



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA O  
MONITORAMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO  
CONCRETO**

**ANA CAROLINNE ALMEIDA CARNEIRO**

**POMBAL – PB**

**2024**

ANA CAROLINNE ALMEIDA CARNEIRO

UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA O MONITORAMENTO DO  
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Campina Grande, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Engenheira Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Leovegildo Douglas  
Pereira de Souza.

Coorientador(a): Prof. Dr. José Roberto  
Bezerra da Silva.

POMBAL – PB

2024

C289u Carneiro, Ana Carolinne Almeida.  
Utilização de extensômetros elétricos para o monitoramento do módulo de elasticidade do concreto / Ana Carolinne Almeida Carneiro. – Pombal, 2024.  
59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2024.

“Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza, Prof. Dr. José Roberto Bezerra da Silva”.

Referências.

1. Concreto 2. Módulo de elasticidade. 3. Extensômetros. 4. Placa *Arduino*. 5. Resistência a compressão. 6. Menor custo. I. Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Silva, José Roberto Bezerra da. III. Título.

CDU 691.32(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

ANA CAROLINNE ALMEIDA CARNEIRO

**UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA O MONITORAMENTO  
DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso da discente ANA CAROLINNE ALMEIDA CARNEIRO em 24 de maio de 2024 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO  
DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457  
CN=LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE  
SOUZA:08419377457, OU=UFCG - Universidade  
Federal de Campina Grande, O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu sou o autor deste documento  
Localização:  
Data: 2024.06.02 21:07:46-03'00'  
Foxit PDF Reader Versão: 2024.2.1

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza  
(Orientador – UACTA-CCTA)

Prof. Dr. Raphael Borges da Nóbrega  
(Membro Interno – UACTA-CCTA)

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marília Marcy Cabral de Araújo  
(Membro Externo – UAEC-CTR)

*Dedico este trabalho à minha mãe Dalva, que nunca mediu esforços para me apoiar nesta jornada, assim como também à minha família pelo carinho e cuidado demonstrados.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Leovegildo Douglas, José Roberto e Raphael Borges pela atenção, esclarecimentos e sugestões durante este trabalho.

A minha mãe, Dalva, minha tia Luana e minha avó Claudenir. Aos meus irmãos Dandara, Vinicius, aos meus tios Otovide e Maria, e ao meu pai Glaudson e meu primo João Guilherme.

*“Quero que se saiba que o pouco que aprendi até agora não é quase nada em comparação o que ignoro, e que não desanimo de poder aprender(...)”.*

*René Descartes  
(1596 - 1650)*

## RESUMO

O presente trabalho buscou desenvolver um modelo experimental utilizando um sistema composto por extensômetro e a placa *Arduino* para monitorar o módulo de elasticidade do concreto. A metodologia envolveu a aplicação de tensões de compressão sobre corpos de prova de concreto, com extensômetros instalados para medir a deformação resultante, e utilizou o *Arduino* para processar os dados coletados. Os resultados apresentados indicaram que o sistema proposto fornece medições precisas do módulo de elasticidade, comparáveis aos métodos tradicionais, porém com maior acessibilidade.

**Palavras-chave:** Extensômetros, *Arduino*, Módulo de Elasticidade, Compressão, Menor Custo.

## **ABSTRACT**

The present work aimed to develop an experimental model using a system composed of a strain gauge and an Arduino board to monitor the modulus of elasticity of concrete. The methodology involved applying compressive stresses to concrete specimens, with strain gauges installed to measure the resulting deformation, and used the Arduino to process the collected data. The results presented indicated that the proposed system provides accurate measurements of the modulus of elasticity, comparable to traditional methods, but with greater accessibility.

**Keywords:** Strain Gauges, Arduino, Modulus of Elasticity, Compression, Lower Cost.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Colapso da passarela de Regency Skywalk, em 1981 (Kansas City, EUA).....  | 19 |
| Figura 2 - Desabamento Parcial do Edifício Palace II, Rio de Janeiro, 1998 .....   | 20 |
| Figura 3 - Ciclos de carregamento e descarregamento em ensaio de módulo de elasticidade tangente na origem.....  | 24 |
| Figura 6 - Representação esquemática do comportamento do concreto sob compressão uniaxial.....   | 26 |
| Figura 7 - Caracterização do comportamento dos materiais linearmente elásticos e não linearmente elásticos .....   | 27 |
| Figura 9 - Diferentes tipos de módulos de elasticidade no gráfico tensão-deformação.....   | 28 |
| Figura 10 - Esquematização dos elementos que compõem o extensômetro .....  | 29 |
| Figura 11 - Extensômetro axial único .....   | 32 |
| Figura 12 - Extensômetro biaxial.....  | 33 |
| Figura 13 - Extensômetro triaxial .....  | 33 |
| Figura 14 - Extensômetro tipo diafragma .....  | 33 |
| Figura 15 - Extensômetro para tensão residual.....   | 33 |
| Figura 16 - Extensômetro axial duplo .....   | 33 |
| Figura 17 - Módulo Sensor Strain Gauge BF350-3AA .....   | 35 |
| Figura 18 - Circuito ponte de <i>Wheatstone</i> .....  | 36 |
| Figura 19 - Alongamento do extensômetro devido a deformação em função da tensão à compressão submetido ao concreto (circuito um quarto ponte de <i>Wheatstone</i> ). ..... | 37 |
| Figura 20 - Diagrama do processamento da informação .....  | 38 |
| Figura 21 - Arduino Uno.....   | 40 |
| Figura 22 - Módulo HX-711 .....  | 40 |
| Figura 23 - Transdutor de sinal .....  | 41 |
| Figura 24 - Esquematização do sistema ponte de <i>Wheatstone</i> - Módulo HX711 - Arduino ...  | 41 |
| Figura 25 - Instalação do Extensômetro no corpo de prova .....   | 44 |
| Figura 26 - Esquemático do sistema, 2024. ....   | 45 |
| Figura 27 - Diagrama de conexão dos componentes para os dados.....   | 45 |
| Figura 28 - Conexão do Sistema.....  | 46 |
| Figura 29 - Calibração do Módulo de sensor.....  | 46 |
| Figura 30 - Máquina de ensaios de compressão.....  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 - Gráfico tensão-deformação do CP1 .....   | 50 |
| Figura 32 - Gráfico de tensão-deformação do CP2..... | 51 |
| Figura 33 - Gráfico tensão-deformação do CP3 .....   | 52 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Relação tensão-deformação do CP1 .....                         | 49 |
| Tabela 2 - Relação tensão-deformação do CP2. ....                         | 51 |
| Tabela 3 - Relação tensão-deformação do CP3. ....                         | 52 |
| Tabela 4 - Comparação do módulo de elasticidade dos corpos de prova ..... | 53 |

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Siglas

- ACI *American Concrete Institute;*
- EUA Estados Unidos da América;
- IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto;
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- NBR Norma Brasileira Regulamentadora;
- ASTM *American Society for Testing and Materials;*
- IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto;
- BF350 Tipologia de Extensômetro;
- TL431 Regulador de tensão para circuito;
- Hx-711 Conversor amplificador;
- LM358 Circuito integrado de amplificador;
- C/C++ Linguagem de programação;
- ADC *Analog to Digital Converter;*
- SCK Pino de *Clock Serial;*
- GND Pino *Ground;*
- DT Pino *Data;*
- GRANTE Grupo de Análise e Projeto Mecânico

### Símbolos

- $\Omega$  Ohms;
- mm Milímetros;
- cm Centímetro;
- m Metro;
- kN Quilonewton;

- MPa Mega Pascal;
- N Newton;
- GPa Giga Pascal;
- $f_c$  Resistência à Compressão do Concreto;
- $f_{ck}$  Resistência Característica do Concreto à Compressão;
- $f_{cd}$  Resistência de Cálculo do Concreto;
- $E_c$  Módulo de Elasticidade do concreto;
- $E_{ci}$  Módulo de Elasticidade Inicial;
- $E_{cs}$  Módulo de Elasticidade Secante;
- K Fator Calibre;
- $\epsilon$  Deformação;
- F Força;
- A Área;
- L Comprimento;
- $\Delta$  Variação;
- $\sigma$  Tensão;
- R Resistência Elétrica;
- R1 á R4 Resistores;
- V Tensão Elétrica/ Volts;
- $V_e$  Tensão Elétrica Inicial;
- $V_{ex}$  Tensão Elétrica Final;
- S, S1 e S2 Extensômetros;

