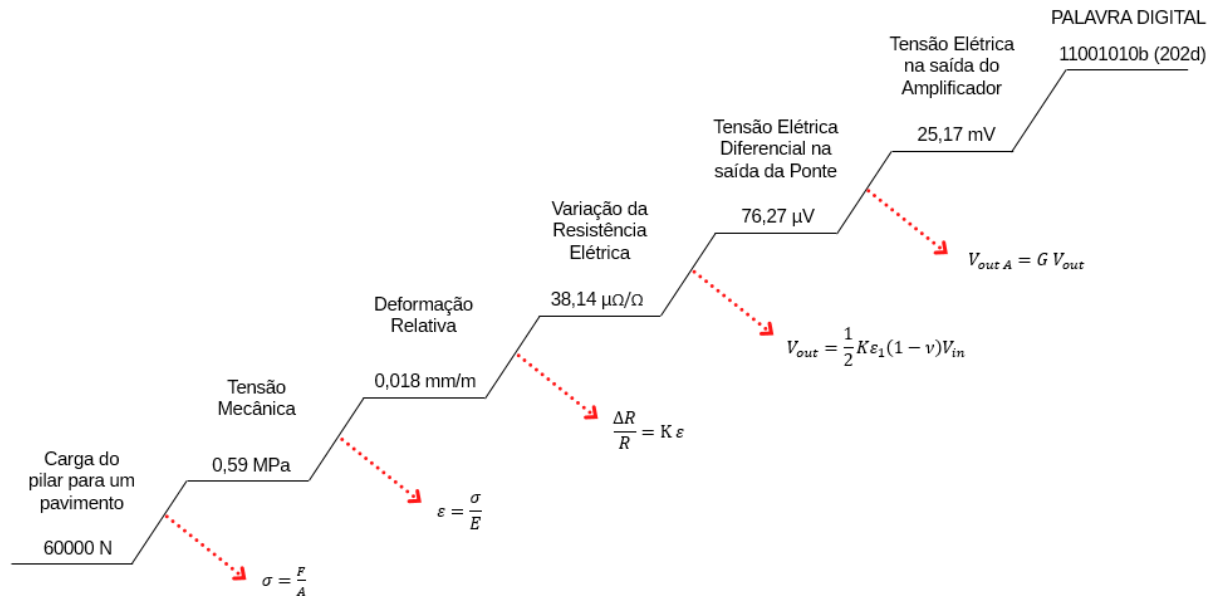
Figura 33 – Dispositivo de leituras II



(Fonte: AUTORA, 2022)

Ainda, antes de construir o dispositivo de leitura II, foi desenvolvida a cadeia de medição teórica do sistema a fim de verificar se a resolução do equipamento é suficiente para medir os níveis de deformações calculados no capítulo 2. Assim, a primeira etapa consiste na previsão das deformações que serão medidas. Através da deformação, verificou-se a variação da resistência elétrica no extensômetro e estimou-se a tensão elétrica diferencial na saída da ponte de *Wheatstone*. Então, amplificou-se o sinal e obteve-se que a tensão elétrica na saída do amplificador é 25,17 mV, a qual é convertida para uma palavra digital e representada por um número binário. Por fim, dividindo a tensão máxima pelas combinações de bytes, calculou-se que o equipamento tem resolução para ler uma variação de tensão mínima de 0,125 mV. Como a tensão elétrica na saída do amplificador é 25,17 mV, verificou-se que o equipamento tem resolução suficiente para medir as deformações dos pilares. Na Figura 34, encontra-se a cadeia de medição teórica do sistema de medição II.

Figura 34 – Cadeia de medição teórica do sistema de medição II

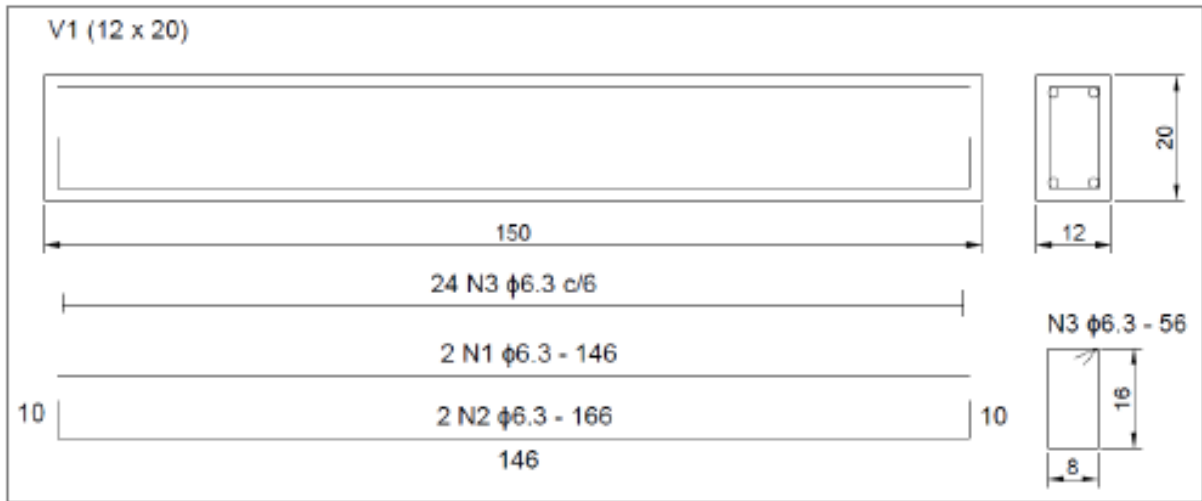


(Fonte: AUTORA, 2022)

4.3.1 Calibração comparativa

Para calibrar a placa com os extensômetros de aço com este dispositivo de leitura desenvolvido, foram realizados ensaios de flexão à quatro pontos na prensa universal do LEME, onde utilizaram-se vigas de concreto armado com resistência à compressão de 25 MPa. As dimensões adotadas para as vigas foram 150 cm de comprimento, 12 cm de base e 20 cm de altura. A execução das vigas foi realizada por uma empresa de pré-moldados. As vigas deste estudo foram produzidas para a dissertação de mestrado de Tirado (2022), que tem como objetivo analisar diferentes metodologias de incremento de ancoragem de polímeros reforçados com fibra (PRF). Portanto, além das vigas testemunho que são compostas somente por concreto armado, também foram utilizadas vigas reforçadas com PRF. O material de reforço utilizado foi manta de carbono. Tais reforços, dimensões e armaduras foram definidas por Tirado (2022). Na Figura 35, observa-se o detalhamento das armaduras das dez vigas de concreto armado adotadas para este programa experimental. As vigas foram caracterizadas como VT, VA, VD, VDA e VDB. Foram produzidas duas unidades para cada tipo de viga. Assim, as vigas VT1 e VT2, caracterizam-se por serem somente de concreto armado, conforme Figura 35. As cotas das Figuras 35 a 39 são em cm.

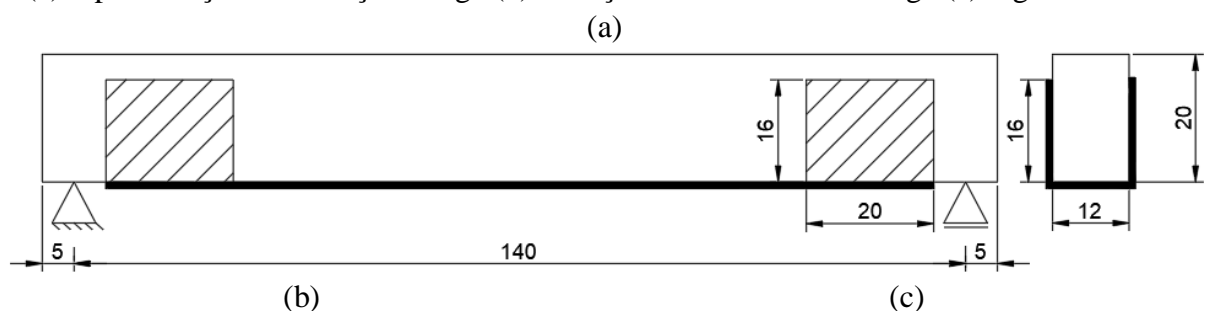
Figura 35 – Armaduras das vigas de concreto armado



(Fonte: TIRADO, 2022)

Os reforços das vigas foram executados por Tirado (2022). As vigas VA1 e VA2 caracterizam-se pela aplicação de manta e incremento de ancoragem nas extremidades do tipo laço U. Assim, possuem manta de fibra de carbono usada como reforço à flexão com resina epóxi bi-componente, com 130 cm de comprimento total de reforço e incremento de ancoragem nas duas extremidades com manta de fibra de carbono formando laço em U, onde cada laço em U é uma tira única que permite uma espécie de “confinamento”. As dimensões do laço em U são 20 cm de largura e comprimento que atinja 16 cm da altura da viga, conforme Figura 36.

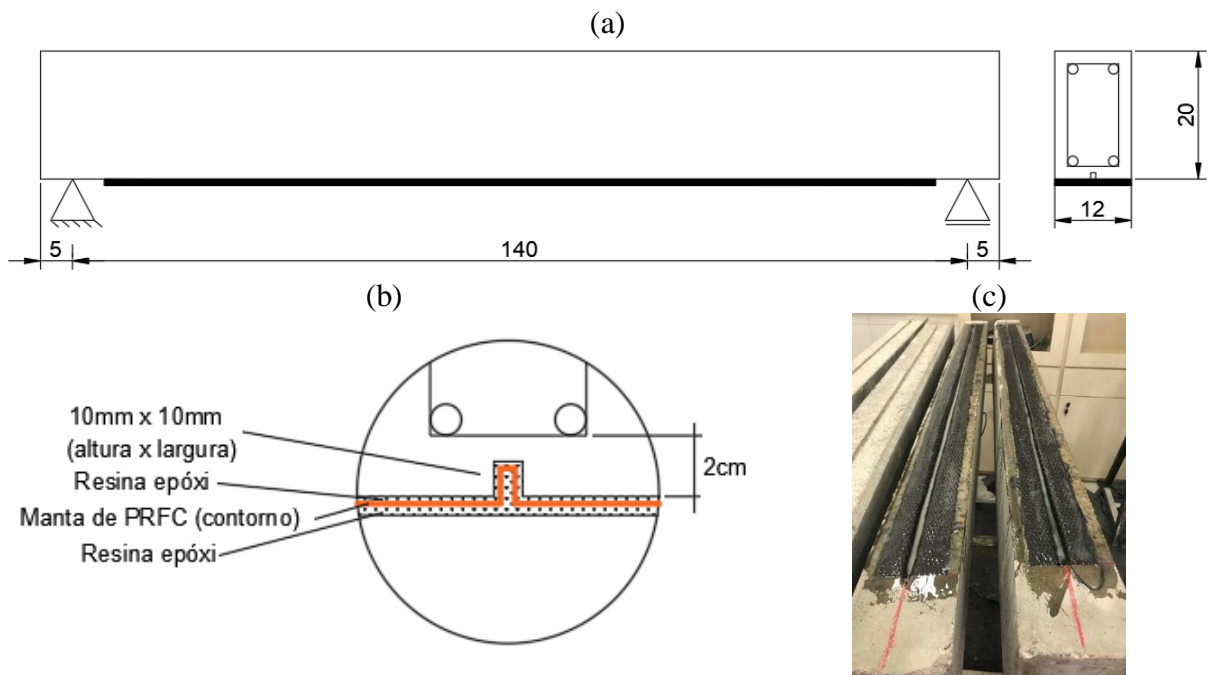
Figura 36 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U (vigas VA):
 (a) representação do reforço na viga (b) reforço na extremidade da viga (c) viga finalizada



(Fonte: TIRADO, 2022)

As vigas VD1 e VD2 caracterizam-se pela aplicação de manta e incremento de ancoragem nas extremidades do tipo ranhura EBRIG (*Externally Bonded Reinforcement In Grooves*). Assim, inicialmente faz-se as ranhuras no concreto, ao longo de todo comprimento da viga, com as dimensões especificadas na Figura 37. Em seguida, aplica-se o reforço da manta de fibra de carbono usada como reforço à flexão com resina epóxi bi componente em 130 cm de comprimento total de reforço. Contudo, o reforço vai contornar a seção interna da ranhura, conforme indicado na Figura 37.

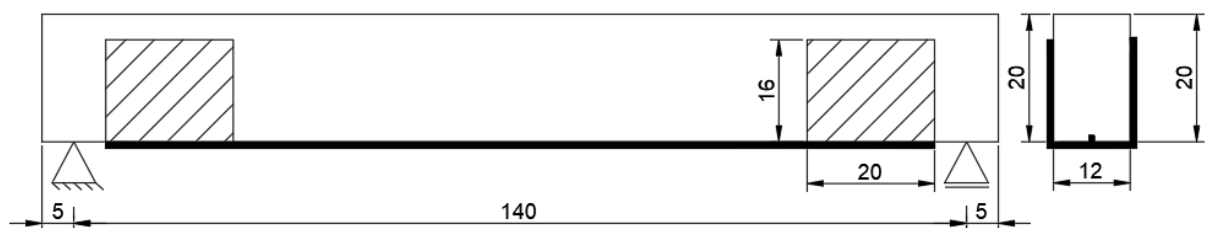
Figura 37 – Vigas com ancoragem nas extremidades do tipo ranhura EBRIG (vigas VD): (a) representação do reforço na viga (b) dimensões do reforço (c) execução do reforço



(Fonte: TIRADO, 2022)

Nas vigas VDA1 e VDA2, repete-se os processos e dimensões das vigas VA e VD. Assim, essas vigas caracterizam-se pela aplicação de manta e incremento de ancoragem nas extremidades do tipo laço U e ranhura EBRIG, conforme Figura 38.

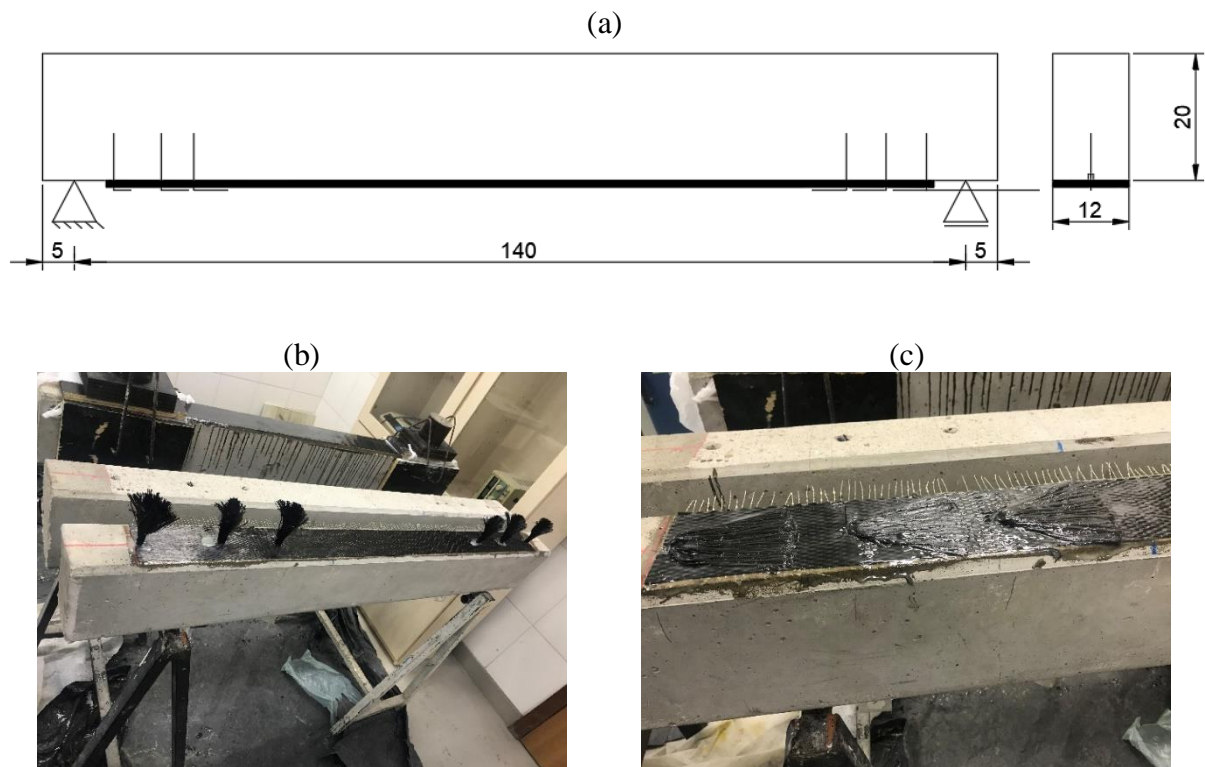
Figura 38 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U e ranhura EBRIG (vigas VDA)



(Fonte: TIRADO, 2022)

Por fim, as vigas VDB1 e VDB2, caracterizam-se pela aplicação de manta e incremento de ancoragem nas extremidades do tipo parafuso *spike* e ranhura EBRIG, conforme Figura 39. Assim, aplica-se manta de fibra de carbono usada como reforço à flexão com resina epóxi bi componente, com 130 cm de comprimento total de reforço e incremento de ancoragem nas duas extremidades usando parafusos de manta de fibra de carbono. Em cada extremidade tem-se três parafusos, posicionados na seção central da largura e dentro da região de momento fletor variável para o ensaio de flexão à quatro pontos. As dimensões do parafuso são 20 cm de comprimento e 1 cm de largura. Dos 20 cm de comprimento, 11 cm são introduzidos no interior da viga e os outros 9 cm são dobrados em cima da manta de reforço a flexão, previamente instalada, formando o incremento de ancoragem.