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>1.1. Justificativa</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>1.2. Objetivos</b> .....  | <b>21</b> |
| <i>1.2.1. Objetivo Geral</i> .....   | <b>21</b> |
| <i>1.2.2. Objetivos Específicos</i> .....  | <b>21</b> |
| <b>1.3. Escopo do Trabalho</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>23</b> |
| <b>2.1. Propriedades Mecânicas</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>2.1.1. Resistência à compressão (<math>f_c</math>)</b> .....                      | <b>23</b> |
| <i>2.1.1.1. Conceito de resistência à compressão</i> .....                           | 23        |
| <i>2.1.1.2. Determinação da resistência à compressão</i> .....                       | 23        |
| <b>2.1.2. Relação tensão-deformação na compressão</b> .....                          | <b>24</b> |
| <b>2.1.3. Conceito de módulo de elasticidade (<math>E</math>)</b> .....              | <b>26</b> |
| <b>2.1.4. Determinação Módulo de Elasticidade do Concreto (<math>E</math>)</b> ..... | <b>28</b> |
| <b>2.2. Extensômetro</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>2.2.1 Tipos de Sensores</b> .....   | <b>30</b> |
| <i>2.2.1.1. Tipo de Sensores: Extensômetro Elétrico</i> .....                        | 30        |
| <b>2.2.2. Material Resistivo</b> .....   | <b>31</b> |
| <i>2.2.2.1 Extensômetro a fio</i> .....  | 31        |
| <i>2.2.2.2. Extensômetro de Lâmina</i> .....   | 31        |
| <i>2.2.2.3. Extensômetro de semicondutor</i> .....                                   | 32        |
| <b>2.2.3. Configuração da Grade</b> .....  | <b>32</b> |
| <b>2.2.4. Sistema de Codificação</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>2.3. Módulo Sensor <i>Strain Gauge</i></b> .....                                  | <b>35</b> |
| <b>2.4. Fator de calibre (<math>K</math>)</b> .....                                  | <b>35</b> |
| <b>2.5. Ponte de <i>Wheatstone</i></b> .....   | <b>36</b> |
| <b>2.6. <i>Arduino</i></b> .....   | <b>39</b> |
| <b>2.7. Módulo HX711</b> .....   | <b>40</b> |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>42</b> |
| <b>3.1. Materiais</b> .....  | <b>42</b> |
| <b>3.2. Métodos</b> .....  | <b>42</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.2.1. Instalação dos Extensômetros .....</b>          | <b>43</b> |
| <b>3.2.2. Conexão dos Dispositivos.....</b>               | <b>44</b> |
| <b>3.3. Programação do Sistema.....</b>                   | <b>46</b> |
| <b>3.3.1. Calibração .....</b>                            | <b>46</b> |
| <b>3.3.2. Código.....</b>                                 | <b>47</b> |
| <b>3.4. Ensaio de Compressão dos Corpos de Prova.....</b> | <b>47</b> |
| <b>3.5. Relação entre Tensão-Deformação.....</b>          | <b>48</b> |
| <b>3.6. Cálculo do Módulo de Elasticidade .....</b>       | <b>48</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                    | <b>49</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                 | <b>54</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                   | <b>55</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>59</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil (Guzlena, 2020). Tal afirmativa foi ratificada na convenção da *American Concrete Institute*, no ano de 1961, durante o discurso presidencial de J.W. Kelly, que apresentou o concreto como um material universal e alertou sobre a indispensabilidade de um conhecimento mais profundo que todos os engenheiros devem ter desse material.

“Não se pensaria em utilizar madeira para uma barragem, aço para um pavimento ou asfalto para a estrutura de um edifício, mas o concreto é utilizado para cada uma dessas aplicações e para muitas outras, além dos outros materiais de construção. Mesmo quando outro material é o principal componente de uma estrutura, o concreto é normalmente utilizado em determinadas partes da obra. Ele é usado para suportar, envolver, revestir e preencher. Mais pessoas precisam saber mais sobre o concreto do que sobre outros materiais especializados”.

A composição do concreto consiste em uma reação química produzida pela mistura do cimento hidráulico com a água, havendo ainda a adição de uma gama de produtos em sua produção (Neville, 2013). Essa mistura envolve dosar seus componentes, o que, de acordo com Aldolfato *et al.* (2004), dependerá da proporção adequada entre água e cimento para obter um concreto satisfatório para utilização.

Diante da noção da composição do concreto, é de suma importância partir para o conhecimento das propriedades mecânicas desse material, a fim de evitar que a falta de conhecimento permita que as estruturas não desempenhem seu papel ideal ou que acabem colapsando. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a resistência à compressão e o controle de qualidade do concreto na obra são informações indispensáveis em qualquer projeto estrutural. Essas características são obtidas através de ensaios, que visam ser simples para que essas informações sejam reconhecidas facilmente.

Melo Neto e Helene (2002) declaram que, para um resultado mais próximo do comportamento real do concreto, é necessário saber além da resistência à compressão, entender mais profundamente as propriedades de deformação, como o módulo de elasticidade, a fluência, a retração, entre outros fatores que caracterizam as condições do estado limite último.

Tal afirmativa de Melo Neto e Helene, exposta no parágrafo anterior, tornou-se realidade devido ao avanço da tecnologia. Com isso, foi possível a produção de concretos de alto desempenho, que, por consequência, trouxe a necessidade do aumento da resistência à compressão. Entretanto, essas qualidades acarretaram deformações a longo prazo. Diante disso,

além da apresentação da resistência à compressão, também se tornou essencial a identificação pelo projetista do módulo de elasticidade no instante da desforma (Djanikian Filho, 2010).

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação gerada por essa força (Araújo *et al.*, 2012). Segundo Melo Neto e Helene (2002), a obtenção do módulo de elasticidade é mais complexa do que a determinação da resistência à compressão. Dessa forma, a maioria dos projetistas estruturais utilizam um valor para o módulo de elasticidade através de equações empíricas definidas por normas, utilizando como variável a resistência à compressão.

Os extensômetros, também conhecidos como *Strain Gauges*, são sensores de medição que atuam no monitoramento e leitura de deformações. Os dispositivos medem a deformação através da mudança que ocorre nas dimensões do extensômetro, o que, por sua vez, modifica a resistência elétrica durante a deformação (NI Measurement, 2013).

No sistema elaborado por Marques (2019), os *Strain Gauges* apresentam valores reduzidos. Em função disso, os extensômetros são conectados através de uma ponte de Wheatstone, além de serem conectados a amplificadores, que possuem a função de aumentar os sinais elétricos.

Prosseguindo com a montagem dos dispositivos de *hardware* já mencionados, será apresentado mais detalhadamente, durante o desenvolvimento do presente trabalho, o *Arduino*, tanto o *software* (plataforma) quanto o *hardware* (peça), utilizados para a programação e leitura da deformação. Este instrumento funciona como um microcontrolador, caracterizando-se por sua fácil instalação e integração com o extensômetro. Sua leitura é possível por meio de um sistema de entrada de dados processados por um código de programação, o qual é capaz de converter essa entrada em uma saída de dados que instrui a execução de funções a serem desempenhadas (Arduino, 2024).

Dessa forma, o presente trabalho propõe um modelo experimental de monitoramento da deformação do concreto utilizando extensômetros e o dispositivo de placa *Arduino* na obtenção do módulo de elasticidade deste material. Portanto, o sistema apresentado para a leitura da deformação do concreto visa uma metodologia de simples acesso, com baixo custo e resultados claros.

## 1.1. Justificativa

Levando em consideração o atual cenário da construção civil, nota-se que cada vez mais as construções buscam maior agilidade executiva. Embora essa pretensão seja produtiva em relação ao gerenciamento do campo, a qualidade e a segurança das estruturas são frequentemente ignoradas devido à falta de supervisão e controle da resistência à deformação do concreto. Tal situação foi evidenciada em acidentes marcantes na história da construção civil.

De acordo com a Kansas City Public Library, em 1981, na cidade de Kansas, nos EUA, uma parte da passarela suspensa do hotel Hyatt Regency caiu, matando 114 pessoas e deixando 216 feridos. Segundo análises realizadas pelo National Bureau of Standards, a falha ocorreu devido a uma modificação de projeto que reduziu a resistência de uma conexão crítica. Fatos motivadores para isso incluíram a falta de monitoramento adequado durante a construção, que também contribuiu para o acidente (Kansas City Public Library, 2011).

Figura 1 - Colapso da passarela de Regency Skywalk, em 1981 (Kansas City, EUA).



Fonte: KSHB Kansas City (2021).

Não tão distante da realidade brasileira, acidentes como o mencionado anteriormente também ocorreram devido à omissão e descuido na verificação da deformação de estruturas. A redução da resistência à compressão do concreto é exemplificada pelo desabamento do Edifício Palace II, na cidade do Rio de Janeiro, em 1998, que matou oito pessoas (Folha de São Paulo, 2019). Segundo o laudo do Instituto Criminalística Carlos Éboli (ICCE), a construção não

seguiu os padrões adequados de segurança e qualidade, pois 78% dos pilares foram construídos com o coeficiente de segurança abaixo do estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Figura 2 - Desabamento Parcial do Edifício Palace II, Rio de Janeiro, 1998.



Fonte: Ana Carolina Fernandes, Folha de São Paulo (1998).

Sartori, *et al.* (2020), apresenta em seu trabalho comparações entre métodos de medição para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, concluindo que o compressômetro pode ser um método mais dispendioso do que outros mecanismos. Outra desvantagem apresentada é a demora na obtenção dos resultados, pois os compressômetros exigem mais tempo em sua instalação, principalmente se forem necessárias várias unidades em uma estrutura de grande porte.

Dessa forma, é possível notar a importância de um sistema de leitura da deformação do concreto que possua eficiência e segurança no monitoramento, de modo a evitar que desastres como os citados anteriormente se repitam. Diante disso, o presente trabalho visa apresentar a utilização de extensômetros para o monitoramento do módulo de elasticidade como metodologia mais acessível e de fácil aplicação para um maior controle das deformações das estruturas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

Propõe-se apresentar a aplicação de extensômetros elétricos e o dispositivo *Arduino* como sistema para o monitoramento do módulo de elasticidade do concreto. Dessa forma, o presente trabalho visa permitir que engenheiros e laboratórios de estruturas tenham mais autonomia na obtenção da deformação. Para isso, é proposta a utilização de dispositivos de baixo custo no monitoramento da deformação de estruturas em tempo real.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Executar a instalação do sistema extensômetro-microcontrolador *Arduino*;
- Realizar a leitura da deformação do concreto conforme a metodologia proposta;
- Desenvolver o gráfico tensão-deformação nos ensaios dos corpos de prova;
- Expor o módulo de elasticidade obtido na análise experimental dos corpos de concreto submetidos à compressão;
- Comparar os resultados obtidos com fundamentos teóricos;

## 1.3. Escopo do Trabalho

Para a realização deste trabalho, os temas abordados foram estruturados da seguinte maneira:

– No primeiro capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre a importância do concreto como material estrutural e suas propriedades mecânicas. São definidos os objetivos da pesquisa, delimitando seu tema e justificando sua relevância.

– No segundo capítulo, são indicadas as bases teóricas relacionadas ao tema abordado. São discutidas a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, explicando seus conceitos, formas de determinação baseadas na metodologia proposta e os principais fatores que os influenciam. Além disso, são abordadas as relações entre essas duas propriedades. Neste capítulo, também são evidenciados os elementos de *hardware* utilizados

para o desenvolvimento da leitura da deformação do concreto. Começando com o extensômetro, são discutidos seus tipos e classificações disponíveis no mercado, bem como seu princípio de leitura. Descrevem-se os fundamentos teóricos utilizados para a montagem e leitura da deformação sofrida pelo corpo de concreto. Um circuito de resistência é desenvolvido utilizando a Ponte de *Wheatstone*, para que a tensão emitida no corpo do concreto seja transmitida para a placa *Arduino* e seu sinal seja amplificado para possibilitar a leitura através da linguagem de programação C++.

– No terceiro capítulo, são abordados os materiais necessários para a instalação desse sistema. Estes materiais incluem a instalação dos extensômetros nos corpos de prova e a conexão dos equipamentos posteriores para o processamento da leitura da tensão sofrida.

– O quarto capítulo apresenta os resultados do programa experimental, bem como análises e discussões dos mesmos.

– O quinto capítulo, por fim, contém as conclusões obtidas através dos dados analisados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas referem-se ao comportamento de reação que um material assume após a aplicação de uma força. Essa relação entre carga e resposta é exemplificada pela deformação que ocorre nos materiais (Callister Jr & Rethwisch, 2012).

Para a realização do presente trabalho, o material analisado é o concreto. Sobre este material específico, Pinheiro *et al.* (2010) expõem as principais propriedades mecânicas, que são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades permitem determinar o controle de qualidade e garantir que o concreto atenda às especificações necessárias. A determinação do módulo de elasticidade é realizada por meio de ensaios, seguindo as normas exigidas.

#### 2.1.1. Resistência à compressão ( $f_c$ )

##### 2.1.1.1. Conceito de resistência à compressão

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a compressão é definida como a tensão máxima necessária para provocar a ruptura. Quando a carga aplicada em um corpo de prova excede a resistência que ele pode suportar, as fissuras se propagam de dentro para fora, indicando que o corpo de prova está rompido.

##### 2.1.1.2. Determinação da resistência à compressão

A ABNT NBR 6118:2023 estabelece que, para a determinação da resistência à compressão, são utilizados ensaios de corpos cilíndricos moldados seguindo os padrões prescritos pela ABNT NBR 5738 e rompidos segundo a ABNT NBR 5739.

A equação para o cálculo da resistência à compressão é dada como:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

em que  $f_c$  é a resistência à compressão (MPa),  $F$  é a força máxima alcançada (N) e  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova (mm<sup>2</sup>).

Para um cilindro, a área  $A$  é calculada como:

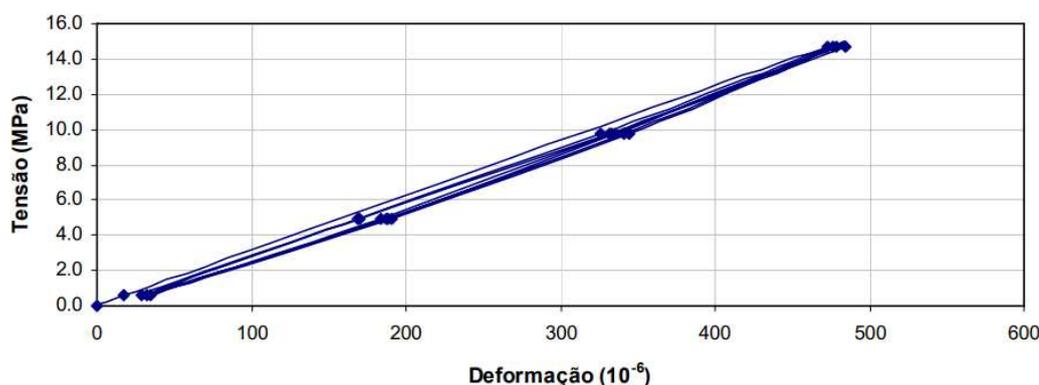
$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (\text{Equação 2})$$

onde  $D$  é o diâmetro do corpo de prova (mm).

### 2.1.2. Relação tensão-deformação na compressão

O concreto não é um material com comportamento linear-elástico. Entretanto, no ensaio de módulo de elasticidade, desse material se adequa à premissa de linearidade para tensões menores que 40% da resistência à compressão. A Figura 3 evidencia o ciclos de carregamento e descarregamento em ensaios de módulo de elasticidade tangente na origem (Nunes, 2005).

Figura 3 - Ciclos de carregamento e descarregamento em ensaio de módulo de elasticidade tangente na origem.



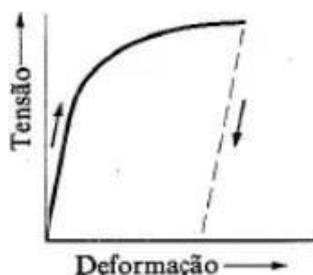
Fonte: Nunes, 2005.

De acordo com Mehta e Monteiro (1993), apud Nunes (2005), a ausência de linearidade na relação entre tensão-deformação do concreto, quando este está submetido a uma carga, é explicada pelo desenvolvimento de microfissuras progressivas no interior do concreto.

É importante conhecer os tipos de deformações que podem ocorrer no concreto. De modo abrangente, existem as deformações plásticas, que são caracterizadas pelo deslocamento permanente dos átomos que constituem o concreto quando as tensões atuantes são maiores que o limite de elasticidade suportado. Outro tipo de deformação presente é a deformação elástica, que, diferentemente do comportamento plástico, é reversível, pois o concreto consegue voltar à sua forma original após a retirada da tensão. As Figuras 4 e 5 a seguir permitem a análise e

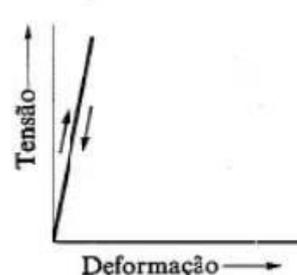
comparação dos gráficos de tensão-deformação das duas deformações apresentadas por Van Vlack (1970).

Figura 4 - Deformação plástica (A deformação não é reversível).



Fonte: Van Vlack, 1970.