Figura 39 – Vigas com aplicação de ancoragem nas extremidades do tipo laço U e ranhura EBRIG (vigas VDA): (a) representação do reforço na viga (b) execução do reforço (c) reforço finalizado



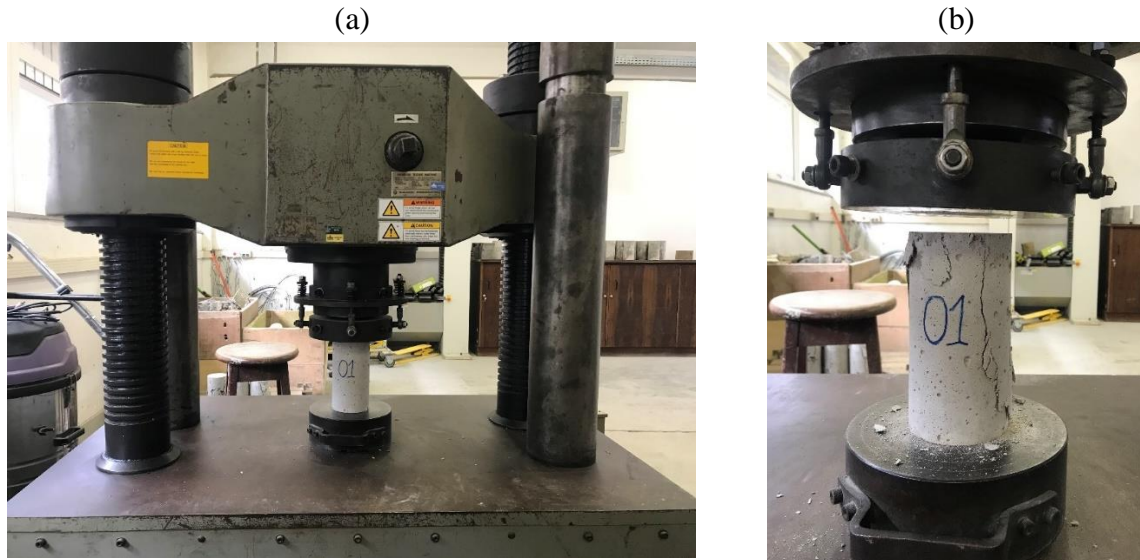
(Fonte: TIRADO, 2022)

4.3.1.1 Características dos materiais

Para caracterização dos materiais em laboratório, foram rompidos cinco corpos de prova (CPs) a fim de verificar a resistência à compressão do concreto. O ensaio ocorreu de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e obteve-se a resistência média de compressão do concreto igual a

26,2 MPa. Na Figura 40a, encontra-se um dos corpos posicionado na prensa e na Figura 40b, observa-se o mesmo corpo de prova rompido.

Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão do CP: (a) CP posicionado na prensa; (b) CP rompido



(Fonte: TIRADO, 2022)

Também foram realizados ensaios com três corpos de prova para obter o módulo de elasticidade do concreto. Tal propriedade foi verificada de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008), obtendo-se o valor médio de 25,0 GPa. Na Figura 41, pode-se observar um dos corpos de prova posicionado na prensa universal com dois LVDTs.

Figura 41 - Ensaio de módulo de elasticidade



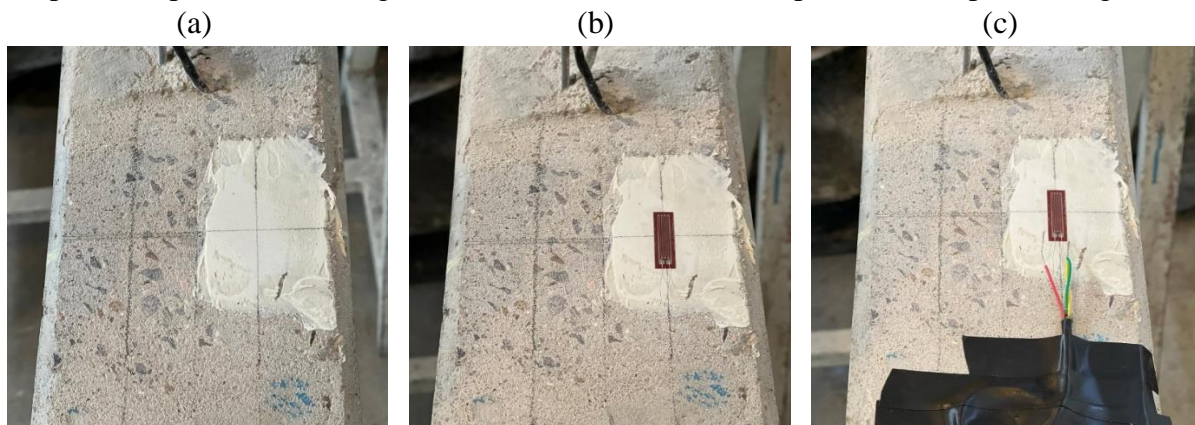
(Fonte: TIRADO, 2022)

4.3.1.2 Metodologia de instrumentação

Para determinar a deformação específica do concreto, foram fixados extensômetros de concreto próximos ao centro do vão, na face superior das vigas. Para monitorar o deslocamento vertical da estrutura de concreto armado no centro do vão, foram utilizados transdutores de deslocamento (LVDTs).

A instrumentação das vigas começou através do processo de instalação dos extensômetros fixados diretamente no concreto, conforme Figura 42. Como a face superior das vigas estava com a superfície irregular, buscou-se planificar com uma retífica e lixas, o local onde os sensores serão aderidos. Após lixar a superfície, também foi utilizada cola plástica para homogeneizar a face porosa do concreto. Depois da cura da massa plástica, pode-se então lixar novamente e limpar o local. Assim, foram traçadas linhas de referência para marcar onde colar o eixo dos extensômetros, posicionando-os sobre as linhas marcadas com uma fita adesiva. Para colar, adotou-se um adesivo instantâneo de secagem rápida, mantendo o sensor pressionado por alguns segundos. Também foram soldados os cabos aos extensômetros e verificou-se as resistências dos mesmos. Então, foi inserida fita isolante sobre o extensômetros e os cabos. Os extensômetros de concreto utilizados são da marca *Kyowa*, tipo KFG-20-120-C1-CC.

Figura 42 - Instalação dos extensômetros de concreto na viga: (a) superfície lixada e com cola plástica aplicada; (b) colagem do extensômetro; (c) cabos posicionados para soldagem



(Fonte: AUTORA, 2022)

Em seguida, foi realizada a fixação da placa com extensômetros nas vigas. Desta forma, a superfície já tinha sido homogeneizada e as linhas de referência marcadas. Assim, o local foi limpo cuidadosamente e a placa foi posicionada sobre as linhas de referência. Para colagem das placas nas vigas VT1 e VT2 utilizou-se o adesivo epóxi de secagem rápida da marca Poxipol, mantendo a placa pressionada sobre a superfície por alguns segundos. Na Figura 43,

observa-se a viga com a placa de extensômetros de aço colada ao lado de um extensômetro de concreto.

Figura 43 - Placa com extensômetros fixada na viga



(Fonte: AUTORA, 2022)

Nesta etapa, observou-se que devido a superfície irregular de algumas vigas, tornou-se necessário utilizar um adesivo estrutural que nivelasse a superfície de concreto com a placa. Desta forma, para as demais vigas, utilizou-se o adesivo estrutural Sikadur-32 com resistência à compressão ASTM D-695 de 60 MPa em 24 horas e 80 MPa em 7 dias. Na Figura 44, observa-se um dos cantos da placa distante da viga, podendo interferir nos resultados se não for corrigido.

Figura 44 – Desnível entre a superfície de concreto e a placa



(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 45, pode-se observar a superfície rugosa no terço central da viga. Na Figura 46, encontram-se os sensores fixados próximo ao centro da viga. Buscou-se posicionar o eixo horizontal dos extensômetros distantes 5 cm do centro das vigas.

Figura 45 – Terço central da viga com sensores fixados



(Fonte: AUTORA, 2022)

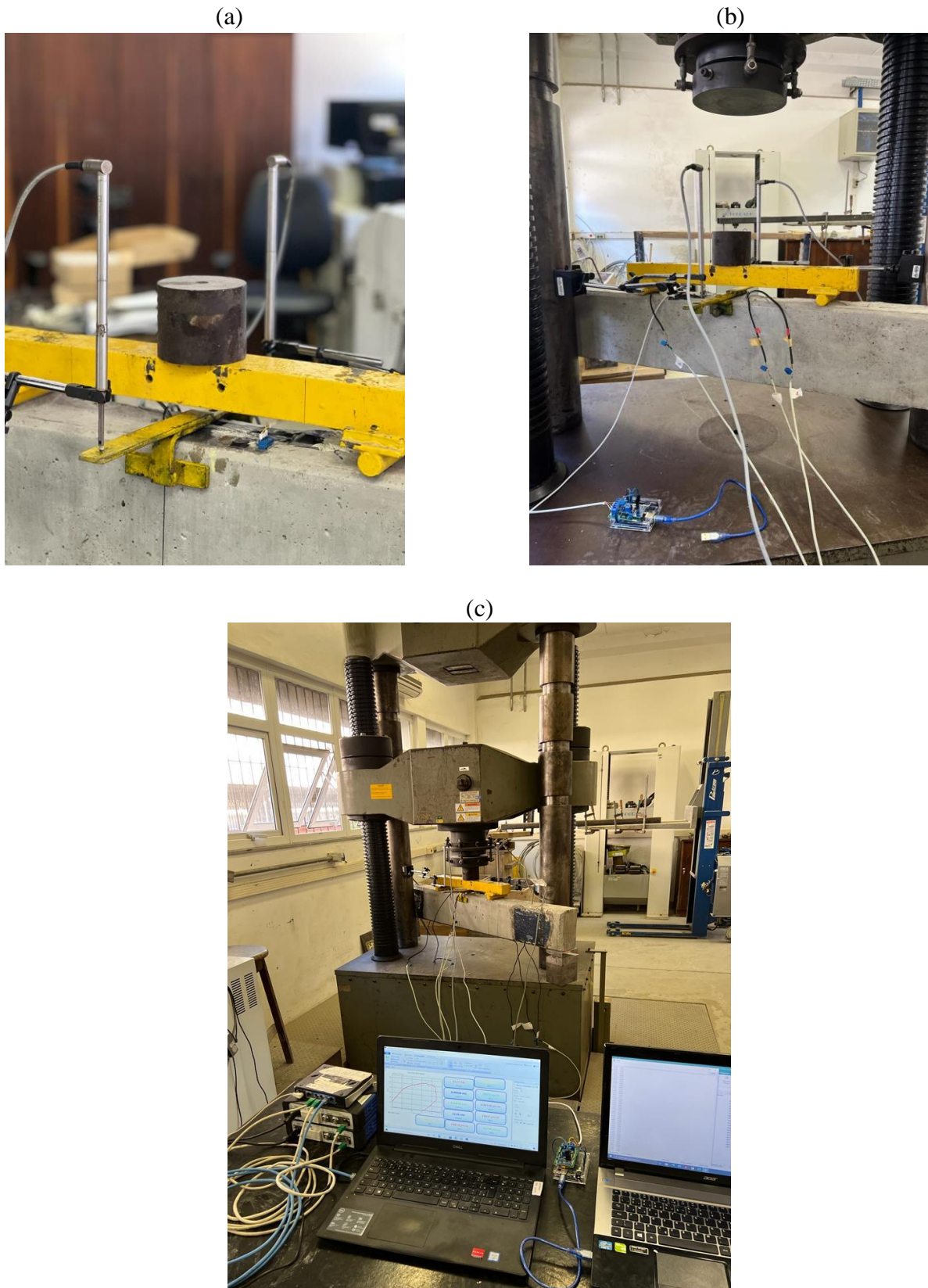
Figura 46 – Localização dos sensores fixados na viga



(Fonte: AUTORA, 2022)

Para medir as deformações das vigas, foram realizados dez ensaios onde foram aplicadas cargas até a ruptura das vigas, através da prensa universal disponível no LEME. Em todos os ensaios, a placa com extensômetros estava ligada ao dispositivo de leitura desenvolvido neste trabalho e o restante dos sensores foram ligados ao sistema de leitura de dados do LEME, composto por dois módulos do equipamento *QuantumX* MX840B, da marca HBM e *software Catman Easy*. Na Figura 47a, verificam-se a viga com dois LVDT, a placa com extensômetros e o extensômetro de concreto. Na Figura 47b, observam-se os cabos saindo dos sensores e o dispositivo de leitura desenvolvido posicionado abaixo da viga, ainda sem estar conectado ao notebook. Na Figura 47c, visualiza-se a metodologia completa do ensaio de flexão à quatro pontos das vigas, com os sensores ligados ao sistema *QuantumX*, posicionado à esquerda, e a placa com extensômetros junto com o dispositivo de leitura desenvolvido ligado no notebook, conforme posicionado à direita.

Figura 47 – Ensaio das vigas (a) viga com sensores fixados; (b) viga com a placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leituras; (c) ensaio de flexão da viga VDA1



(Fonte: AUTORA, 2022)

4.3.2 Fixação das placas em uma edificação residencial

Para o processamento e análise estrutural do edifício em estudo, foi utilizado o *software* CAD/TQS. Nesta etapa, busca-se obter as cargas verticais de peso próprio da estrutura transferidas para cada pilar. O projeto foi desenvolvido satisfazendo a norma brasileira de concreto armado NBR 6118 (ABNT, 2014), a norma brasileira de cargas para o cálculo de estruturas de edificações NBR 6120 (ABNT, 2019) e a norma brasileira de forças devidas ao vento em edificações NBR 6123 (ABNT, 1988).

A edificação é de uso residencial e localiza-se na cidade de Porto Alegre – RS. O edifício é composto pelo pavimento térreo, onze pavimentos tipo, cobertura, piso e cobertura dos reservatórios. O pé-direito do pavimento tipo é 2,80 m entre lajes, somando uma altura total do edifício de 38,45 m. Cada pavimento tipo possui três studios de 25 m² e nove apartamentos com áreas de 35 m² e 58 m². A estrutura foi dimensionada em concreto armado convencional em zona urbana. Desta forma, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a mesma possui classe de agressividade ambiental II. Assim, a resistência mínima por norma à compressão característica do concreto deve ser igual ou maior que 25 MPa, e com cobrimentos mínimos de 25 mm para as lajes, 30 mm para as vigas e pilares. Adotou-se a resistência a compressão (f_{ck}) de 35 MPa. Para resistir aos esforços de flexão e tração, os aços utilizados no dimensionamento da estrutura, foram os CA-50 e CA-60, que possuem resistência de 500 MPa e 600 MPa, respectivamente. O módulo de elasticidade secante do concreto deve ser no mínimo 29 GPa.

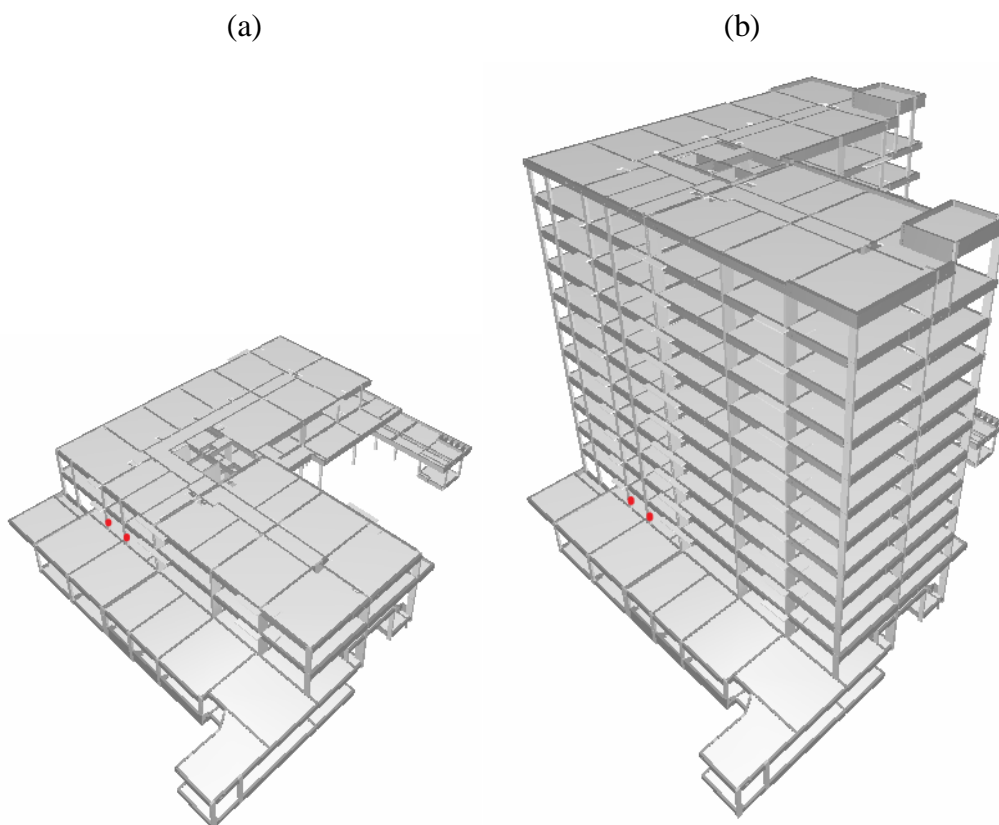
Para as lajes dos dormitórios, sala, cozinha e banheiros, os carregamentos foram definidos conforme a NBR 6120 (ABNT, 2019), com 1,0 kN/m² para cargas verticais permanentes e 1,5 kN/m² para as cargas acidentais de utilização. Já para as lajes de uso comum foi considerado 1,0 kN/m² para cargas verticais permanentes e 3,0 kN/m² para as cargas acidentais de utilização. Para as paredes foram consideradas as cargas de blocos estruturais de cerâmica, conforme especificação do fabricante. As cargas devidas ao vento sobre o edifício foram calculadas conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988), considerando os seguintes parâmetros:

- a) Velocidade Básica do Vento (V_0) = 45 m/s (Porto Alegre – RS);
- b) Fator Topográfico (S_1) = 1,0 (Terrenos planos ou fracamente acidentados);
- c) Fator (S_2) = 1,20 Categoria IV (Zona urbanizada); Classe B;

d) Fator Estatístico (S3) = 1,0 (Ocupação residencial).

O processamento estrutural do edifício foi calculado pelo modelo IV de representação estrutural do *software* CAD/TQS, que discretiza a estrutura em um modelo de pórtico espacial, composto por elementos de barras que simulam as vigas e pilares, com as lajes incorporadas através do efeito de diafragma rígido. Foram definidos alguns critérios para aceitação da estrutura, como a análise conjunta dos estados limites últimos, estados limites de serviço e os parâmetros de estabilidade global, considerando os valores sugeridos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Também, definiu-se como parâmetros de aceitação da estrutura, as taxas de armaduras dos pilares iguais ou inferiores a 4%. Na Figura 48a, encontra-se a etapa que a estrutura estava quando foram fixadas as placas nos dois pilares destacados em vermelho. Assim, a fixação das placas na edificação residencial ocorreu quando a construção da mesma estava executando o terceiro pavimento. Desta forma, o monitoramento da estrutura será referente às deformações geradas pelo peso próprio da estrutura e alvenaria do quarto pavimento até a cobertura. Na Figura 48b, tem-se a estrutura modelada até a etapa em que será finalizado o monitoramento.