Figura 5 - Deformação elástica (Diretamente proporcional à tensão).



Fonte: Van Vlack, 1970.

Na Figura 6, ainda segundo Mehta e Monteiro (1993), apud Nunes (2005), são expostas quatro reações do concreto submetido à tensão de compressão centrada. Anteriormente a introdução da força, já é possível notar o surgimento de microfissuras na região de transição entre a matriz e o agregado graúdo. A seguir, cada reação indicada pela figura é explicada:

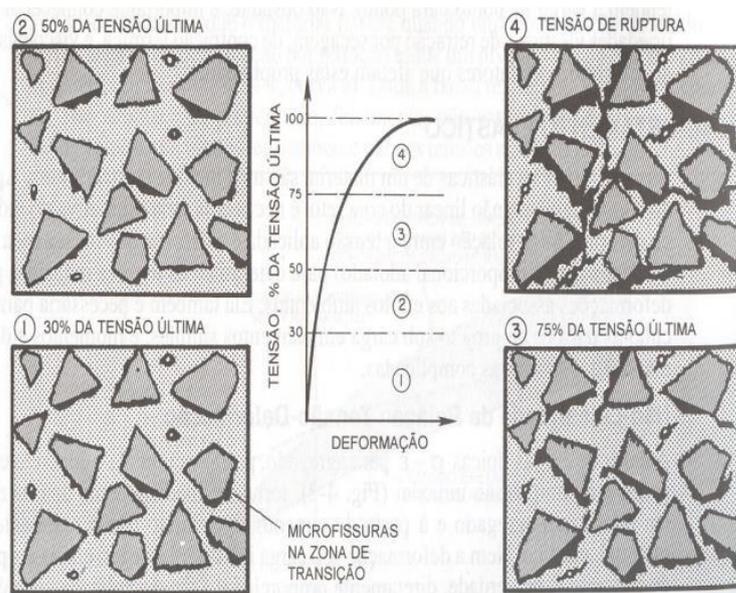
O concreto é submetido a uma tensão abaixo de 30% da carga última, e suas fissuras permanecem estáveis em relação ao início do surgimento delas, apresentando um comportamento linear na relação tensão-deformação.

À medida que a tensão progride e ultrapassa 30% da carga última, é possível notar que o comprimento das microfissuras na região de transição também aumenta. Além disso, o número de microfissuras cresce. No gráfico de tensão-deformação, a linha se afasta da linearidade e começa a apresentar uma curva.

Com a tensão atingindo até 50% da carga última, a região de transição se estabiliza. Para uma tensão na faixa entre acima de 50% e abaixo de 75%, as microfissuras tornam-se fissuras, propagando-se na matriz do concreto, retirando a estabilidade e avançando para outras regiões. A curva no gráfico de tensão-deformação começa a diminuir sua inclinação.

As deformações tornam-se grandes após a tensão ultrapassar 75% da carga última. Nesse momento, é possível afirmar que as deformações irão progredir até o colapso do material.

Figura 4 - Representação esquemática do comportamento do concreto sob compressão uniaxial



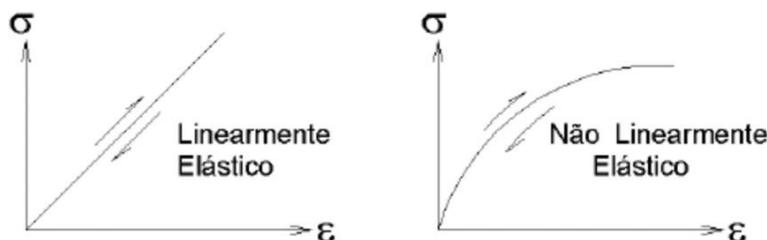
Fonte: Metha e Monteiro, 1993.

Quando o concreto passa pela tensão de escoamento na relação tensão-deformação, conhecido como momento de plastificação, é possível afirmar que o material atingiu seu valor máximo, denominado limite de elasticidade. Materiais que não apresentam o comportamento de plastificação antes de se romperem são considerados materiais frágeis, pois não atingem um limite de deformação em torno de 0,2% (Van Vlack, 1970).

### 2.1.3. Conceito de módulo de elasticidade ( $E$ )

Partindo do princípio, Djanikian Filho (2010) apresenta a diferença entre materiais linearmente elásticos e materiais não-linearmente elásticos. Quando um material submetido a um carregamento adquire uma relação linear entre tensão e deformação, ele é chamado de material linearmente elástico. Já os materiais que não se comportam de acordo com esse princípio são chamados de materiais não-linearmente elásticos. O limite elástico é encontrado quando a tensão produz uma deformação permanente. Nas figuras a seguir, são representados os dois comportamentos citados anteriormente.

Figura 5 - Caracterização do comportamento dos materiais linearmente elásticos e não linearmente elásticos.



Fonte: Djanikian Filho (2010).

O módulo de elasticidade do concreto é definido pela relação entre a tensão atuante em um corpo e a deformação instantânea proporcional consequente da aplicação dessa força (Mehta; Monteiro, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade do concreto se divide em três principais categorias diferentes, como é exposto pela Figura 9:

a) **Módulo de elasticidade tangente inicial:** Definido pela declividade de uma linha reta tangente a curva de tensão-deformação traçada a partir da origem. No contexto de ensaio prático, equivale-se ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3  $f_c$  e ao módulo de elasticidade secante a 0,3  $f_c$ . Para sua representação é definido  $E_{ci}$ , geralmente na unidade de GPa.

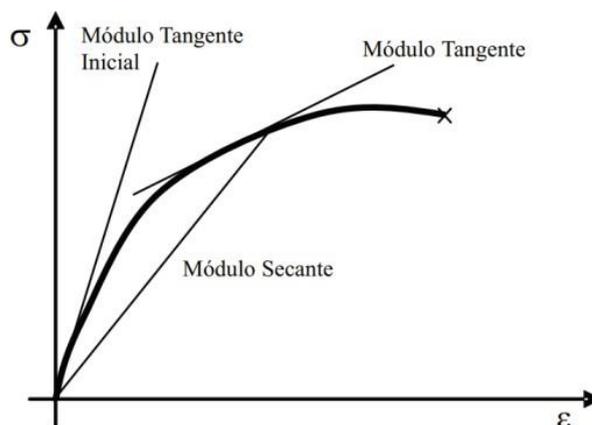
b) **Módulo de elasticidade secante:** Originado pela declividade de uma reta traçada entre dois pontos aleatórios da curva de tensão-deformação. Normalmente, os pontos escolhidos correspondem a tensão em torno de 0,5 MPa e 50% da tensão última. A adoção desses valores é justificada pela simulação de uma estrutura durante um carregamento inicial, representando quando uma carga permanente predomina.

Sendo um parâmetro amplamente considerado pelos projetistas estruturais, a Norma Brasileira de Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado ABNT NBR 6118:2023 recomenda que o valor do módulo de deformação secante seja 85% do valor inicial do módulo de deformação tangente. Para sua representação, é definido como  $E_{cs}$ , geralmente expresso na unidade de GPa.

c) **Módulo de elasticidade tangente cordal:** Dado pela inclinação da reta tangente à curva de tensão-deformação em qualquer intervalo da curva. O módulo é aplicado quando se deseja simular uma estrutura submetida a carregamentos e descarregamentos em diferentes

estágios de força. Essa variação de carga e descarga é pretendida para obter o comportamento mais realista de uma estrutura sujeita a cargas acidentais significativas.

Figura 6 - Diferentes tipos de módulos de elasticidade no gráfico tensão-deformação.



Fonte: S. S. Araújo (2012).

#### 2.1.4. *Determinação Módulo de Elasticidade do Concreto (E)*

Na Resistência dos Materiais é retratada a Lei de Hooke, onde o módulo de elasticidade é baseado na relação entre a tensão e a deformação relativa, de modo que a deformação é proporcional à tensão, como é demonstrado na equação abaixo:

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

- $\sigma$  é a tensão aplicada no corpo de prova, em MPa;
- $\varepsilon$  é a deformação específicas sofrida, em mm;
- $E$  é o módulo de elasticidade, em GPa.

A tensão, como já apresentado anteriormente pela Equação, é desenvolvido através do ensaio à compressão para aplicação da força sobre a área do corpo de prova.

Para obter a deformação sofrida pelo concreto, a equação abaixo é formulada:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Equação 5})$$

onde:

- $L$  é o diâmetro do corpo de prova, em mm;
- $\Delta L$  é a variação do diâmetro do corpo de prova, mm.