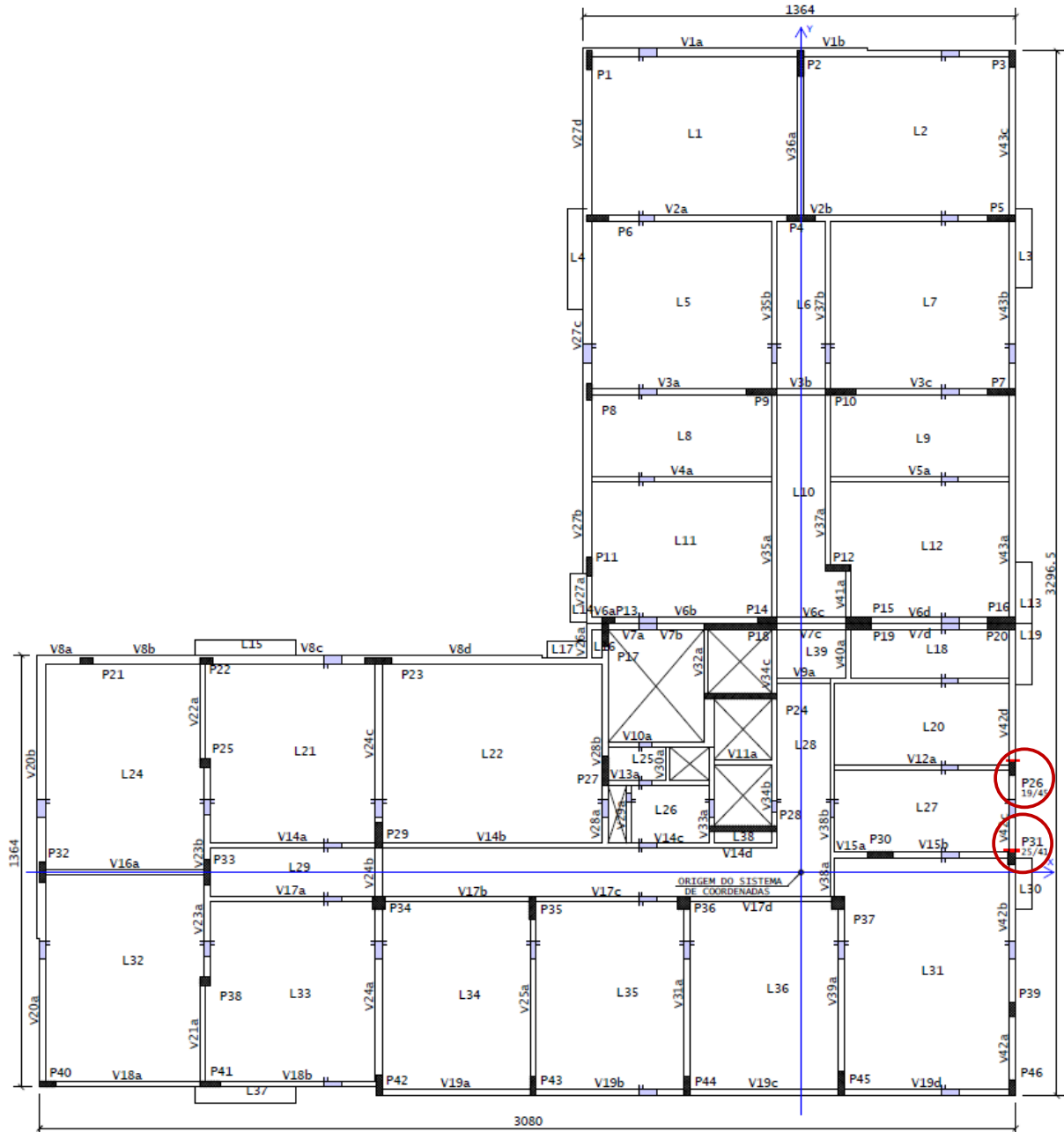
Figura 48 – Modelo 3D com marcação dos pilares instrumentados (a) estrutura modelada até o terceiro pavimento (b) estrutura modelada até a cobertura



(Fonte: AUTORA, 2022)

As placas foram coladas nos pilares na face menor do P26 e P31 do pavimento térreo, conforme destacado em vermelho na planta baixa, Figura 49. A seção transversal do pilar P26 é 19 cm x 45 cm, enquanto a do P31 é 25 cm x 41 cm. As dimensões em planta do edifício são apresentadas na figura abaixo, em cm.

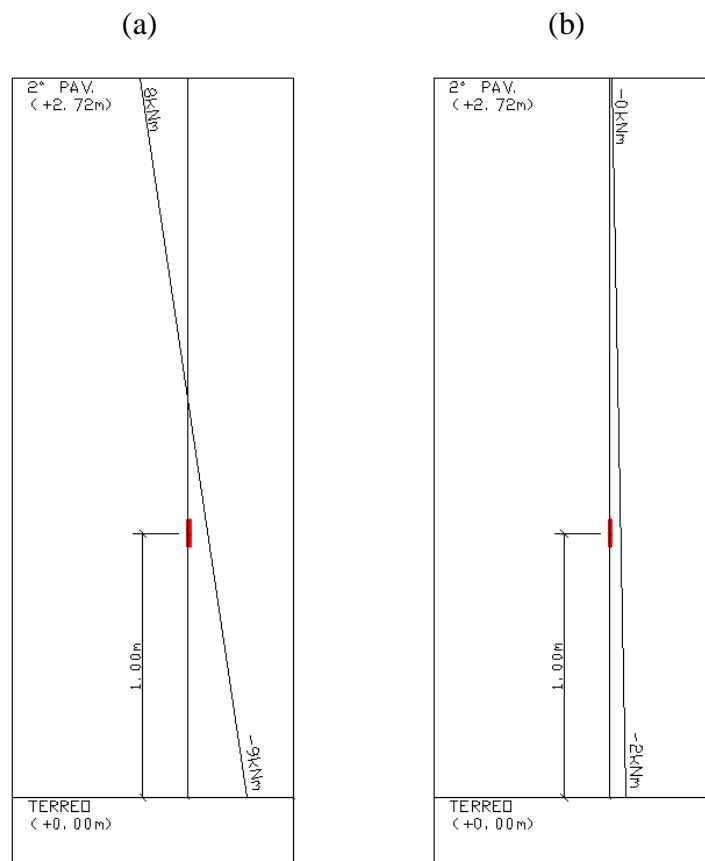
Figura 49 - Marcação dos pilares selecionados em planta baixa (dados em cm)



(Fonte: AUTORA, 2022)

Como próximo aos apoios a tensão pode não ser uniforme, as placas foram posicionadas a uma altura de aproximadamente 100 cm do piso. Ainda, através do modelo numérico verificou-se que para as cargas do peso próprio da estrutura, os momentos nesta posição são baixos e podem ser desconsiderados, a fim de que os mesmos não interfiram nas leituras. Assim, foi colada uma placa na face menor de cada pilar selecionado. Na Figura 50, observa-se os diagramas de momentos no sentido em que as placas foram fixadas, dos pilares P26 e P31, do pavimento térreo ao segundo pavimento. Em vermelho, destaca-se a altura da fixação do eixo horizontal da placa com extensômetros.

Figura 50 – Momentos e altura das placas nos pilares (a) P26 e (b) P31

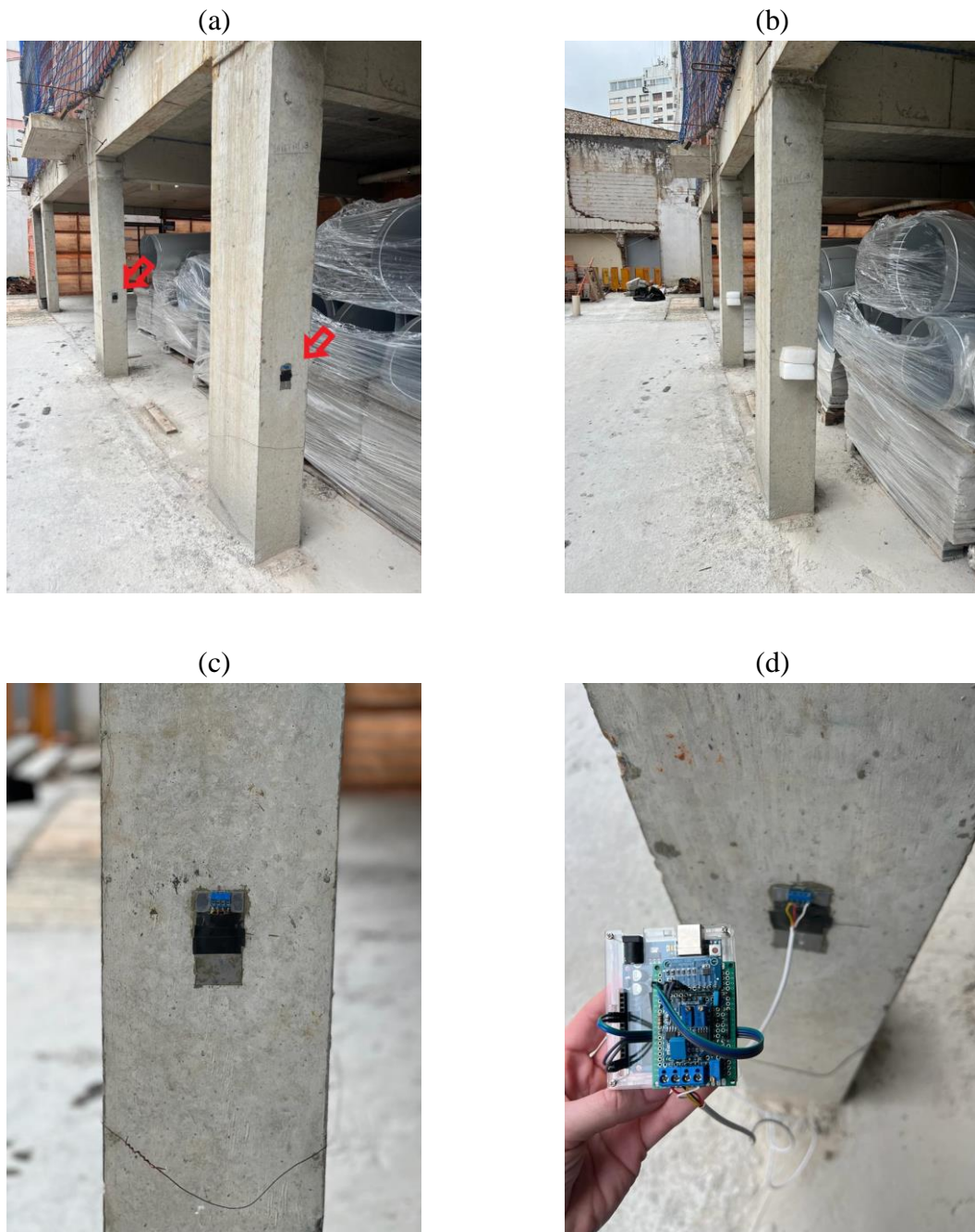


(Fonte: AUTORA, 2022)

Para aderir as placas aos pilares, foi reproduzido o mesmo processo de colagem realizado no laboratório e utilizou-se o adesivo epóxi de secagem rápida da marca Poxipol. Na Figura 51a, é possível visualizar os pilares P26 e P31 com as placas fixadas. Na Figura 51b, encontra-se as placas protegidas com uma capa de isopor, a fim de evitar danos físicos às placas e protegê-las da incidência solar. Na Figura 51c, observa-se a placa colada no pilar. Na Figura 51d, encontra-

se o dispositivo de leitura conectado através de um cabo na placa com extensômetros. Assim, para realizar as leituras, ainda conecta-se o dispositivo de leituras à um notebook, conforme descrito anteriormente.

Figura 51 – Placas fixadas nos pilares do edifício residencial (a) placas fixadas nos dois pilares (b) placas protegidas; (c) placa fixada; (d) dispositivo de leitura conectado à placa



(Fonte: AUTORA, 2022)

4.4 CUSTOS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Na Tabela 1, foi realizada a relação de custos para o desenvolvimento de uma placa com extensômetros. Conforme apresentado anteriormente, foram produzidas 17 placas ao longo deste trabalho. Na Tabela 2, foram detalhados os custos para a construção do dispositivo de leitura com o HX711, do sistema de medição I. Já na Tabela 3, encontram-se os custos do dispositivo de leitura composto pelo amplificador AD620 e conversor ADS1115, do sistema de medição II.

Tabela 1 – Relação de custos da placa com extensômetros

Descrição	Qnt.	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)	Total (US\$)
Placa inox 0,5 mm	1	2,00	2,00	0,36
Extensômetro modelo PA-06-125TG-350LEN	2	43,20	86,40	15,71
Outros componentes eletrônicos (borne KRE2, fios, cola, soldas)			10,00	1,82
Total			98,40	17,89

(Fonte: AUTORA, 2022)

Tabela 2 – Relação de custos do dispositivo de leitura I

Descrição	Qnt.	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)	Total (US\$)
Arduino UNO	1	152,00	152,00	27,64
Módulo HX711	1	19,00	19,00	3,45
Pilha 9v	1	27,00	27,00	4,91
Clips de bateria	1	1,90	1,90	0,35
Display LCD 16x2	1	54,60	54,60	9,93
Caixa plástica	1	35,00	35,00	6,36
Outros componentes eletrônicos (fios, cola, soldas)			10,00	1,82
Total			299,50	54,45

(Fonte: AUTORA, 2022)

Tabela 3 – Relação de custos do dispositivo de leitura II

Descrição	Qty.	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)	Total (US\$)
Arduino UNO	1	152,00	152,00	27,64
Módulo amplificador AD620	1	50,00	50,00	9,09
Conversor ADS1115	1	50,00	50,00	9,09
Caixa plástica	1	16,00	16,00	2,91
Outros componentes eletrônicos (borne KRE2, diodo <i>Schottky</i> , resistores, potenciômetro, cola, soldas)			25,00	4,55
Total			293,00	53,27

(Fonte: AUTORA, 2022)

A placa com extensômetros não é considerada uma alternativa de baixo custo, devido aos materiais utilizados para sua produção serem semelhantes aos utilizados convencionalmente, o objetivo do seu uso consiste na praticidade de instalação em campo. Contudo, os dois dispositivos de leitura desenvolvidos tiveram um custo de aproximadamente US\$ 54,00, gerando uma significativa vantagem econômica em comparação aos sistemas de leituras comerciais, além do simples manejo e serem portáteis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir, mantêm a sequência do capítulo anterior, partindo de testes somente com a placa com extensômetros, testes com o sistema de medição I e testes com o sistema de medição II.

5.1 ENSAIO COM A PLACA COM EXTENSÔMETROS

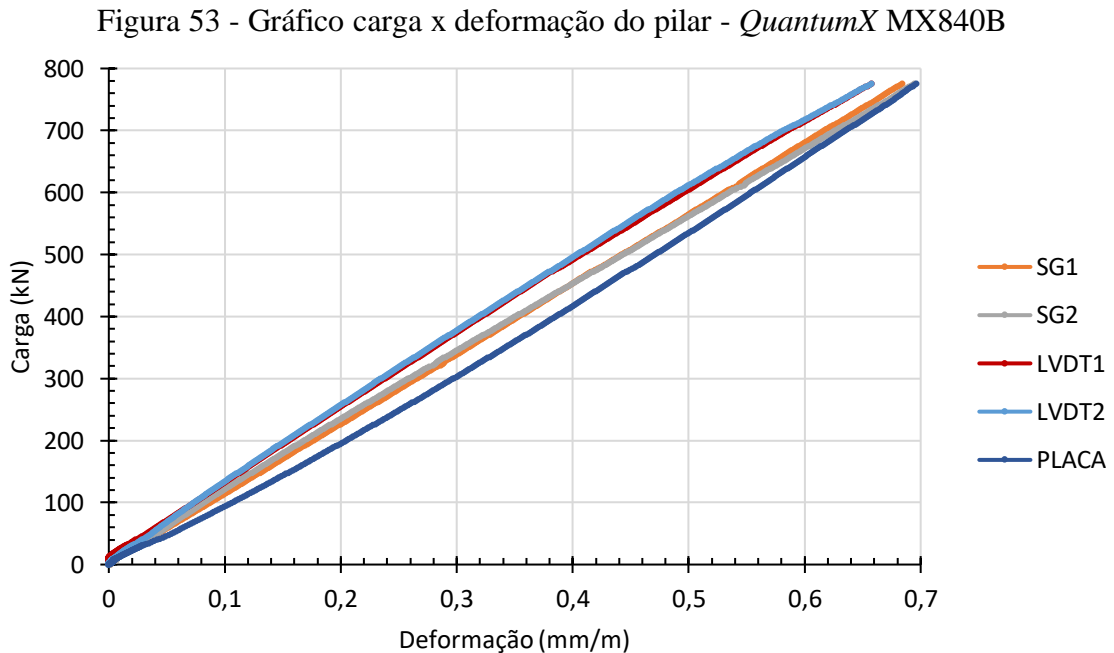
Inicialmente, foi realizado um ensaio para avaliar somente o comportamento da placa com extensômetros. Assim, os extensômetros de concreto (SG1 e SG2), LVDT 1, LVDT 2 e a placa com extensômetros foram ligados ao sistema de leitura de dados universal do LEME, composto por dois módulos do equipamento *QuantumX* MX840B, da marca HBM. Foi utilizado o *software Catman Easy* e a frequência de leitura foi 2 Hz. As cargas foram aplicadas de forma contínua, até atingir 50% da carga de ruptura dos CPS, através da prensa universal disponível no LEME. Na Figura 52, pode ser observado o pilar com os sensores e os cabos de aquisição de dados. Conforme numerado na foto, no lado esquerdo encontra-se o SG1 protegido por fita isolante e o LVDT1. Já no lado direito da placa, tem-se o SG2 protegido por fita isolante e o LVDT2.

Figura 52 - Pilar com sensores ligados ao sistema de leitura *QuantumX* MX840B



(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 53, encontra-se o gráfico carga x deformação específica do pilar e observa-se que este ensaio apresentou um comportamento similar entre todos os sensores. Desta forma, verificou-se que a placa com extensômetros apresentou o comportamento esperado. Contudo, a diferença entre as curvas pode ser corrigida através da curva de calibração obtida no ensaio da Figura 56.



(Fonte: AUTORA, 2022)

5.2 TESTES COM O SISTEMA DE MEDIÇÃO I

Através do sistema de medição I foram obtidas as deformações de um pilar de concreto armado em ensaios laboratoriais e realizado o monitoramento de seis pilares de uma edificação residencial em construção, conforme descrito no capítulo anterior. Inicialmente, foram realizados os ensaios no laboratório com finalidade de validar o sistema de medição desenvolvido e obter uma curva de calibração para as leituras realizadas no edifício em estudo.

5.2.1 DEFORMAÇÕES DO PILAR NO LABORATÓRIO

Para calibrar o sistema de medição I, foi realizado um segundo ensaio com o pilar utilizado no ensaio anterior. Assim, as cargas foram aplicadas de forma estática para que fosse possível registrar os dados do dispositivo de leitura a cada acréscimo de 50 kN, até atingir 800 kN. A

placa com extensômetros foi conectada ao dispositivo de leitura I e os extensômetros de concreto (SG1 e SG2), LVDT1 e LVDT2 foram ligados ao *QuantumX MX840B*, conforme Figura 54.