## 2.2. Extensômetro

O extensômetro, é um sensor colocado na superfície de uma peça responsável por medir a deformação causada pela aplicação de um carregamento. Os sensores têm como objetivo obter a deformação por meio da variação da resistência elétrica. Essa técnica é amplamente utilizada para verificar os níveis de tensão atuante em condições operacionais de equipamentos ou máquinas (Paula *et al.*, 2023; Ensus, 2016).

Para determinar a deformação do concreto por meio de extensômetros, utiliza-se a variação da resistência na equação abaixo:

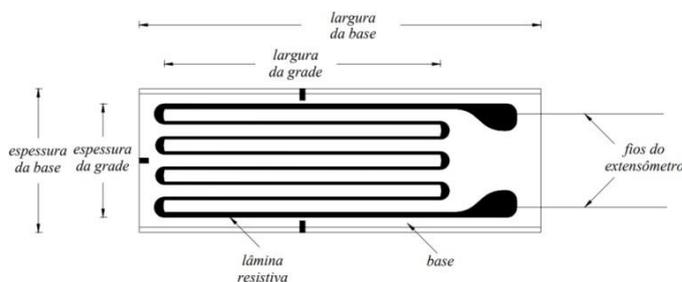
$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \times K} \quad (\text{Equação 13})$$

sendo, a deformação a ser medida representada pela letra  $\varepsilon$ , a variação de resistência do *Strain Gauge* devido à deformação pela  $\Delta R$ , a resistência nominal do *Strain Gauge* por  $R$  e por fim, o fator de sensibilidade do *Strain Gauge* pela letra  $K$ .

Conforme Barreto Júnior (1998), o extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Sua utilização constitui um meio de medir e registrar o fenômeno da deformação como uma grandeza elétrica. Essa resistência é alterada conforme o comprimento do elemento analisado é modificado.

Os extensômetros mais frequentemente utilizados no mercado são os elétricos, pois permitem que os computadores leiam os dados da deformação fornecidos pelo *Strain Gauge* (Shakeel *et al.*, 2017).

Figura 7 - Esquematização dos elementos que compõem o extensômetro.



Fonte: Andolfato (2004).

### 2.2.1 Tipos de Sensores

Existe diversas categorias de extensômetros para medir o deslocamento através da deformação. A seguir, são apresentadas as tipologias de classificação dos extensômetros, segundo GRANTE (2004):

- **Mecânicos:** Sendo o primeiro sistema desenvolvido para medir a deformação. Geralmente, o extensômetro mecânico faz a leitura do deslocamento de forma absoluta, não se limitando apenas à deformação. Ao analisar sua leitura, é possível afirmar que o sistema possui pouca precisão e sua utilização não é simples, devido sua maneira mecânica de leitura.
- **Semicondutores:** Baseado no princípio da variação da resistência elétrica, é utilizado em situações onde essa variação é pequena, ou seja, onde a deformação é baixa. O sistema possui uma sensibilidade mais elevada que os outros extensômetros.
- **Metais depositados:** Nesse tipo de extensômetro, o material de medição é depositado diretamente no ponto onde se deseja obter a deformação, na estrutura do transdutor. Devido ao princípio mencionado, os transdutores feitos com a técnica de metal depositado apresentam grandes vantagens, como um sistema de baixo custo, porém com pouca precisão em sua resposta.
- **Capacitivos:** Baseados no princípio da variação da capacitância, os extensômetros capacitivos são normalmente soldados na peça, em vez de serem colados. Apresentam excelente desempenho em altas temperaturas, na faixa de 500 °C a 800 °C.
- **Fibra Ótica:** Baseados nos princípios de transmissão por fibra óptica, os extensômetros de fibra ótica são amplamente utilizados para monitoramento estrutural e testes em materiais expostos a ambientes de alta tensão e fadiga. De acordo com o site da HBK, os resultados obtidos por essa tipologia são altamente confiáveis, mesmo em transmissões de longa distância.

#### 2.2.1.1. Tipo de Sensores: Extensômetro Elétrico

A atenção do presente trabalho está voltada aos extensômetros do tipo elétricos resistivos, sendo este elemento utilizado para o desenvolvimento da metodologia proposta.

Além da classificação conforme exposto anteriormente, existe outras tipologias que caracterizam tais elementos. Segundo Barreto Júnior (1998), os sensores são agrupados da seguinte maneira, conforme abaixo:

- De acordo com o material resistivo: fio, lâmina, semicondutor e semicondutor por difusão;
- De acordo com o material de base: papel, baquelita, poliéster, poliamida, epóxica e fibra de vidro reforçada com resina fenólica;
- De acordo com a configuração da grade: uniaxial, multiaxial e modelos específicos.

## **2.2.2. Material Resistivo**

### **2.2.2.1 Extensômetro a fio**

Pertencem à tipologia dos extensômetros elétricos, sendo composto por um fio resistivo fixado a um suporte, que tem a função de transmitir as deformações ocorridas na peça trabalhada para o fio. O fio resistivo é um elemento sensível que atua como isolante elétrico para o próprio fio (Barreto Júnior, 1998).

### **2.2.2.2. Extensômetro de Lâmina**

Barreto Júnior (1998), em seu trabalho sobre extensometria, afirma que, em princípio, sensor de lâmina é quase idêntico aos extensômetros a fio, diferindo apenas no processo de fabricação, uma vez que são produzidos a partir de uma fina lâmina de uma liga resistiva, com espessura da ordem de 3 a 10  $\mu\text{m}$ . Na comparação entre os tipos de extensômetros, é possível observar que os sensores de lâmina apresentam uma série de vantagens em relação aos sensores a fio. Entre essas vantagens estão a versatilidade de fabricação, uma área maior para colagem, reduzindo a tensão no adesivo, resultando em menores atrasos na leitura e deformação controlável. Outra vantagem é a dissipação térmica, superior à dos extensômetros a fio, o que proporciona circuitos mais sensíveis, uma vez que a dissipação térmica afeta o nível de excitação do extensômetro.

As ligas resistivas comumente usadas na fabricação desses tipos de extensômetros incluem o Constantan, Isoelastic, K-alloy, Karma, entre outros.

### 2.2.2.3. Extensômetro de semicondutor

Ainda conforme Barreto (1998), o sensor semicondutor é composto por um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício, normalmente fixado em um suporte epóxico ou fenólico. Suas principais propriedades incluem uma vasta capacidade de variação de resistência em resposta à deformação e um alto valor de fator de extensômetro, em torno de 150, tanto positivo quanto negativo. O fator varia de acordo com a deformação, mas a leitura da deformação não é linear, exigindo circuitos para a linearização desses efeitos.

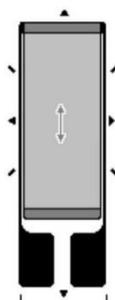
O extensômetro de semicondutor é amplamente utilizado para a obtenção de saídas de dados em níveis elevados, como em células de carga, acelerômetros e outros transdutores.

### 2.2.3. Configuração da Grade

De acordo com Barreto (1998), não ter conhecimento sobre as direções em que o extensômetro pode ser lido pode resultar em uma aplicação desperdiçada. Para abordar essa questão, Barreto apresenta os tipos de sensores de acordo com a configuração da grade:

➤ Extensômetro axial único: aplicável quando a direção da deformação é conhecida e ocorre em um único sentido. Na Figura 11 é exposta a representação dessa tipologia de sensor.

Figura 8 - Extensômetro axial único.



Fonte: Barreto Júnior (1998).

➤ Extensômetro axial múltiplo: composto por dois sensores sobre uma mesma base, capazes de realizar leituras em duas direções. É importante ressaltar que, para casos de mais de uma direção, é indispensável conhecer as direções específicas sob análise. Sem essa informação, não será possível obter a máxima tensão em um corpo de prova nessas duas

direções. Para isso, são utilizados extensômetros do tipo roseta, dispostos um sobre o outro formando ângulos de  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$ .

Os arquétipos mais conhecidos de extensômetros do tipo roseta são exibidos abaixo:

I. Roseta de duas direções: tem como objetivo a leitura em duas direções conhecidas. Sua formação utiliza dois extensômetros sobre a mesma base, alinhados para formar um ângulo de  $90^\circ$ . Com a roseta em duas direções, é possível apresentar a deformação em um eixo principal e um secundário da peça. Na Figura 12 é exposto a representação dessa tipologia de sensor.

II. Roseta de três direções: é utilizado quando não se conhecem os eixos de deformação principais. A montagem é composta por três extensômetros sobrepostos na mesma base, dispostos em ângulos específicos entre si. O princípio subjacente para formar o tipo de agrupamento de sensores é a obtenção da resultante por meio do Círculo de Mohr. Na Figura 13 é exposto a representação dessa tipologia de sensor.

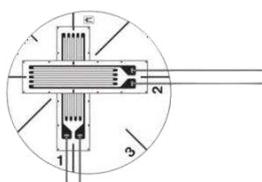
III. Extensômetro com modelos especiais:

a) Extensômetro tipo diafragma: normalmente são aplicados na presença de transdutores de pressão. Formados por quatro sensores sobre a mesma base, capazes de medir deformações em duas direções diferentes. Na Figura 14 é evidenciada a tipologia desse sensor.

b) Extensômetro para medida de tensão residual: sobrepostos no mesmo material de suporte, são utilizados três extensômetros dispostos de forma estratégica para possibilitar a medição da tensão residual por meio deste método. Na Figura 15 abaixo é evidenciado a representação da tipologia desse sensor.

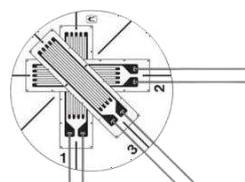
c) Extensômetro para transdutores de carga: nesta tipologia especial, são necessários dois extensômetros dispostos lado a lado, colocados sobre uma mesma base para serem utilizados em células de carga. Na Figura 16 é evidenciada a tipologia desse sensor.

Figura 9 -  
Extensômetro biaxial.



Fonte: Kyowa (2018).

Figura 10 -  
Extensômetro triaxial.



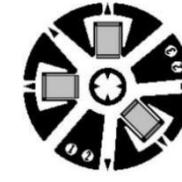
Fonte: Kyowa (2018).

Figura 11 -  
Extensômetro tipo  
diafragma.



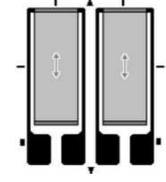
Fonte: Catálogo  
HBK.

Figura 12 -  
Extensômetro para  
tensão residual.



Fonte: Barreto Júnior  
(1998).

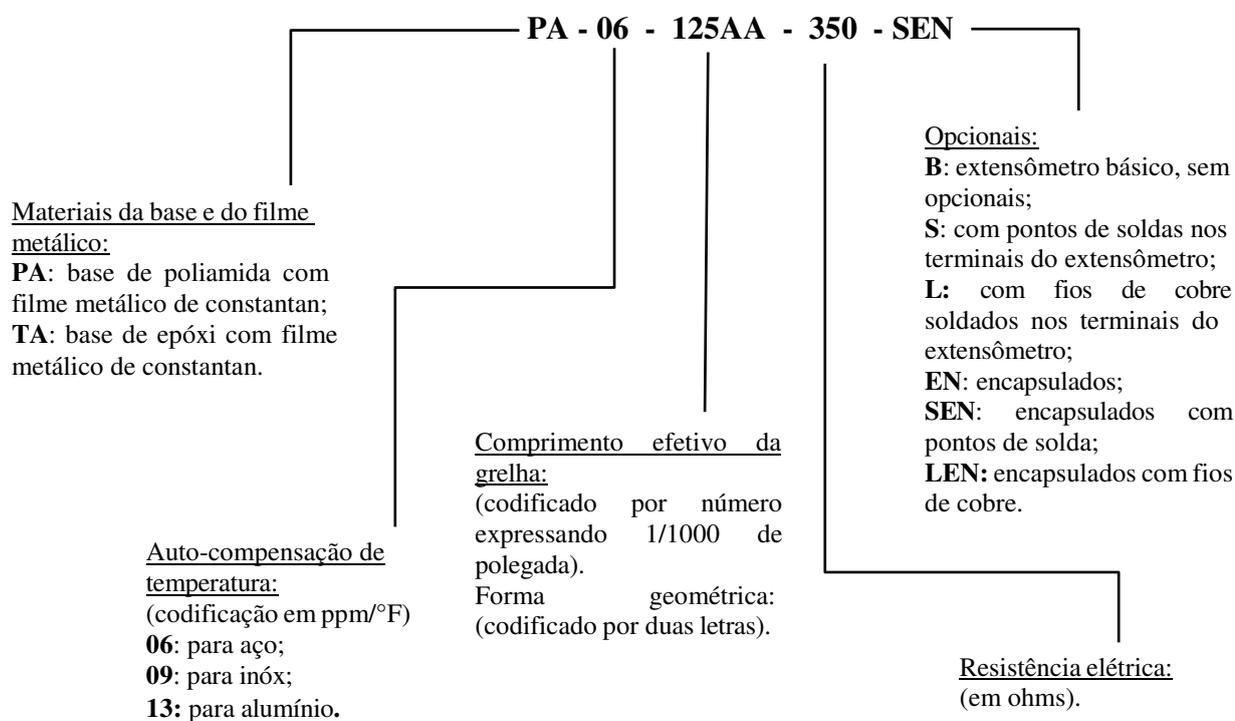
Figura 13 -  
Extensômetro  
axial duplo.



Fonte: Barreto  
Júnior (1998).

### 2.2.4. Sistema de Codificação

A grande variedade de extensômetros disponíveis no mercado são classificados de acordo com o material, utilização e tamanho, conforme explicado por Andolfato (2004). Para facilitar a identificação, cada fabricante atribui uma codificação específica a cada extensômetro. Os códigos são compostos por uma sequência de números e letras, onde cada elemento representa uma propriedade que identifica o extensômetro. A seguir, apresenta-se a descrição da nomenclatura com base na classificação desenvolvida pela empresa brasileira Excel, dos códigos que compõem o extensômetro utilizado no presente projeto.

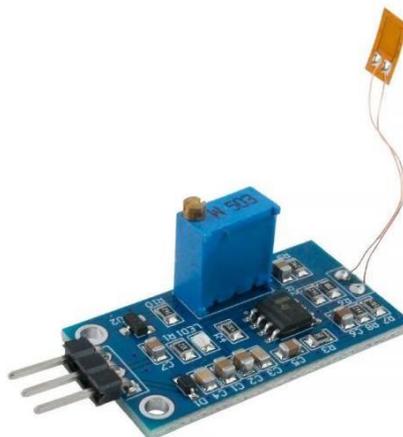


Fonte: Excel (2013), adaptada pelo autor.

É essencial que todas as empresas fabricantes de extensômetros forneçam uma legenda em seus catálogos contendo todas as informações necessárias para a seleção do sensor mais adequado à função que irá desempenhar. Isso evita o desconhecimento de informações importantes e possíveis variações entre os produtos. Embora a codificação possa variar entre os fabricantes, a lógica para a identificação geralmente é mantida, sendo apenas a posição das letras podendo mudar.

## 2.3. Módulo Sensor *Strain Gauge*

Figura 14 - Módulo Sensor Strain Gauge BF350-3AA.



Fonte: UsinaInfor (2023).

De acordo com Hareendran T.K. (2022), o módulo de sensor *Strain Gauge* consiste na combinação do extensômetro linear de resistência à folha (BF350), um regulador de tensão excitação/referência (TL431) e um dispositivo amplificador de circuito ponte de extensômetro (LM358).

A escolha correta exige conhecer as características de operação do extensômetro, tais como:

- Limite máximo de deformação do extensômetro;
- Corrente máxima suportada pelo extensômetro;
- Temperatura à qual o extensômetro estará submetido durante sua utilização;
- Durabilidade que o extensômetro pode alcançar.

## 2.4. Fator de calibre (K)

De acordo com Silva (2019), os extensômetros apresentam grande sensibilidade à deformação, medida pelo fator de calibração representado pela letra K. O fator é resultado da relação entre a variação de resistência e a deformação ocorrida na peça, conforme demonstrado pela Equação 14.

Para obter a relação da deformação em função da variação da resistência, Silva modifica a Equação 14 na Equação 15, como apresentado posteriormente.

$$K = \frac{\Delta R_s}{\epsilon R_s} \quad (\text{Equação 6})$$

$$K \epsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (\text{Equação 7})$$

onde,  $R_s$  é a resistência nominal do *Strain Gauge* e  $\Delta$  é a variação dessa resistência.

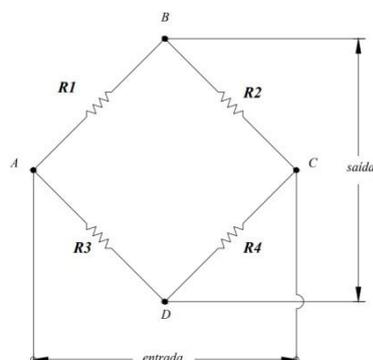
## 2.5. Ponte de *Wheatstone*

A ponte de *Wheatstone* é um circuito frequentemente utilizado para medir de forma precisa pequenas variações de resistência. Ele é formado por um arranjo de resistores que permite a obtenção de um valor de tensão específico no circuito, baseado na divisão de tensão (Andolfato, 2004; Santos e Chaves, 2021).