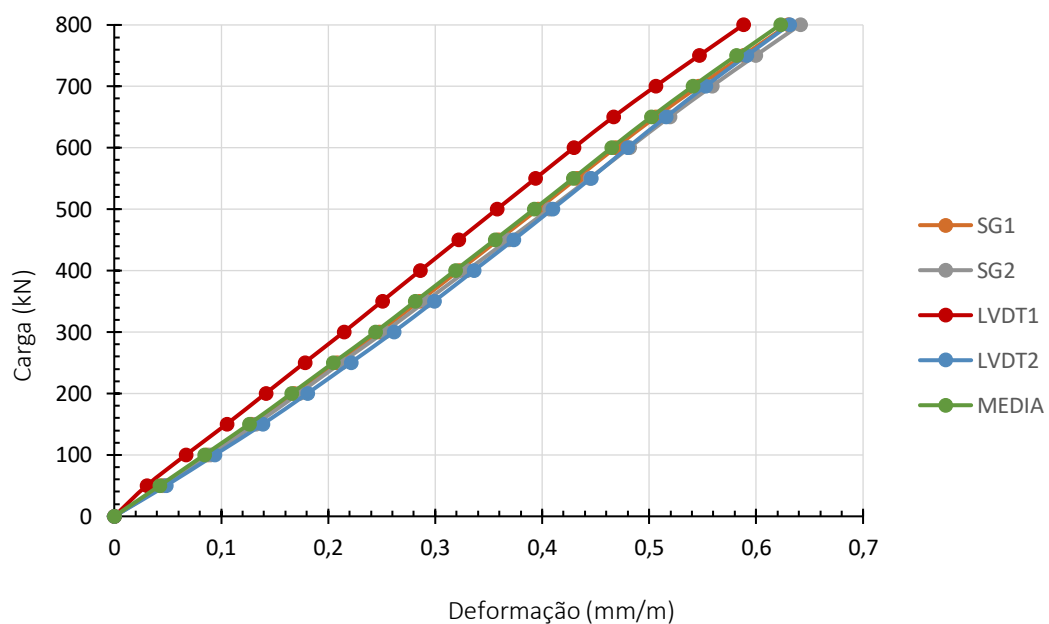
Figura 54 - Placa com extensômetros ligada ao dispositivo de leitura I



(Fonte: AUTORA, 2022)

Na Figura 55, é possível observar a curva carga x deformação para os sensores SG1, SG2, LVDT 1, LVDT 2 e a média das deformações desses quatro sensores. Os valores de deformação desta média foram utilizados no gráfico 49 para calibração do sistema.

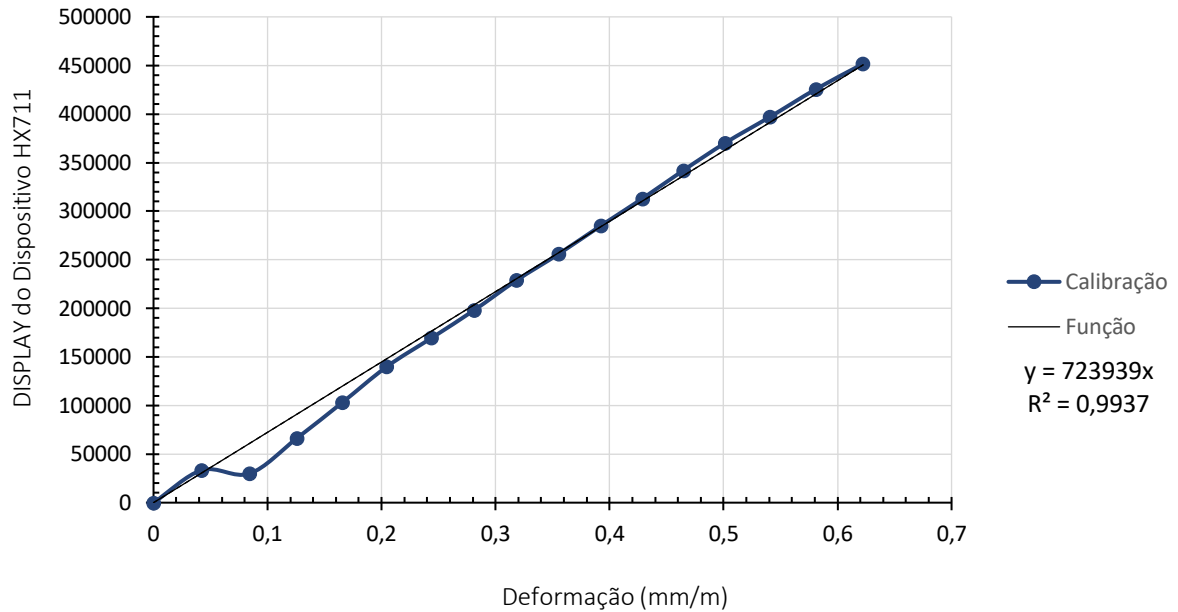
Figura 55 - Gráfico carga x deformação do pilar (Ensaio 2)



(Fonte: AUTORA, 2022)

Assim, a partir dos valores digitalizados no *display* do dispositivo de leitura I a cada acréscimo de carga de 50 kN e a média das deformações do gráfico da Figura 55, obteve-se a curva de calibração, em azul, conforme Figura 56. Através destes valores, definiu-se a função de calibração para as deformações.

Figura 56 - Curva de calibração do sistema de medição I



(Fonte: AUTORA, 2022)

5.2.2 TESTES NO EDIFÍCIO RESIDENCIAL I

Na Figura 57, encontra-se o edifício residencial onde foi realizado o monitoramento dos seis pilares através do sistema de medição I, até a estrutura atingir uma altura de 32,97 m. Contudo, o monitoramento foi realizado somente a partir da execução do quarto pavimento da edificação, conforme descrito no capítulo anterior.

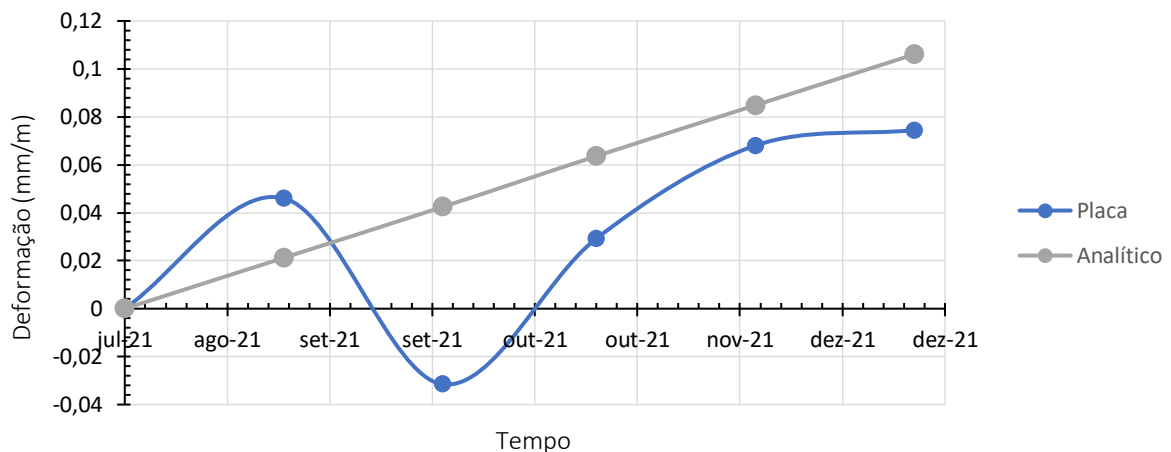
Figura 57 – Edifício residencial do sistema de medição I



(Fonte: AUTORA, 2022)

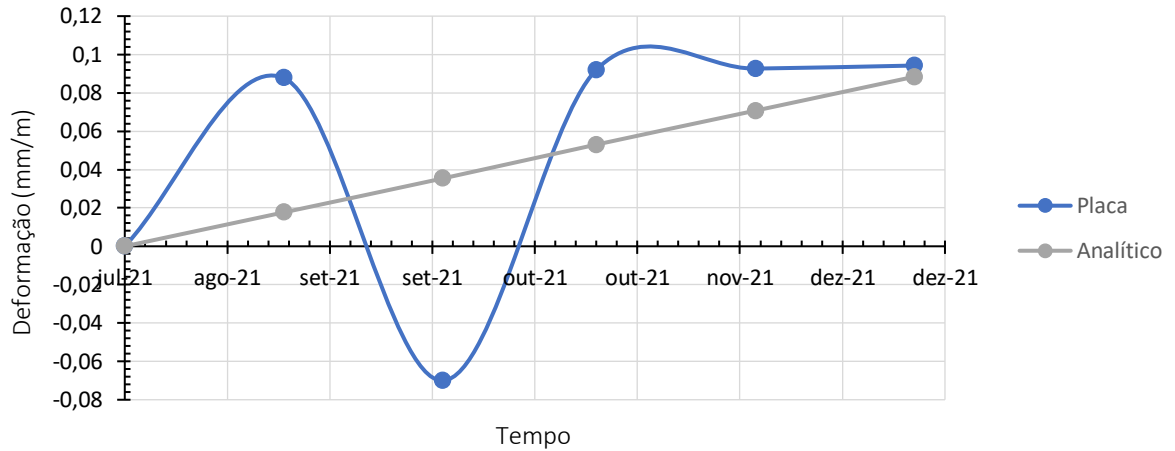
Nos gráficos das Figuras 58 a 61, encontram-se os dados obtidos ao longo dos seis meses de monitoramento dos pilares P2, P3, P6 e P8. Os dados das placas fixadas nos pilares P1 e P4 não serão apresentados pois o monitoramento dessas placas foi interrompido após as placas apresentarem falhas nas suas resistências. Os esforços de compressão são representados pelas deformações positivas. Contudo, as leituras realizadas através desse sistema de medição apresentaram valores inconclusivos devido às flutuações observadas. Assim, foi desenvolvido um novo dispositivo de leituras, que compõem o sistema de medição II.

Figura 58 – Gráfico deformação x tempo do pilar P2



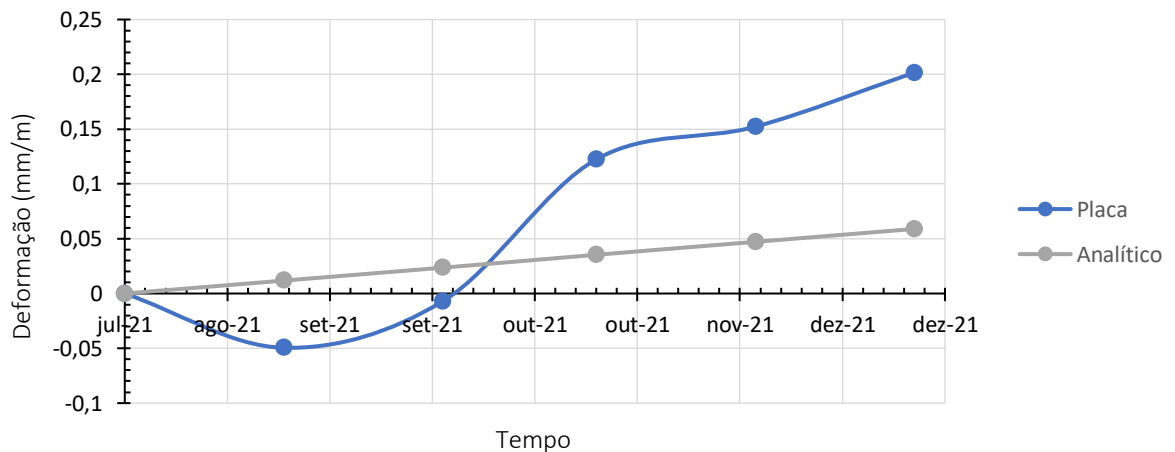
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 59 – Gráfico deformação x tempo do pilar P3



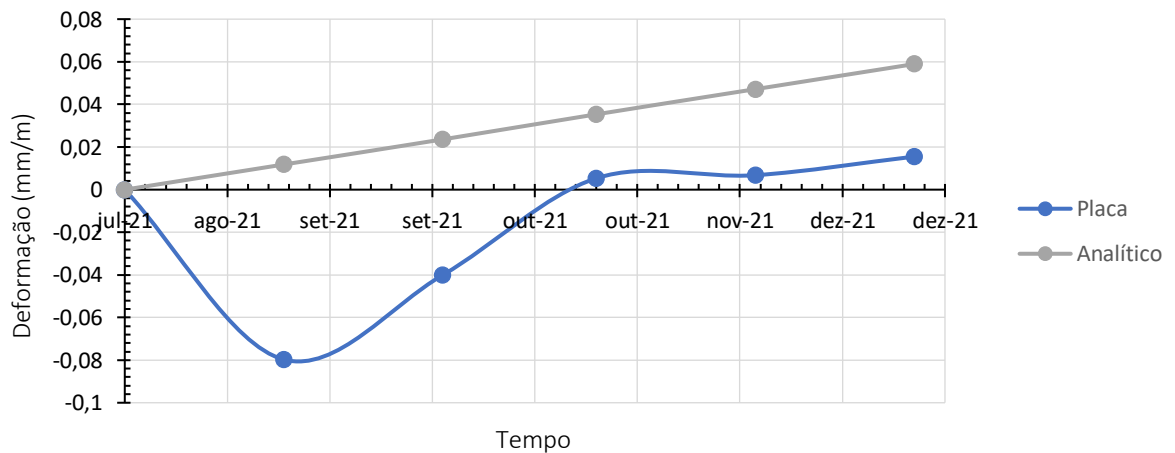
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 60 – Gráfico deformação x tempo do pilar P6



(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 61 – Gráfico deformação x tempo do pilar P8



(Fonte: AUTORA, 2022)

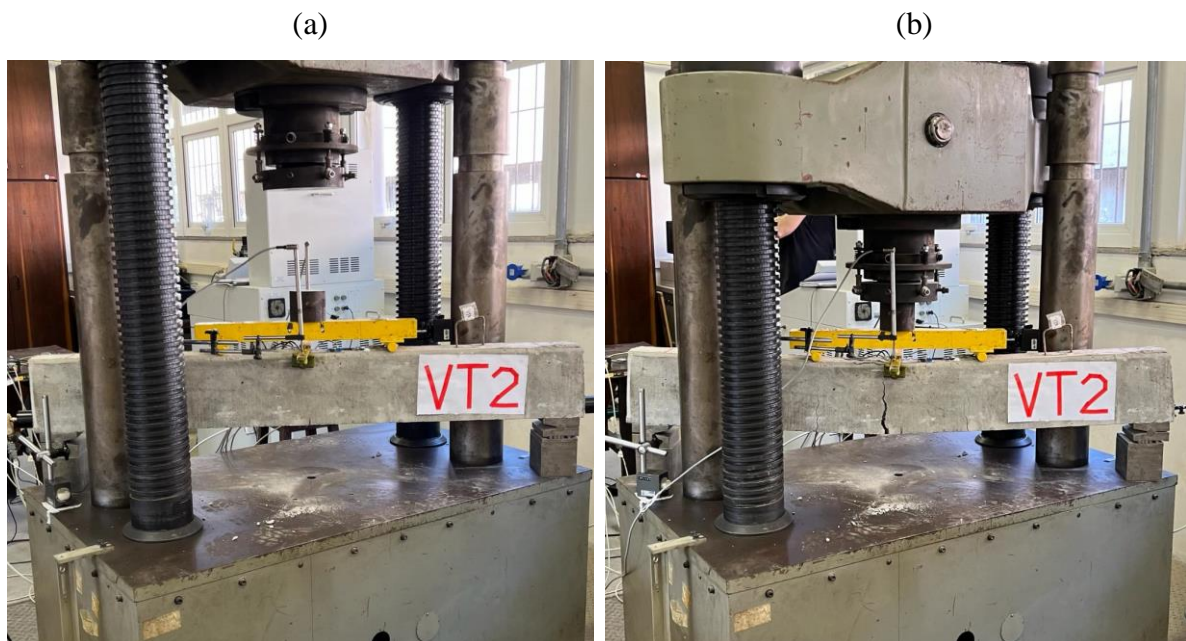
5.3 TESTES COM O SISTEMA DE MEDIÇÃO II

Através do sistema de medição II foram obtidas as deformações de vigas de concreto armado em ensaios laboratoriais e as deformações de pilares de uma edificação residencial em construção, conforme descrito no capítulo anterior. Inicialmente, foram realizados os ensaios com as vigas de concreto armado com finalidade de validar o sistema de medição desenvolvido e obter uma calibração comparativa para as leituras realizadas no monitoramento dos pilares do edifício em estudo.

5.3.1 DEFORMAÇÕES DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Os ensaios de flexão à quatro pontos nas vigas de concreto armado foram realizados com a aquisição de dados simultânea de um extensômetro (SG1) fixado diretamente na superfície de concreto e a placa com extensômetros, lidos respectivamente pelo *QuantumX* MX840B e pelo sistema de medição desenvolvido. Tais leituras foram realizadas com uma taxa de amostragem de 5 Hz, ou seja, cinco leituras por segundos. Na Figura 62a, encontra-se a viga VT2 posicionada na prensa antes de iniciar o ensaio. Na Figura 62b, verifica-se a viga VT2 rompida.

Figura 62 – Ensaio de flexão à quatro pontos nas vigas (a) VT2 antes do ensaio (b) VT2 rompida



(Fonte: AUTORA, 2022)

Conforme descrito anteriormente, todas as vigas foram produzidas com f_{cm} de 26,2 MPa, sendo as vigas VT1 e VT2 compostas somente por concreto armado e as demais vigas possuem reforço de manta de carbono, variando os tipos de ancoragem. Nesta etapa, buscou-se medir principalmente as deformações elásticas das vigas (até o limite entre o Estádio I e II) e verificar se o dispositivo de leitura possui sensibilidade suficiente para ler as pequenas deformações que pretende-se medir nos pilares dos edifícios residenciais, onde os níveis de deformações variam de 0,018 mm/m a 0,14 mm/m. Na Tabela 4, são apresentadas as cargas máximas, o momento máximo, as deformações máximas do Estádio I para o SG1 e a placa com extensômetros e as deformações máximas medidas no SG1 e placa, obtidas nos ensaios das dez vigas. Assim, comparando as deformações máximas no Estádio I do SG1 e da placa, observa-se que as placas fixadas em todas as vigas acompanharam as deformações elásticas, conforme destacado em vermelho.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios com as vigas

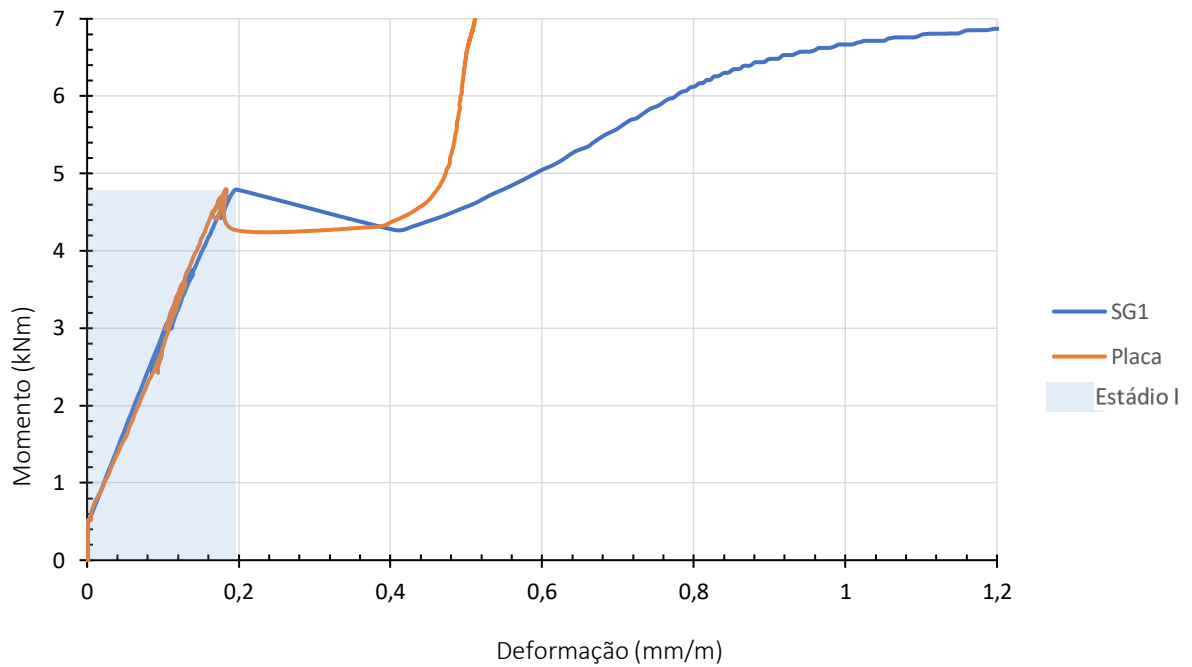
	VT1	VT2	VA1	VA2	VD1	VD2	VDA1	VDA2	VDB1	VDB2
Carga máx. (kN)	32,89	29,42	55,46	56,79	60,16	60,16	54,73	52,36	47,97	41,28
Momento máx. (kNm)	7,73	6,91	13,03	13,35	14,14	14,14	12,86	12,30	11,27	9,70
ϵ máx. Est. I SG1 (mm/m)	0,19	0,12	0,13	0,14	0,16	0,10	0,18	0,12	0,17	0,14
ϵ máx. Est. I Placa (mm/m)	0,18	0,11	0,13	0,15	0,15	0,10	0,16	0,13	0,17	0,15
ϵ máx. SG1 (mm/m)	2,39	2,11	1,59	1,57	1,31	1,22	1,65	2,05	1,92	1,14
ϵ máx. Placa (mm/m)	0,48	0,69	0,84	1,01	0,79	0,38	0,29	1,96	1,10	0,90

(Fonte: AUTORA, 2022)

Nos gráficos das Figuras 63 a 72, são apresentadas as deformações obtidas pelo SG1 e pela Placa para as dez vigas ensaiadas e comparam-se as deformações obtidas através dos dois sistemas de aquisição de dados. Os valores máximos de deformação dos gráficos foram definidos através das deformações máximas obtidas nas placas, conforme descritas na tabela anterior. Observa-se que nas vigas VT1 e VT2, apesar de possuírem as mesmas características, houve significativa diferença nos resultados ao longo dos ensaios, pois não obteve-se deformações para a VT1 nas cargas iniciais, conforme ilustrado nas Figuras 63 e 64. Já as placas das vigas VA1 e VA2 apresentaram uma resposta mais satisfatória e foram reaproveitadas, da forma que também foram fixadas nas vigas VDB1 e VDB2, apresentando uma resposta eficiente novamente, pelo fato de ultrapassarem as deformações elásticas e atingirem deformações de aproximadamente 0,90 mm/m, conforme Figuras 65, 66, 71 e 72. Ao analisar o comportamento das placas nas vigas VD1, VD2, VDA1 e VDA2, destaca-se o comportamento da placa VDA2 que atingiu o valor mais alto para as deformações das dez placas, conforme

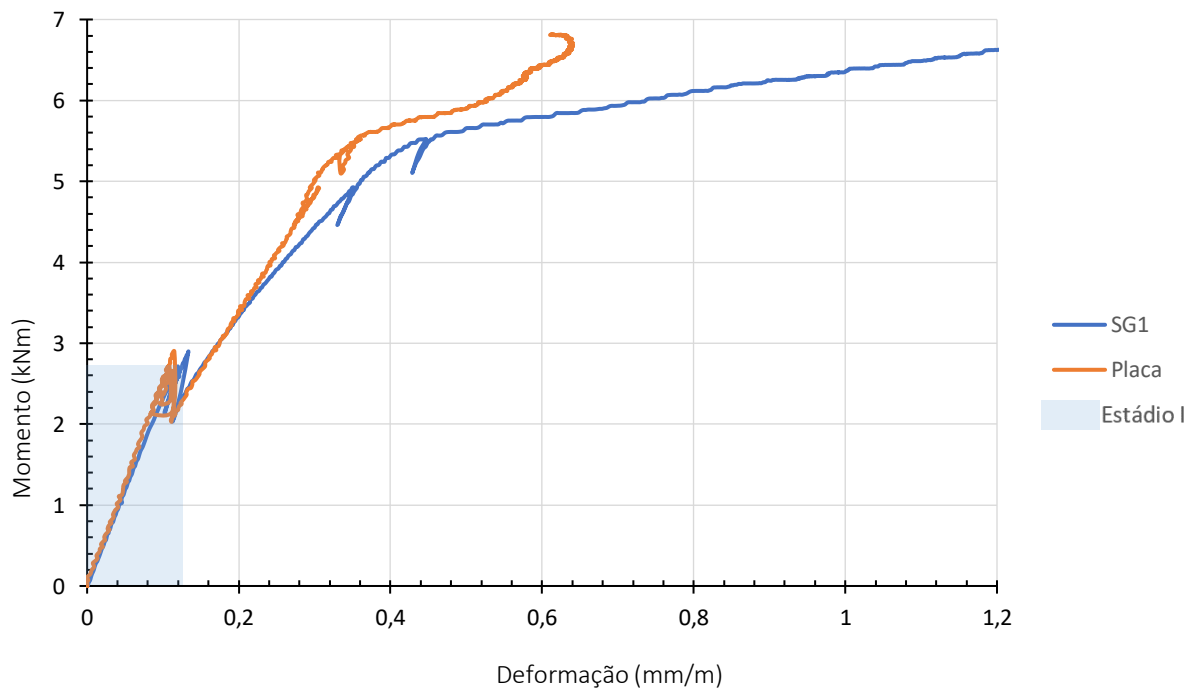
Figuras 67 a 70. Ainda, foi destacado nos gráficos o trecho referente ao Estádio I, observando-se que em muitas das vigas também houve uma continuidade no acompanhamento do ensaio no momento pós-fissuração.

Figura 63 – Gráfico momento x deformação da viga VT1



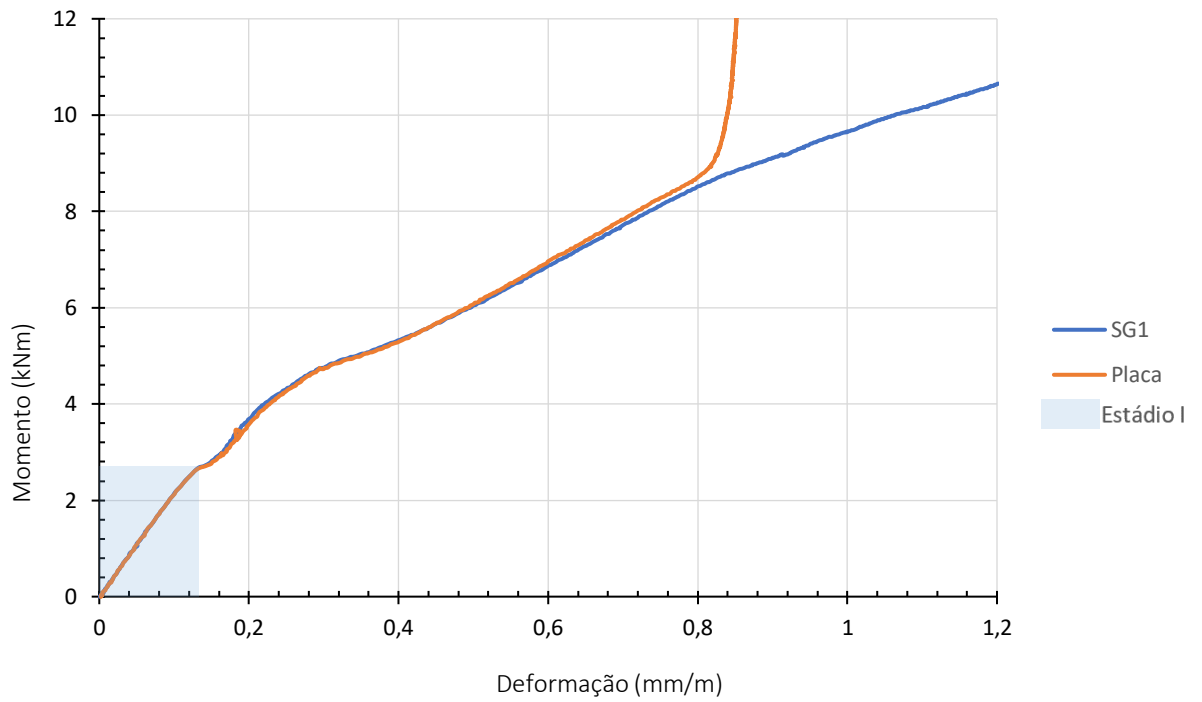
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 64 – Gráfico momento x deformação da viga VT2



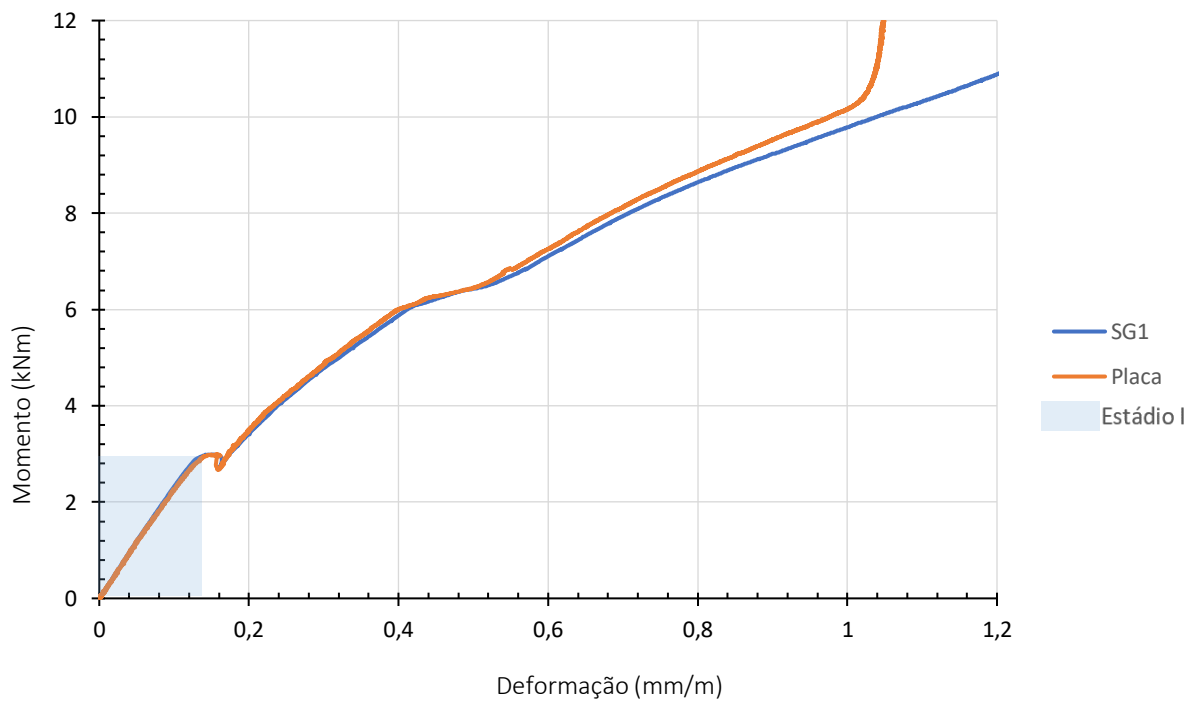
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 65 – Gráfico momento x deformação da viga VA1



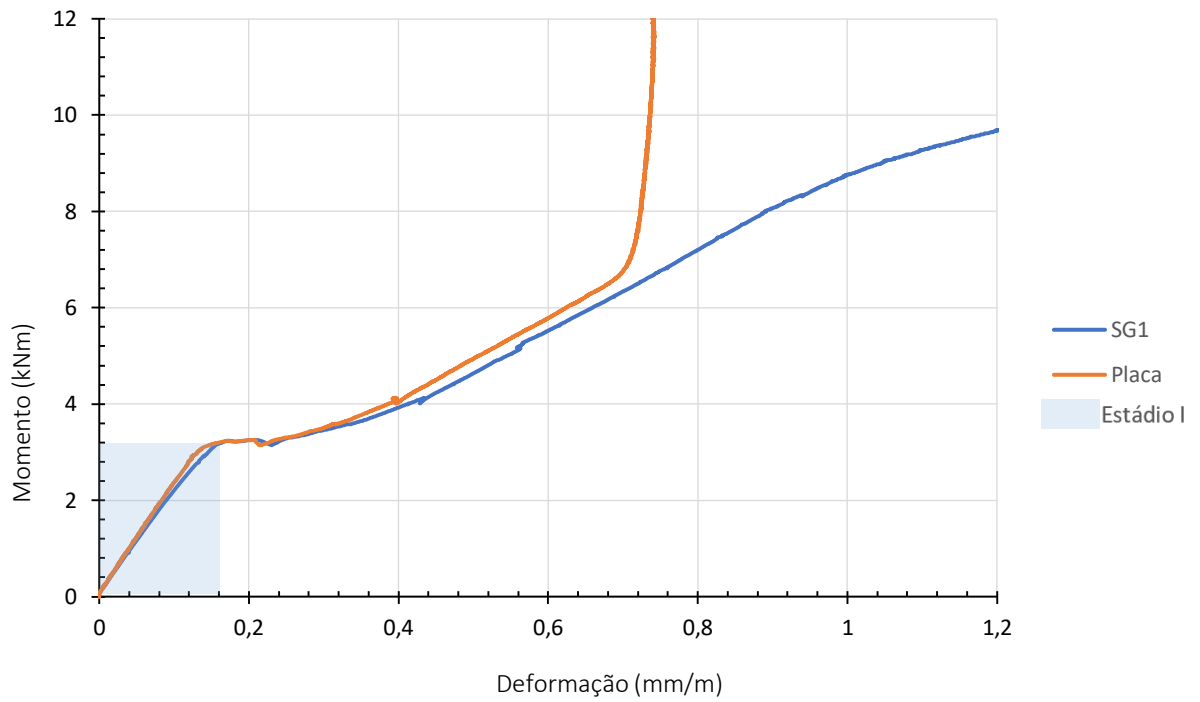
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 66 – Gráfico momento x deformação da viga VA2



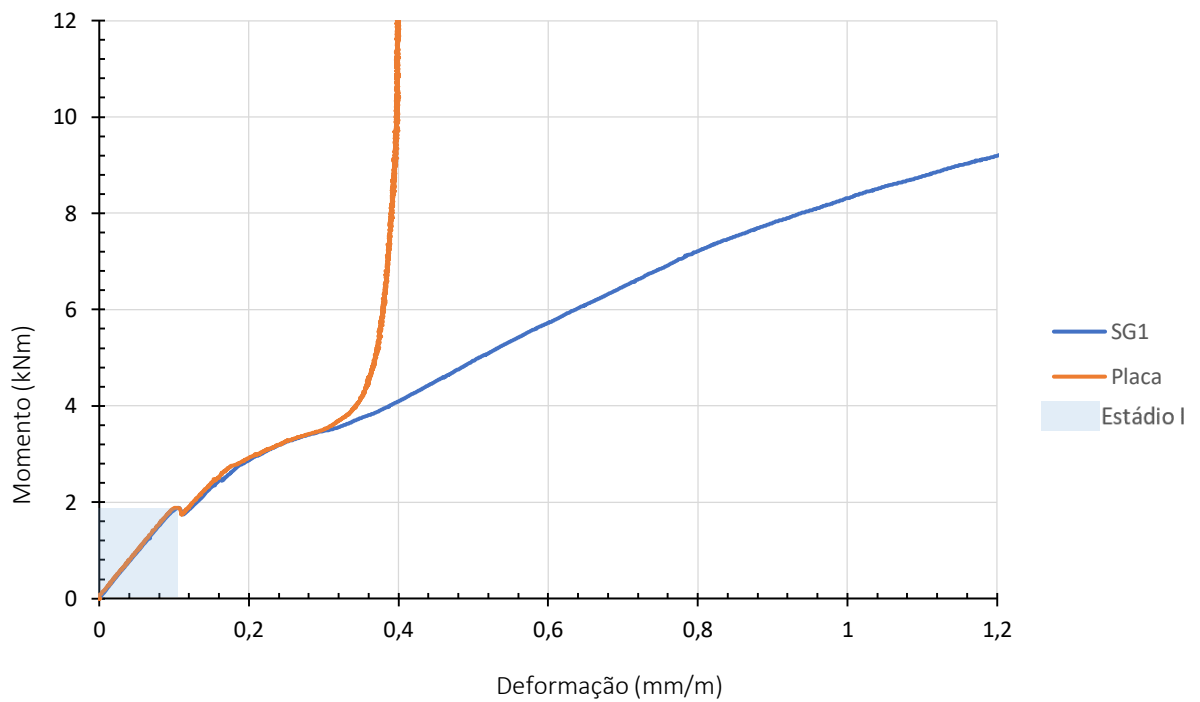
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 67 – Gráfico momento x deformação da viga VD1