A montagem do circuito de ponte de *Wheatstone* pode ocorrer de diversas maneiras, dependendo da quantidade necessária de extensômetros e sua finalidade funcional. Os circuitos existentes são um quarto de ponte, meia ponte, três quartos de ponte e ponte completa (Gallina, 2003; Grante, 2004).

Segundo Santos e Chaves (2021), a metodologia desse circuito é composta por dois ramos paralelos interligados por uma fonte de tensão contínua, de modo que as correntes se dividem na entrada e se recombina na saída do circuito. A ponte de *Wheatstone* entra em desequilíbrio quando sua tensão de saída não é zero. De forma geral, o circuito é composto por quatro resistores ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ ), como demonstrado na Figura 18 abaixo, de acordo com Andolfato (2004).

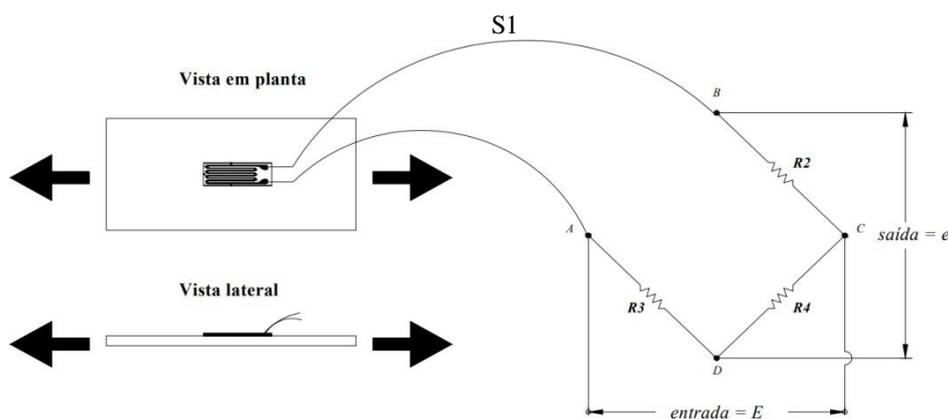
Figura 15 - Circuito ponte de *Wheatstone*.



Fonte: Andolfato (2004).

Para a realização deste trabalho, é utilizado o circuito um quarto de ponte de *Wheatstone*. Este tipo de conexão é ideal para medir a deformação do corpo de prova em uma direção. A seguir, a Figura 19 evidencia a representação da ligação deste circuito.

Figura 16 - Alongamento do extensômetro devido a deformação em função da tensão à compressão submetido ao concreto (circuito um quarto ponte de *Wheatstone*).



Fonte: Andolfato (2004).

Aplicando a lei de Kirchhoff, Silva *et al.* (2019), utilizam uma equação que relaciona a tensão de alimentação  $V_{ex}$  e a tensão lida pelo dispositivo de leitura  $V_e$ . Os valores dos resistores são obtidos através a equação abaixo:

$$V = \left( \frac{R2}{R2 + R1} - \frac{R4}{R3 + R4} \right) V_{ex} \quad (\text{Equação 8})$$

Como citado anteriormente, o circuito de Ponte de *Wheatstone* possui sua quantidade de resistores dependendo da quantidade de transdutores e da precisão para leitura. A seguir é apresentado o princípio básico do equilíbrio de tensão do circuito. Para tal propósito, R1 deve selecionado com o mesmo valor de resistência de saída que S1 (extensômetro), ao passo que R2, R3 e R4 devem ser iguais, fazendo assim que o voltímetro apresente o valor igual a 0.

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (\text{Equação 9})$$

Adotando que todos os resistores da equação 9 e o extensômetro S1 possuem a resistência igual  $R \pm \Delta R$ , onde  $+\Delta R$  corresponde à variação devido à tração e  $-\Delta R$  correspondendo à compressão, é possível alcançar a seguinte equação abaixo.

$$V = \left( \frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) V_{ex} \quad (\text{Equação 10})$$

Dividindo a equação anterior 10 por R tanto no numerador quanto no denominador, resulta na Equação 11. Nela, é possível substituir  $\Delta R/R$  pela Equação 7 de calibração e obter a razão entre as tensões.

$$V = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + \frac{\Delta R}{R}} V_{ex} \quad (\text{Equação 11})$$

$$\frac{V}{V_{ex}} = \frac{K\epsilon}{4 + K\epsilon} \quad (\text{Equação 12})$$

Por questão de facilidade para trabalhar com as unidades, a razão das tensões de  $V/V_{ex}$ , expressa em (V/V), é multiplicada pelo fator de 1000, com o intuito de converter as unidades da razão de tensão para (mV/V). Após essa multiplicação pelo fator, é multiplicada novamente por  $10^{-6}$ , para que toda a Equação 13 possua como unidade ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

$$\frac{V}{V_{ex}} = \frac{K\epsilon * 10^{-3}}{4 + K\epsilon * 10^{-6}} \quad (\text{Equação 13})$$

Utilizando o extensômetro, S1, e sabendo que todos os resistores possuem o valor R, sendo S1 configurado para apresentar  $R - \Delta R$ . Modificou-se a Equação 14 e aplicando a Equação 8 para obter a Equação 15, como mostrado a seguir.

$$V = -\frac{\Delta R}{2R} V_{ex} \quad (\text{Equação 14})$$

$$\frac{V}{V_{ex}} = \frac{K\epsilon * 10^{-3}}{2} \quad (\text{Equação 15})$$

Webber (2008), em seu trabalho, descreve os passos para realizar a leitura dos extensômetros após a deformação do concreto. A seguir, evidenciam-se pela Figura 20 os procedimentos desse processo de leitura:

Figura 17 - Diagrama do processamento da informação.



Fonte: Weber (2008).

Em sua primeira fase, ocorre a aplicação da carga e a consequente produção de deformação como resposta a essa força. O grau de deformação é influenciado pelo material utilizado (Weber, 2008).

Na segunda fase, monta-se e interliga-se o circuito com o extensômetro. O circuito é responsável por fornecer o sinal elétrico resultante da variação da resistência elétrica causada pela mudança na geometria do extensômetro devido à deformação sofrida (Weber, 2008).

Por fim, na terceira fase, os sinais elétricos gerados pelas deformações elásticas são de baixa intensidade, sendo necessária a utilização de amplificadores para medição da variação da resistência elétrica. Frequentemente, emprega-se amplificadores para aumentar os sinais e reduzir os ruídos que possam interferir na transdução do sinal da leitura dos extensômetros (Weber, 2008).

## 2.6. *Arduino*

Silva *et al.* (2019), citado por Pinheiro (2015), destaca a existência de uma ampla variedade de dispositivos para aquisição de dados, porém alguns se tornam inviáveis devido ao alto custo de aquisição para seu uso. Diante desse cenário, o *Arduino* surge como uma solução de baixo custo e com um sistema que possibilita a interligação com outros dispositivos eletrônicos.

Como mencionado anteriormente, o sistema desenvolvido no presente trabalho tem como objetivo a obtenção da deformação dos extensômetros. Para isso, é utilizado o *Arduino*, uma placa capaz de transformar sinais elétricos em grandezas físicas, prototipando os sinais por meio de códigos abertos e executados pela própria plataforma disponível desse dispositivo (Silva *et al.*, 2019).

O *Arduino* é uma placa única, projetado para processar dados de entrada e saída e estabelecer interligações entre o dispositivo e os elementos conectados a ele. Utiliza uma linguagem de programação própria baseada em C/C++. A IDE é uma plataforma que permite a programação dos códigos e está disponível no próprio site do dispositivo, possibilitando a escrita de códigos na linguagem que ele reconhece. Os códigos consistem em instruções que obtêm as informações dos aparelhos conectados ao *Arduino* e as executam (McRoberts, 2010).

Na Figura 21 é evidenciado a placa de *hardware* do dispositivo *Arduino Uno* utilizada para interligação e programação do sistema proposto no presente trabalho.

Figura 18 - Arduino Uno.



Fonte: Conrad (2024).

## 2.7. Módulo HX711

Devido à pequena variação da resistência, que resulta em uma tensão muito baixa, em torno de milivolts (10 mV/V), o módulo HF711 é empregado para superar essa limitação. Segundo Cerutti (2003), a precisão na leitura da deformação é ainda mais aprimorada com a adição de um amplificador, o módulo HX711. O dispositivo melhora o sinal, permitindo que os resultados tão pequenos sejam transformados em informações legíveis, amplificando os sinais em até 128 vezes. Além disso, o módulo é procurado por incluir um conversor de sinais.

Figura 19 - Módulo HX-711.



Fonte: Robot Electronica - Alterado para o trabalho.