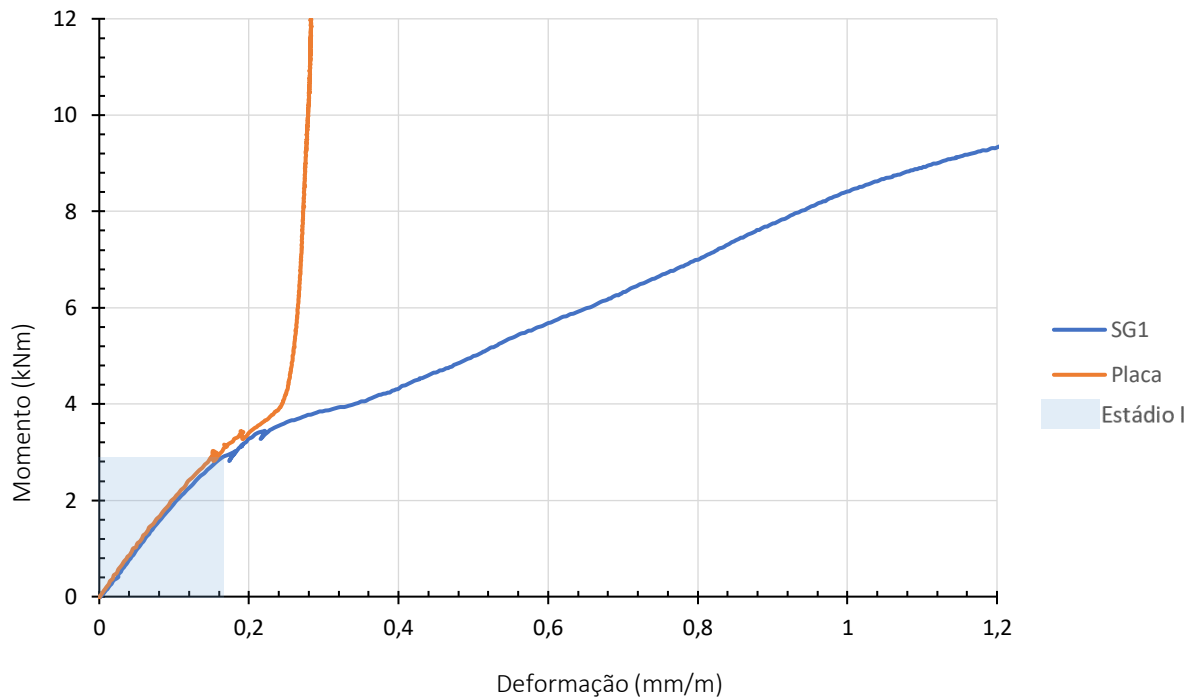
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 68 – Gráfico momento x deformação da viga VD2



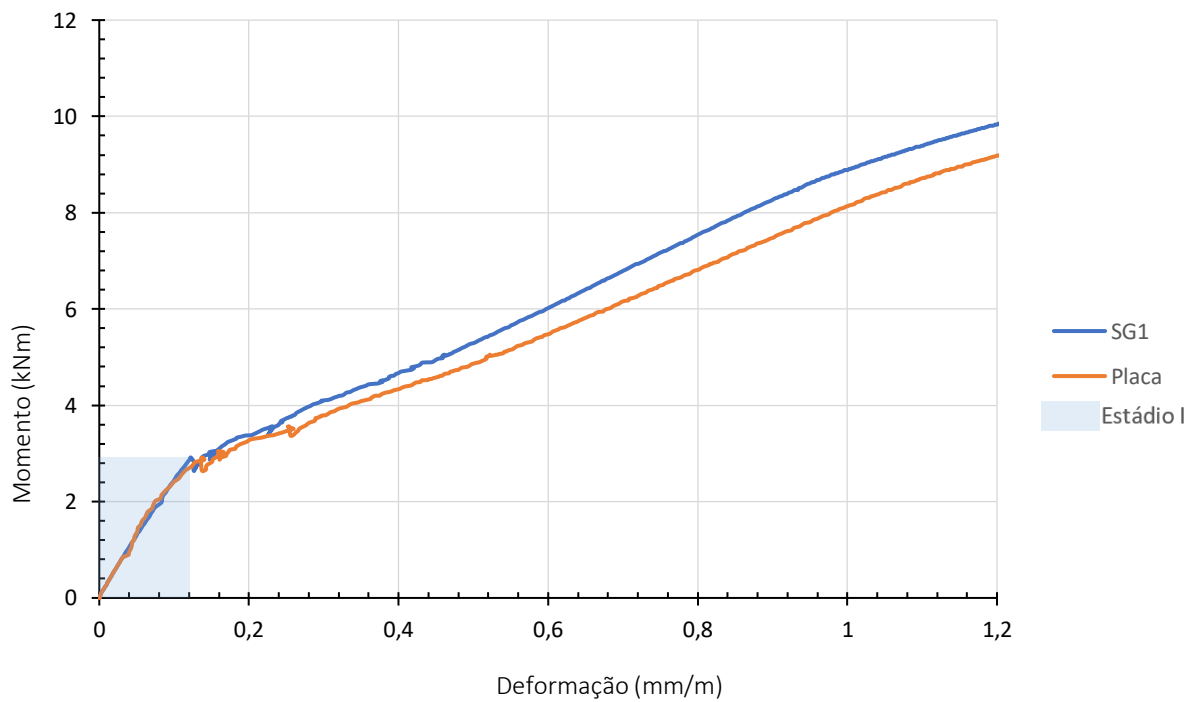
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 69 – Gráfico momento x deformação da viga VDA1



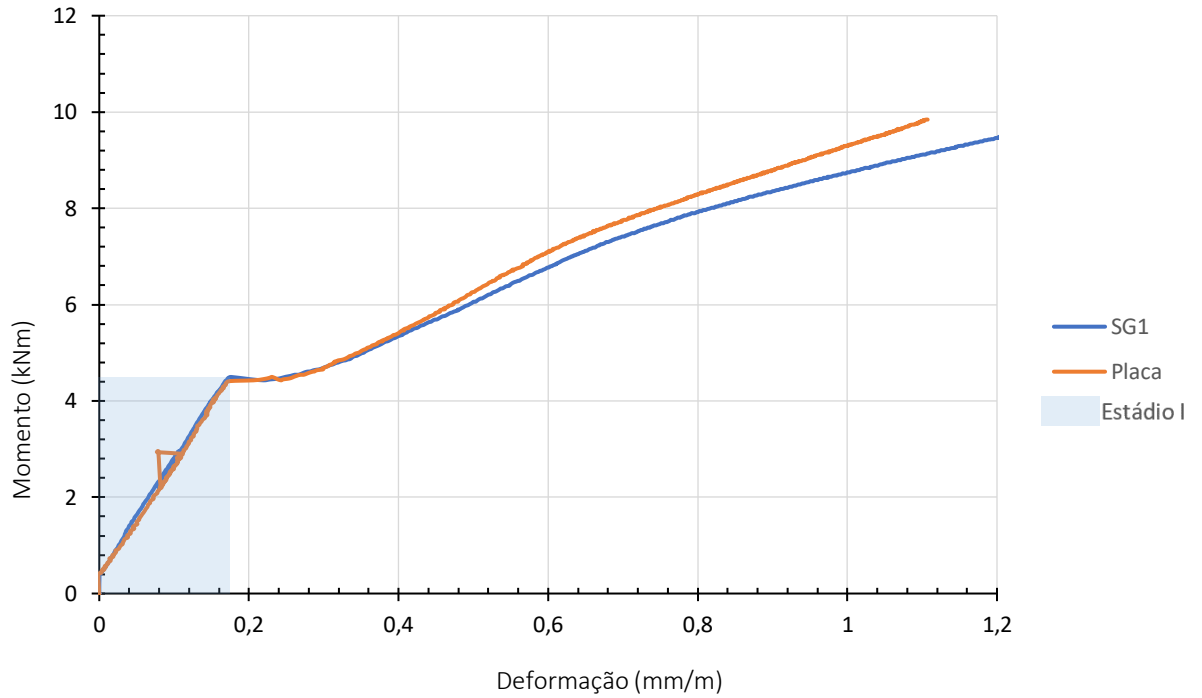
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 70 – Gráfico momento x deformação da viga VDA2



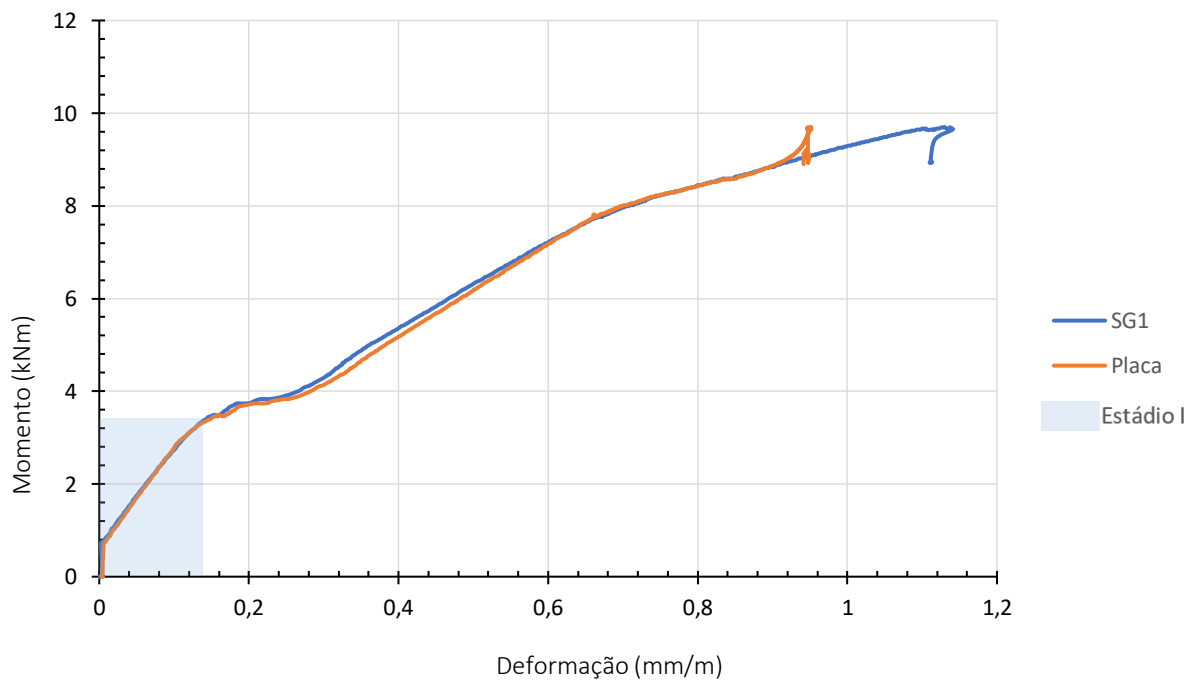
(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 71 – Gráfico momento x deformação da viga VDB1



(Fonte: AUTORA, 2022)

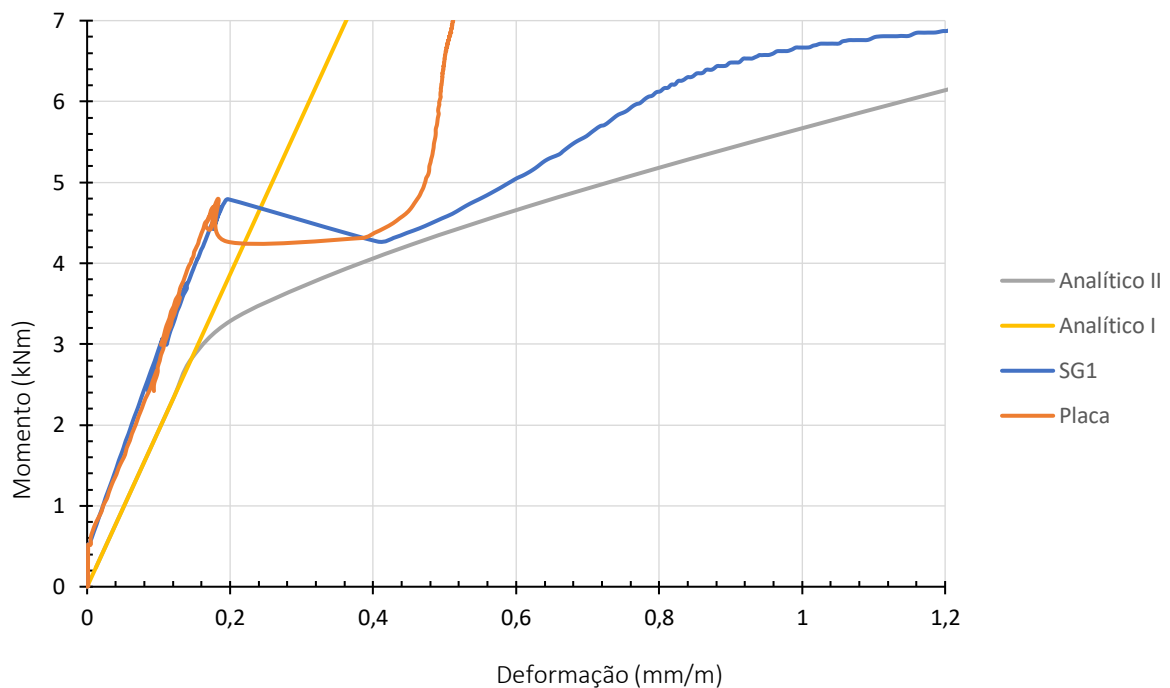
Figura 72 – Gráfico momento x deformação da viga VDB2



(Fonte: AUTORA, 2022)

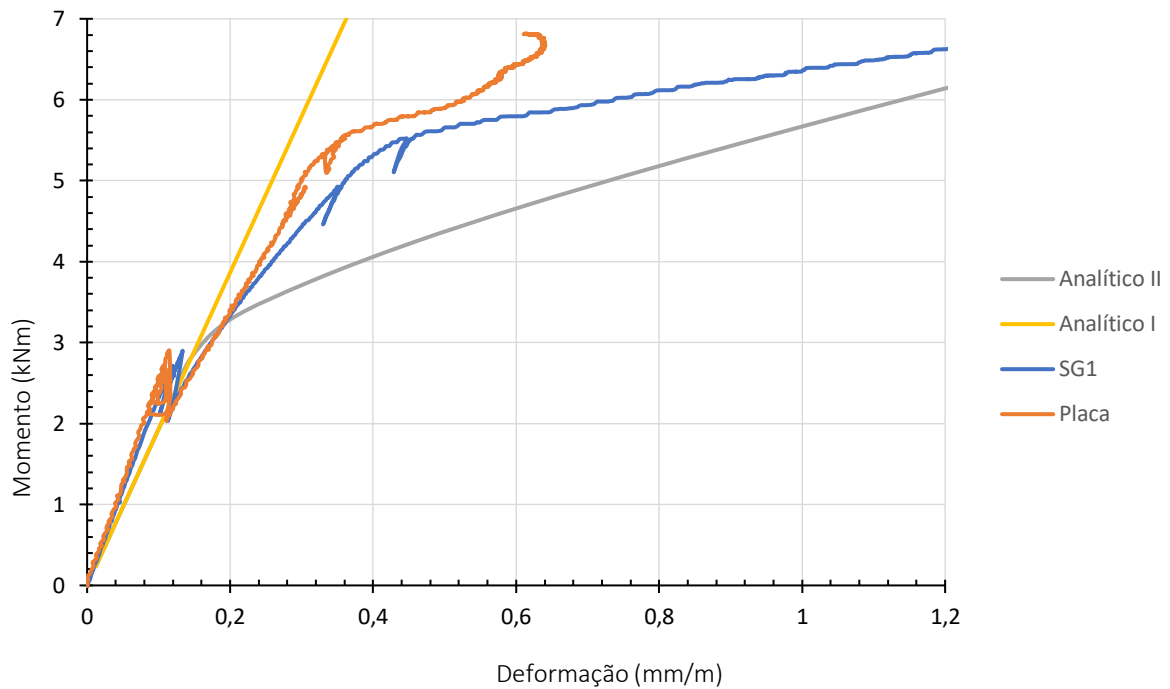
Também foram determinadas analiticamente as deformações específicas para as vigas testemunho de concreto armado, VT1 e VT2. Os cálculos foram realizados através das equações descritas no capítulo 2 e foi considerado f_{ck} de 25 MPa. No gráfico da Figura 73 e 74, observa-se a comparação entre as deformações analíticas e experimentais para as vigas VT1 e VT2. A curva Analítico I, representa o cálculo realizado através da Equação 4 do Capítulo 2, considerando inércia bruta para a seção, ou seja, somente o Estádio I. A curva Analítico II, representa o Estádio I até atingir o momento de fissuração (Equação 7) e em seguida o Estádio II, considerando a rigidez equivalente para a seção, conforme a Equação 10. Para a viga VT1, constatou-se que houve alguma falha ao longo do ensaio e o comportamento da viga não ocorreu conforme o esperado. Já para a viga VT2, encontra-se correspondência entre os dados experimentais e os valores analíticos.

Figura 73 – Gráfico momento x deformação da viga VT1 com modelo analítico



(Fonte: AUTORA, 2022)

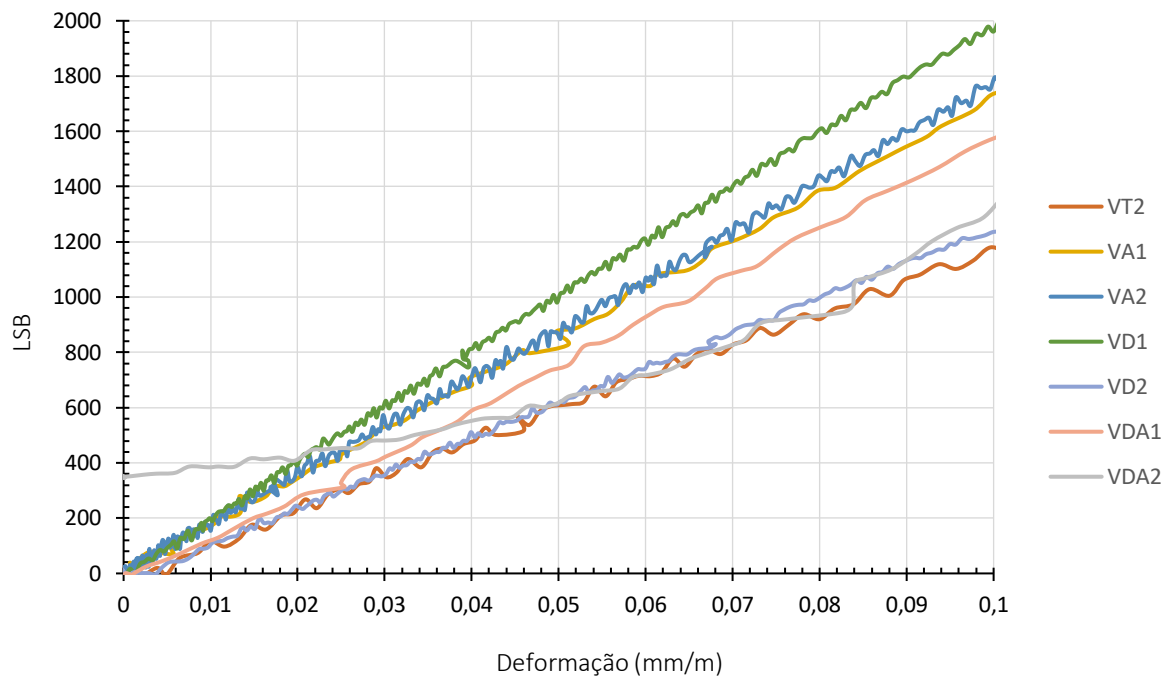
Figura 74 – Gráfico momento x deformação da viga VT2 com modelo analítico



(Fonte: AUTORA, 2022)

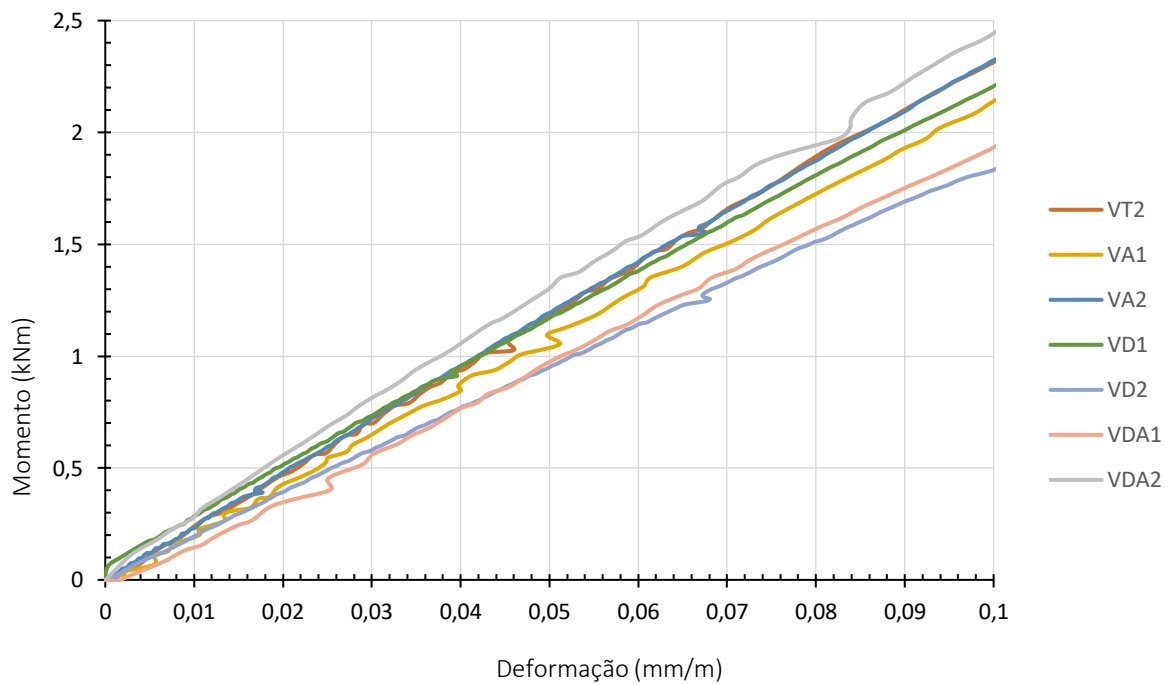
Na Figura 75, encontra-se o gráfico da relação dos valores fornecidos pelo sistema de medição II com as deformações obtidas através do *QuantumX MX840B*. Assim, tem-se a curva de calibração para cada uma das vigas ensaiadas. Na Figura 76, observa-se que apesar das vigas serem semelhantes, houve diferentes deformações entre elas, inclusive entre as vigas com o mesmo tipo de ancoragem, que em teoria apresentariam as mesmas deformações. As deformações destes gráficos foram limitadas ao valor máximo de 0,1 mm/m, com o intuito de obter as funções de calibração com elevada linearidade. Além disso, as deformações estimadas para os pilares do edifício são próximas a este valor. As vigas VT1, VDB1 e VDB2 não foram consideradas para calibração do sistema devido as mesmas apresentarem alguma falha no início dos ensaios, onde houve acréscimo de carga mas não foram obtidas as deformações.

Figura 75 – Curvas de calibração das vigas



(Fonte: AUTORA, 2022)

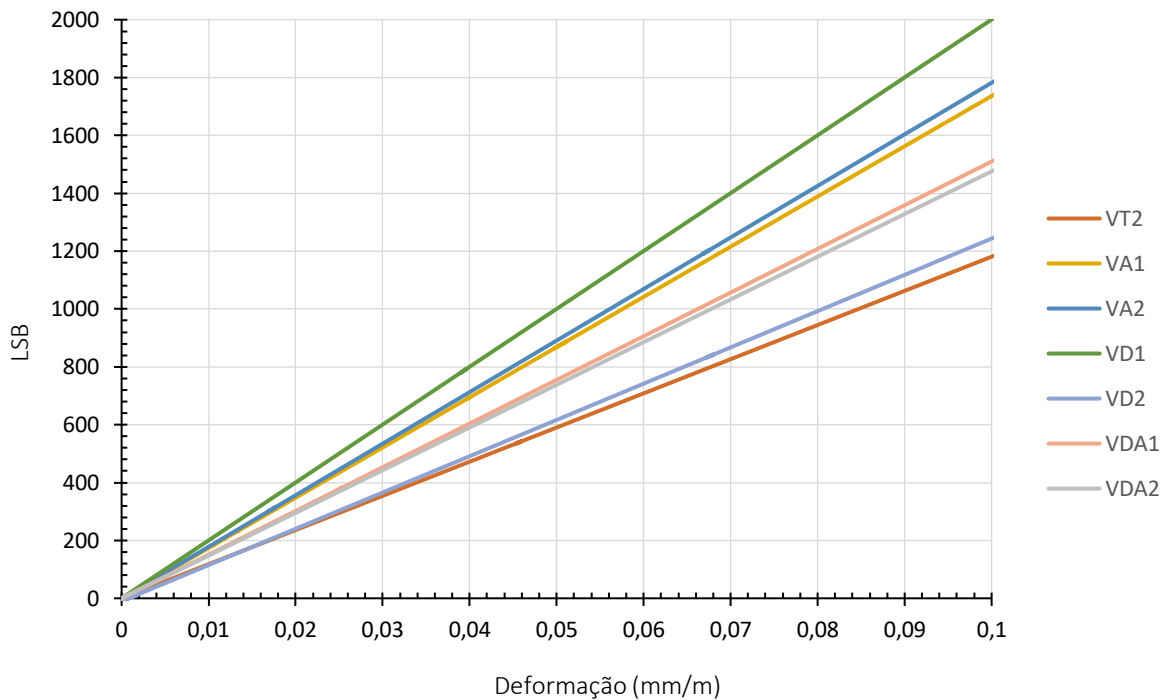
Figura 76 – Gráfico momento-deformação das vigas



(Fonte: AUTORA, 2022)

Para cada uma das curvas de calibração do gráfico da Figura 75, foi obtida a regressão, que variam de 0,97 a 0,99, verificando-se a linearidade das leituras. Na Figura 77, observa-se as curvas de calibração da Figura 75, plotadas conforme a função linear obtida através da regressão.

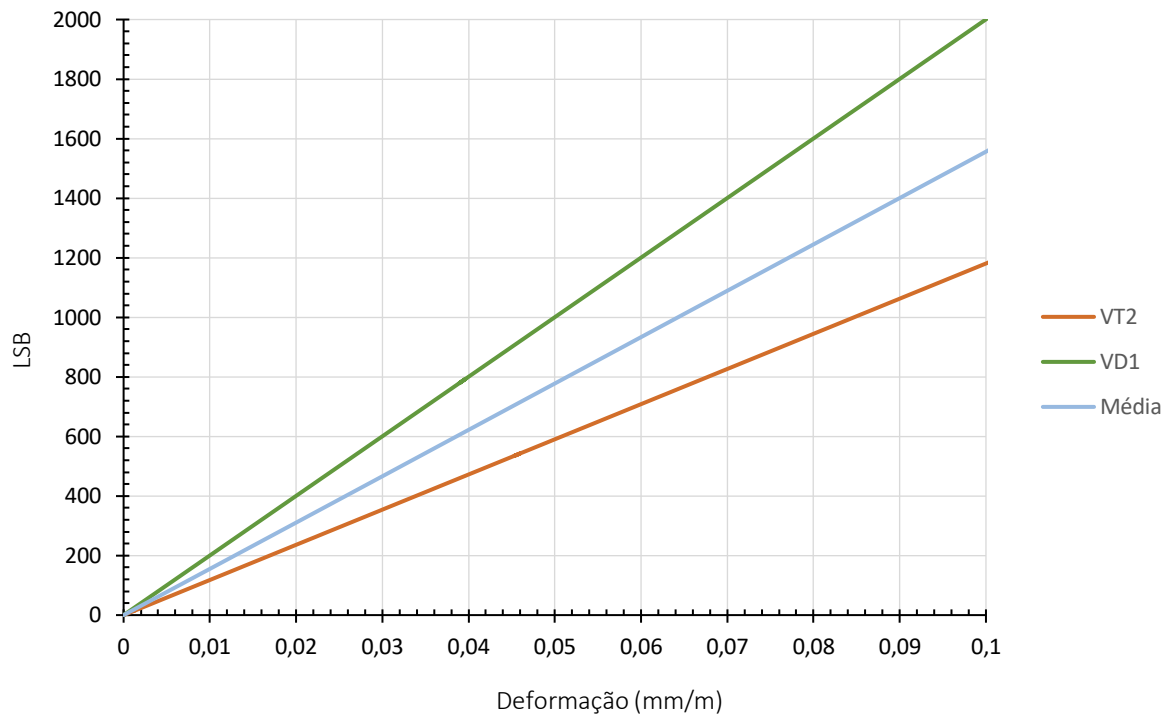
Figura 77 – Curvas de calibração conforme funções lineares



(Fonte: AUTORA, 2022)

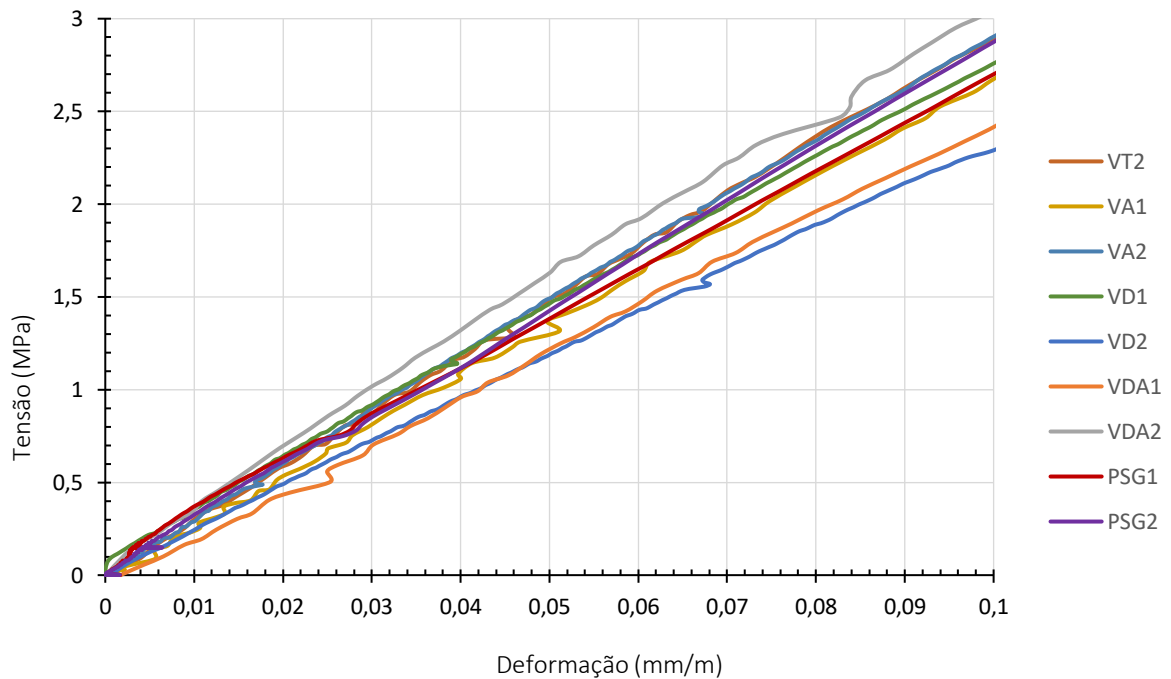
Com o objetivo de obter uma curva de calibração genérica para transformar as leituras do sistema de medição desenvolvido em deformação, foi realizada a média das dez curvas obtidas através da regressão, representando-a como Média no gráfico da Figura 78. Ainda, foi plotada a curva maior, através da função linear da VD1, e a curva menor, através da função linear da VT2. Estas curvas servirão como calibração comparativa para as leituras adquiridas no monitoramento dos pilares. Por fim, para verificar se a calibração através das vigas envolveu a mesma faixa de tensões e deformações dos pilares, plotou-se um gráfico tensão x deformação com as deformações dos extensômetros (PSG1 e PSG2) do segundo ensaio realizado com o pilar no LEME e as deformações dos extensômetros fixados na superfície de concreto das vigas. Assim, observa-se que para as deformações de até 0,1 mm/m, os dados do pilar e das vigas são semelhantes, conforme Figura 79.

Figura 78 – Curva de calibração (menor, média e maior)



(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 79 – Gráfico tensão-deformação dos ensaios com as vigas e pilar



(Fonte: AUTORA, 2022)

5.3.2 DEFORMAÇÕES DOS PILARES DO EDIFÍCIO RESIDENCIAL II

Foram realizadas medições nas duas placas fixadas nos pilares P31 e P26 da edificação residencial ao longo de cinco meses, até a conclusão da execução do pavimento cobertura, com 30,52 m de altura, conforme a Figura 80.

Figura 80 – Edifício residencial do sistema de medição II



(Fonte: AUTORA, 2022)

Conforme a estimativa de cargas realizada através do *software* CAD/TQS, observa-se na Tabela 5 e 6, o acréscimo de carga para os pilares P31 e P26 a cada pavimento. Assim, após a concretagem do décimo primeiro pavimento, a carga total que o pilar P26 recebeu foi 520 kN e o pilar P31 foi 392 kN. Para as cargas do quarto ao nono pavimento, foram adicionadas cargas de alvenaria a fim de acompanhar as etapas de carregamento da obra. A deformação analítica foi calculada através da Equação 3, descrita no capítulo 2, considerando o módulo de elasticidade de 33 GPa e as cargas para cada pavimento conforme as tabelas abaixo.

Tabela 5 – Cargas e Deformações do pilar P31

Pav.	Data	Carga Modelo Numérico		Deformação Analítica (mm/m)	Deformação Experimental (mm/m)			Temp. (°C)
		Peso Proprio (kN)	Peso Proprio + Alvenaria (kN)		Maior	Média	Menor	
4	04/07/22	49	57	0,017	0,016	0,014	0,011	19
5	20/07/22	98	106	0,031	0,029	0,026	0,020	20
6	05/08/22	147	155	0,046	0,043	0,038	0,030	22
7	23/08/22	196	204	0,060	0,047	0,042	0,032	23
8	08/09/22	245	253	0,075	0,037	0,033	0,026	16
9	26/09/22	294	302	0,089	0,066	0,060	0,046	17
10	10/10/22	343	-	0,101	0,087	0,078	0,060	21
11	26/10/22	392	-	0,116	0,000	0,000	0,000	26

(Fonte: AUTORA, 2022)

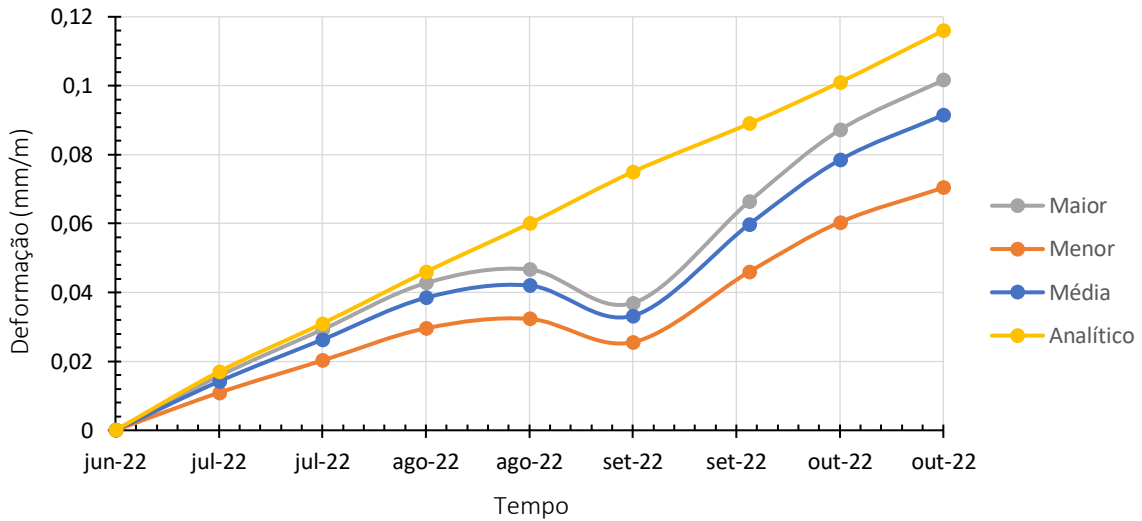
Tabela 6 – Cargas e Deformações do pilar P26

Pav.	Data	Carga Modelo Numérico		Deformação Analítica (mm/m)	Deformação Experimental (mm/m)			Temp. (°C)
		Peso Proprio (kN)	Peso Proprio + Alvenaria (kN)		Maior	Média	Menor	
4	04/07/22	65	73	0,020	0,002	0,002	0,001	19
5	20/07/22	130	138	0,037	0,009	0,008	0,006	20
6	05/08/22	195	203	0,055	0,038	0,034	0,026	22
7	23/08/22	260	268	0,072	0,049	0,044	0,034	23
8	08/09/22	325	333	0,090	0,009	0,008	0,006	16
9	26/09/22	390	398	0,107	0,083	0,075	0,058	17
10	10/10/22	455	-	0,123	0,082	0,074	0,057	21
11	26/10/22	520	-	0,140	0,000	0,000	0,000	26

(Fonte: AUTORA, 2022)

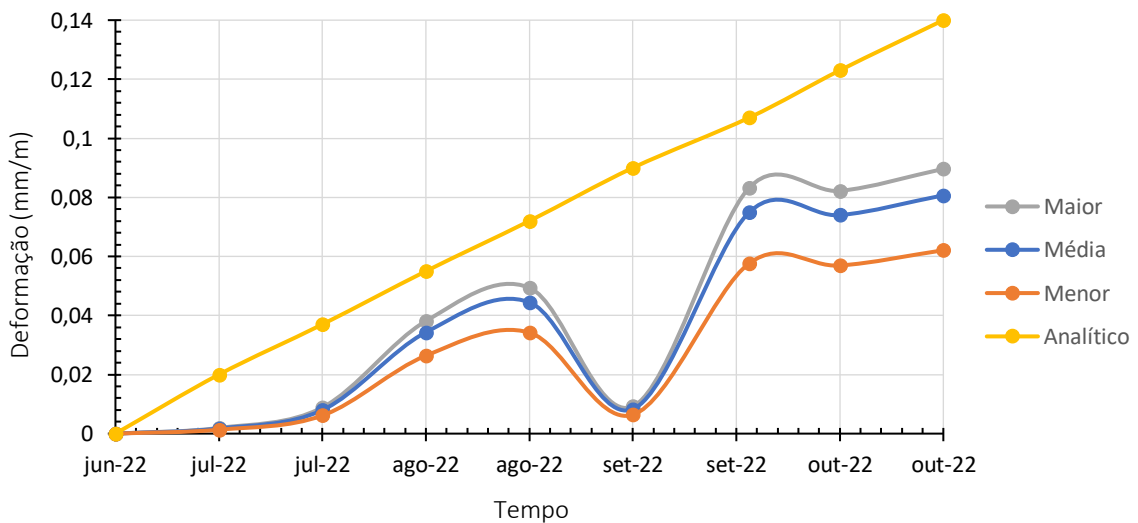
Nos gráficos das Figuras 81 e 82, encontram-se as deformações obtidas de forma analítica e as deformações medidas experimentalmente, onde os valores em tensão das leituras adquiridas no monitoramento foram convertidos para deformações através das curvas de calibração desenvolvidas anteriormente. As leituras foram realizadas logo após a concretagem das lajes de cada pavimento.

Figura 81 – Gráfico deformação x tempo do pilar P31



(Fonte: AUTORA, 2022)

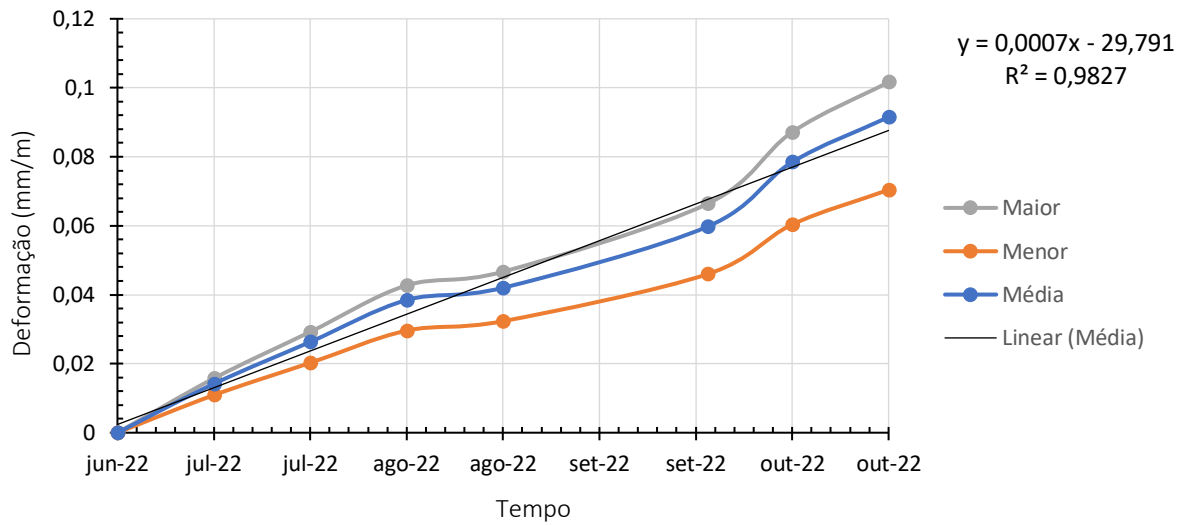
Figura 82 – Gráfico deformação x tempo do pilar P26



(Fonte: AUTORA, 2022)

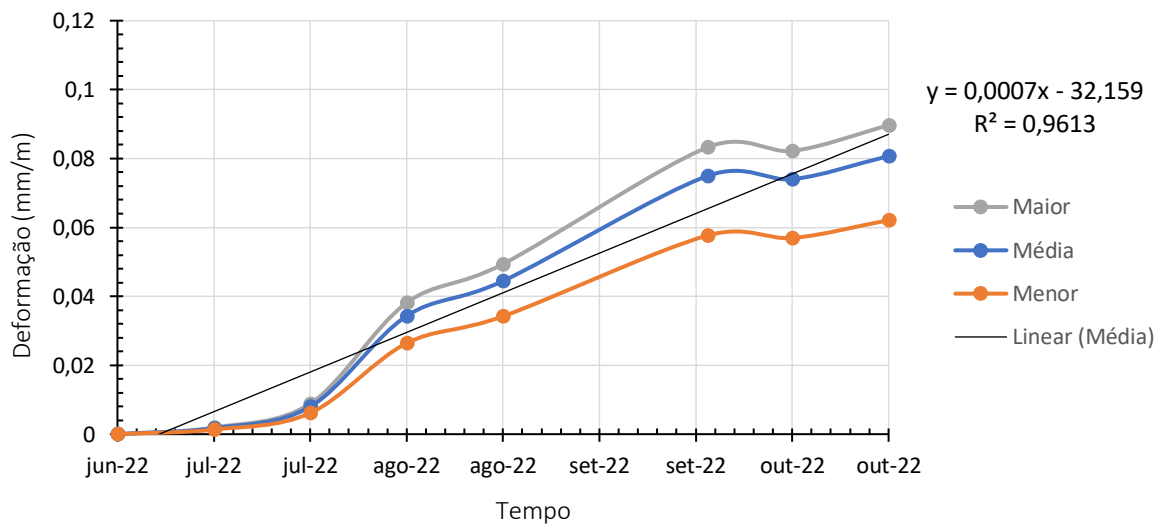
A leitura realizada no início de setembro apresentou um comportamento diferente do esperado, havendo a possibilidade da variação de temperatura ter impactado nos dados ou a fonte de alimentação do sistema ter provocado oscilações indesejadas aos sinais. Ao longo do trabalho, observou-se que tensão de alimentação via USB do notebook varia entre 4,5 V e 4,9 V, podendo prejudicar a aquisição dos dados. Assim, foi removido o ponto fora da curva e foram obtidos os gráficos das Figuras 83 e 84, que mostram a linearidade das informações adquiridas e agregam confiabilidade ao sistema de medição utilizado.

Figura 83 – Gráfico deformação x tempo do pilar P31 ajustado



(Fonte: AUTORA, 2022)

Figura 84 – Gráfico deformação x tempo do pilar P26 ajustado



(Fonte: AUTORA, 2022)

6 CONCLUSÃO

No ensaio de curta duração realizado com o pilar, o sistema de medição I, composto pela placa com extensômetros e o módulo amplificador e conversor HX711, apresentou-se de modo satisfatório apesar da falta de sensibilidade para deformações de até 0,2 mm/m. Contudo, para o monitoramento dos pilares do edifício residencial em construção, as leituras realizadas apresentaram alta variação do zero, deixando os resultados inconclusivos. Assim, constatou-se que o dispositivo de leitura I apresentou problemas que podem ter sido causados pela perda do zero, diferentes temperaturas ou oscilação da tensão de alimentação.

Quanto aos ensaios de flexão nas vigas de concreto com o sistema de medição II, composto pela placa com extensômetros, o amplificador AD620 e o conversor ADS1115, foi obtida uma resposta eficiente para as deformações elásticas e de até aproximadamente 0,2 mm/m para todas as vigas, verificando a capacidade do sistema de medir as pequenas deformações dos pilares. Em seguida, as leituras das vigas VT1, VT2, VD2 e VDA1 foram perdidas devido ao descolamento da placa, que pode ter sido causado pela perda de aderência da placa com superfície rugosa de concreto ou também pode ter ocorrido alguma falha nos sensores. No entanto, as leituras das vigas VA1, VA2, VD1, VDB1 e VDB2 mostraram-se eficientes até as deformações de aproximadamente 0,8 mm/m. Na viga VDA2, foram medidas as deformações de até 1,96 mm/m, apesar da perda de sensibilidade na placa a partir das deformações de 0,2 mm/m em comparação com o SG1.

Ainda, foi observado que as placas reutilizadas nas vigas VDB1 e VDB2, apresentaram um comportamento semelhante ao comportamento do extensômetro de referência fixado nas duas vigas. Assim, verifica-se a possibilidade de mais uma vantagem na utilização deste sistema, considerando o fato dos sensores colados diretamente nas estruturas serem descartados após sua fixação. Contudo, torna-se necessário estudos mais específicos para avaliar a reutilização de placas.

Para as leituras realizadas nos dois edifícios residenciais, onde os níveis de deformações dos pilares são iguais, obteve-se uma significativa melhora nos dados coletados a partir do sistema de medição II, visto que os dados para o sistema de medição I foram instáveis devido às flutuações nas leituras. Para as deformações obtidas nos pilares através do segundo sistema de medição proposto, constatou-se que houve uma resposta do sistema em partes compatível com

as deformações analíticas. Entretanto, para um melhor entendimento do monitoramento a longo prazo desse sistema de medição, torna-se relevante a instalação de um número maior de placas em pilares.

Ao avaliar os custos para a construção dos sistemas de medição, observou-se uma significativa vantagem econômica em comparação aos sistemas de leituras comerciais. Ainda, devido ao risco de roubo, extravios e estragos que podem ocorrer em obras, ressalta-se a importância de se desenvolver sistemas de baixo custo que sejam confiáveis. Por fim, a investigação do uso de sensores de baixo custo aliado ao que se tem hoje em dia de comunicação por rede, permite o monitoramento à distância.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o sistema proposto com uma comunicação *wireless* entre o local de medição e a unidade de aquisição de dados. Ainda, para garantir que a fonte de alimentação de energia não ocasione oscilações indesejáveis no sinal, pode-se adicionar um regulador de tensão ao sistema. Além disso, para um monitoramento de longo prazo, que ocorre altas variações de temperaturas, torna-se relevante instalar sensores utilizados para medição de temperatura, com o intuito de acompanhar o impacto que a mesma causa nas estruturas. Ainda, pode-se realizar um estudo mais detalhado verificando a capacidade resistente das colas, ensaios para avaliação do efeito de histerese e devido a superfície heterogênea de determinados elementos, pode-se investigar diferentes tamanhos de placa e diferentes modos de fixação da placa na estrutura, como por exemplo, a utilização de parafusos, a fim de melhorar a aderência da placa na estrutura.

Por fim, pode-se utilizar o sistema proposto em diferentes situações práticas, como fixar a placa com extensômetros em todos os pilares de um edifício e verificar se a distribuição de cargas nesses pilares é o que se espera, validando a modelagem numérica para a distribuição de cargas em pilares. Ainda, pode-se tentar observar flutuações de tensão sob ação do vento para um edifício pronto.

REFERÊNCIAS

- ANALOG DEVICES. **Datasheet AD620**. Disponível em: <<http://usinainfo.com.br/>>. Acesso em: 15 out. 2022.
- ANDRADE T. **Tópicos sobre Durabilidade do Concreto**, in: G. C. Isaia (Editor), **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo, Brasil: IBRACON, 2005. cap.25, vol.1, pp.753-792.
- ANDRADE, R. G. M. DE. **Monitoramento de Curta Duração de uma Ponte Curva**. [s.l.] Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria básica**. Ilha Soleira: Universidade Estadual Paulista, 2004.
- ANTUNES, P. F. C. **Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada). Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- ARDUINO. HomePage. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- ASSIS, W. S. DE. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- _____. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.
- _____. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.
- _____. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- AVIA SEMICONDUCTOR. **Datasheet HX711**. Disponível em: <<http://usinainfo.com.br/>>. Acesso em: 15 out. 2022.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**, volume 2. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- BORGES, J. L. S. **Desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento dinâmico de estruturas**. 2021. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

CARVALHO, R. C., FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR6118:2003**. 3ª ed. São Carlos: edUFSCar, 2009.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems - Application and Design**. Forth Edition, McGraw-Hill, 1990.

EXCEL SENSORES. HomePage. Disponível em: <<http://excelsensor.com.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

GALANTE, A. C.; GARCIA, R. F. **Sistema de Aquisição de Dados de Sensores de Baixo Custo Baseado no Arduino**. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- ConBAP, São Pedro, SP, 2014.

GAO, F.; ZHOU, H.; LIANG, H.; WENG, S.; ZHU, H. **Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage**, Engineering Structures 209, 2020.

GLISIC, B.; INAUDI, D.; LAU, J. M.; FONG, C. C. **Ten-year monitoring of high-rise Building columns using long-gauge fiber optic sensors**. Smart Mater Struct, 2013.

HIBBELER, R.C., **Resistência dos Materiais**. 5ª ed. São Paulo: Prentice Hall (2006)

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Alsbach: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

IYAMA, J.; CHIH-CHUN, O.; ARAKI, K. **Bending moment distribution estimation of an actual steel building structure by microstrain measurement under small earthquake**. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021.

LAZZARI, P. M. Simulação Numérica das Etapas Construtivas de Pontes Estaiadas Através do Método dos Elementos Finitos. 2016. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LORENZI, A., CAMPAGNOLO, J. L., SILVA FILHO, L. C. P. **Application of artificial neural network for interpreting ultrasonic readings of concrete**, Int. J. Materials and Product Technology, 2006, 26, 57-70.

OSMAN, A.; MALAK, C. **Evaluating the stresses in a supertall structure: field monitoring and numerical analysis**. In: Proc, SMAR 2017- fourth conference on smart monitoring - assessment and rehabilitation of civil structures.

ROCHA, Marcelo Maia. **PEC00144**, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://github.com/mmaiarocha/PEC00144>>

SANTOS, L. O. **Monitoramento e ensaio de pontes**, In: VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 110, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Maio 2014.

SCHWETZ, P. F. **Análise Numérico-Experimental de Lajes Nervuradas Sujeitas a Cargas Estáticas de Serviço**. 2011. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, A. E. F. **Contribuições ao estudo da não-linearidade física em vigas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SILVA, B. L. P. **Desenvolvimento de sistema para monitoramento de estruturas com utilização da plataforma Arduino**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2018.

MEASUREMENT COMPUTING. **Signal and Conditioning PC-Based Data Acquisition Handbook**. 3. ed. Madrid: Measurement Computing Corporation, 2012.

MONTOYA, P. J.; MESGUER, A. G.; CABRE, F. M. **Hormigón armado**. 7. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A., 1973.

NAHUM, K. A. R.; OLIVEIRA, D. R. C. **Monitoramento de pilares em edifícios altos de concreto armado**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 3, n. 2, p.179-194, jun. 2010. Trimestral.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet ADS1115**. Dallas, EUA, 2018.

TIRADO, L. H. B. **Estudo da ancoragem de polímeros reforçados com fibras (PRF) em vigas de concreto armado submetidos à esforços de flexão**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

TORRICO, F. A. **Análise teórica e experimental do comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade**. 2010. 311 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

USINAINFO. HomePage. Disponível em: <<http://usinainfo.com.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

TQSDOCS. HomePage. Disponível em: <<http://docs.tqs.com.br/>>. Acesso em: 30 set. 2021.

VIAPIANA, L. G. **Influência do confinamento na resistência e ductilidade de pilares curtos de concreto de ultra alta resistência submetidos à compressão centrada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

WEBSTER, J. G. **Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**. CRC Press, 1999.

XIA, Y.; ZHANG, P.; NI, Y.; ZHU, H. **Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data.** Engineering Structures 67, 2014.

YE, X.W.; NI, Y.Q.; XIA, X. **Distributed strain sensor networks for in-construction monitoring and safety evaluation of a high-rise building.** Internacional Journal Distributed Sens Networks, 2012.

APÊNDICE A – CÓDIGO SISTEMA DE MEDIÇÃO I

Código responsável pela programação no Arduino para o sistema de medição I.

readHX711 | Arduino 1.8.10

Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

```

readHX711 §

#include <Wire.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
#include "HX711-multi.h"

#define Ncell 2 // number of cells to be read

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE); //ENDEREÇO DO I2C E DEMAIS INFORMAÇÕES

byte CLK = 3; // clock pin
byte DOUT[Ncell] = {5, 6}; // list of data pins

long dV[Ncell]; // data matrix (same length as DOUT)
long dVsum[Ncell]; // for averaging

long t, t0;
char line[16];
int samples=32; //DEFINE A QNT DE LEITURAS PARA MÉDIA

HX711MULTI cells(Ncell, DOUT, CLK); // create object "cells"

void setup(){

  lcd.begin (16,2); //SETA A QUANTIDADE DE COLUNAS(16) E O NÚMERO DE LINHAS(2) DO DISPLAY
  lcd.setBacklight(HIGH); //LIGA O BACKLIGHT (LUZ DE FUNDO)

  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) delay(100);

  delay(1000);
}

void loop(){
  dVsum[0] = 0;
  for (int j = 0; j < samples; j++){ //DEFINE A QNT DE LEITURAS PARA MÉDIA
    cells.read(dV);
    dVsum[0] += dV[0]/samples;
    delay(100);
  }
  dV[0] = dVsum[0];

  lcd.setCursor(0,0); //SETA A POSIÇÃO DO CURSOR
  lcd.print(dV[0]); //IMPRIME O TEXTO NO DISPLAY LCD
  lcd.setCursor(0,1); //SETA A POSIÇÃO DO CURSOR
  lcd.print(dV[0]); //IMPRIME O TEXTO NO DISPLAY LCD

  Serial.println(dV[0]);
  delay(100);
}

```

(Fonte: adaptado de ROCHA, 2021)

APÊNDICE B – CÓDIGO SISTEMA DE MEDIÇÃO II

Código responsável pela programação no Arduino para o sistema de medição II.

© ADS1115_4Channels | Arduino 1.8.10

Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda



```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
|
// Acquisition variables
uint16_t CA, CB; // data from ADS115
char line[14]; // formatted output
long t0, t; // time from internal clock

// ADS1115 instance
Adafruit_ADS1115 ads(0x48); //

void setup(){

// Setup serial (only for debugging)
Serial.begin(230400);
while (!Serial){delay(100);}

// Setup ADS1115
ads.begin();
ads.setGain(GAIN_ONE);

delay(1000);
t0 = millis();
}

void loop(){
  if (Serial.available() > 0){
    String NS = Serial.readString();
    int N = NS.toInt();

    for (int i = 0; i < N; i++){

      CA = ads.readADC_Differential_0_1();
      CB = ads.readADC_Differential_2_3();

      t = millis() - t0;

//      sprintf(line, "%9ld %6d %6d %6d %6d\n",
//      t, CA, CB);
      sprintf(line, "%6d %6d\n", CA, CB);

      Serial.print(line);
      delay(200);
    }
  }
}

```

(Fonte: adaptado de ROCHA, 2021)

ANPÊNDICE C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EXTENSÔMETROS UTILIZADOS

EXTENSÔMETROS DA PLACA

Fabricante: Excel Sensores

Modelo: PA-06-125TG-350LEN

Medidas: 3 mm de comprimento

Gage factor: $2,15 \pm 1,0\%$ (Lote 1)

Gage factor: $2,19 \pm 1,0\%$ (Lote 2)

EXTENSÔMETROS DAS ARMADURAS

Fabricante: Kyowa

Modelo: KFG-10-120-C1-11

Medidas: 10 mm de comprimento

Gage factor: $2,11 \pm 1,0\%$

EXTENSÔMETROS DO CONCRETO

Fabricante: Kyowa

Modelo: KFG-20-120-C1-CC

Medidas: 20 mm de comprimento

Gage factor: $2,09 \pm 1,0\%$