Segundo Puhlmann (2015), os transdutores de sinal são dispositivos capazes de converter grandezas físicas em sinais elétricos, que podem ser de potência, tensão ou corrente.

Após essa conversão, para que os sinais elétricos sejam apresentados, é necessária a transformação do sinal analógico (tensão) em sinal digital, possibilitando sua manipulação e processamento digital.

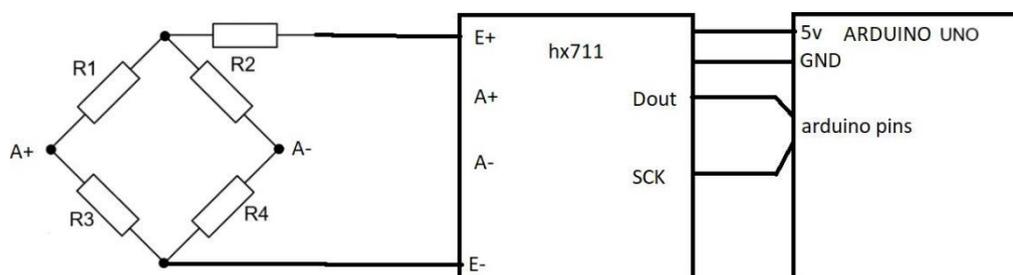
Figura 20 - Transdutor de sinal.



Fonte: Weber (2008).

Para realizar a conversão dos sinais elétricos em grandezas físicas, Marques Júnior (2016) utiliza o sistema de ligação do circuito Ponte de *Wheatstone* para obter uma boa sensibilidade no instrumento de medição, como o *Arduino*, que permite a captura desses sinais emitidos pelo módulo HX711.

Figura 21 - Esquematização do sistema ponte de Wheatstone - Módulo HX711 - Arduino.



Fonte: *Electrical Engineering*. Alterado para o trabalho (2023).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Para este trabalho, utilizar os seguintes materiais:

- Pistola de ar;
- Lápis Grafite;
- Lixa;
- Gaze;
- Álcool;
- Cianoacrilato (cola);
- Pinça;
- Fita adesiva;
- 03 Extensômetros elétricos (modelo BF350);
- 01 Módulo sensor *Strain Gauge* BF350-3AA.
- Fio de solda eletrônica;
- 01 *Arduino Uno*;
- 01 cabo micro *USB* (para *Arduino*);
- Fios jumper, calibre 22;
- Prensa Mecânica Manual modelo FT 02;
- 03 Corpos de Prova;

#### 3.2. Métodos

Os corpos de prova cilíndricos utilizados para o desenvolvimento do sistema possui como dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Sua produção foi desenvolvido através da análise da resistência do concreto submetido à altas temperaturas sob o efeito da tração, artigo publicado de Torres (2024).

No processo de formação dos corpos de prova, para a dosagem do concreto, utilizou-se da análise granulométrica experimental dos agregados, posteriormente compactação correta, seguida da proporção cimento-agregado para finalmente obter um concreto com fck de 30 MPa (Torres, 2024).

### 3.2.1. Instalação dos Extensômetros

A etapa inicial consiste no desenvolvimento dos primeiros passos para fixar os extensômetros à superfície da peça, garantindo a reprodução fiel de todas as microdeformações que ocorrem nela.

De acordo com Voelz (2019), a preparação adequada da superfície é crucial para garantir a correta fixação dos extensômetros. A seguir, descreve-se detalhadamente o procedimento passo a passo para aplicar os *Strain Gauges* na base do ensaio, bem como os cuidados necessários para evitar possíveis divergências nos resultados.

- Preparação da superfície:

Para a instalação dos extensômetros, todo o processo foi conduzido com cautela para evitar erros durante as medições. Primeiramente, foi delimitada a área de trabalho com um lápis de grafite fino. Em seguida, a superfície foi lixada com uma lixa fina em um ângulo central de  $45^\circ$  em relação ao extensômetro, seguido por um ângulo de  $-45^\circ$ , totalizando um ângulo de  $90^\circ$ . Isso foi feito para criar sulcos mais pronunciados nos dois sentidos (X e Y), permitindo que a cola penetrasse melhor na superfície. Posteriormente, a área lixada foi cuidadosamente limpa com gaze e álcool. É importante ressaltar a importância da escolha dos materiais para garantir a adequada fixação, evitando que resíduos prejudiquem a aderência na área de trabalho.

Após a preparação da superfície, o próximo passo foi realizar a colagem dos extensômetros. Para facilitar o posicionamento correto e subsequente fixação dos *Strain Gauges*, foi aplicada suavemente fita adesiva na área preparada para delimitar a região onde os extensômetros seriam fixados. Com o auxílio de uma pinça, os extensômetros foram posicionados na fita adesiva, prontos para a colagem da parte não soldada. Após completar essa operação em um lado do corpo de prova, o procedimento foi replicado no outro lado. É importante ressaltar que os extensômetros foram mantidos centralizados e paralelos à superfície do corpo de prova durante todo o processo.

- Colagem:

Na colagem, foi utilizado cianoacrilato como adesivo, aplicando apenas uma gota desse material no corpo de prova. Isso foi feito para evitar a formação de uma nova superfície entre o extensômetro e o corpo de prova, o que poderia dificultar a deformação conjunta do extensômetro e do corpo de prova durante o ensaio. No entanto, também foi necessário ter cuidado para não aplicar uma quantidade insuficiente de cola, o que poderia resultar na falta de

adesão do extensômetro. Portanto, foi importante garantir que a quantidade de cola fosse proporcional à dimensão do *Strain Gauge* em questão.

Todo o manuseio dos extensômetros foi realizado com o auxílio de uma pinça, um instrumento essencial para a aplicação da cola no extensômetro. Isso foi feito com leve pressão, garantindo cuidadosamente que as mãos não transferissem oleosidade para o material, o que poderia causar oxidação. Após um período de cura de aproximadamente 10 a 15 minutos, a fita adesiva foi removida e verificou-se se a colagem foi bem-sucedida, observando se o *Strain Gauge* permanecia no lugar durante a remoção do adesivo. Em seguida, o local foi limpo para finalizar o processo.



Figura 22 - Instalação do Extensômetro no corpo de prova.

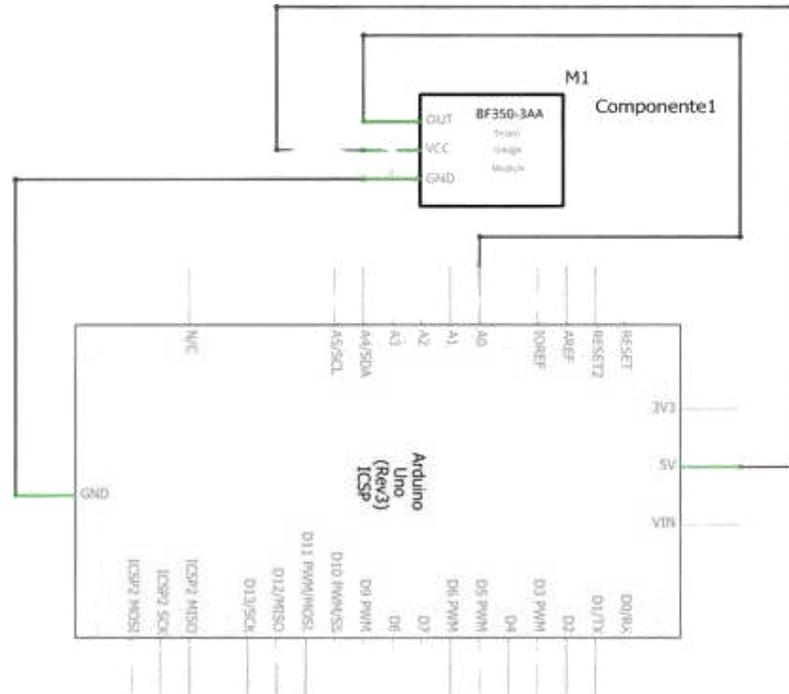
Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.2.2. Conexão dos Dispositivos

A conexão com outros dispositivos envolve a interligação dos três fios de saída do extensômetro à entrada do *Arduino*, cada um desempenhando uma função específica: positivo, negativo e sinal. Na metodologia empregada, o fio vermelho de saída do pino VCC do módulo de extensômetro é conectado à porta de 5V do *Arduino*. O fio preto, responsável pelo negativo, é conectado do pino GND do módulo à porta GND do *Arduino*. Por fim, o fio terra, na cor amarela, parte do pino OUT do módulo para a porta A0 do *Arduino*. A tensão de alimentação de entrada é de 5 volts, e a tensão de saída no pino de saída varia de 0 a 3,5 volts.

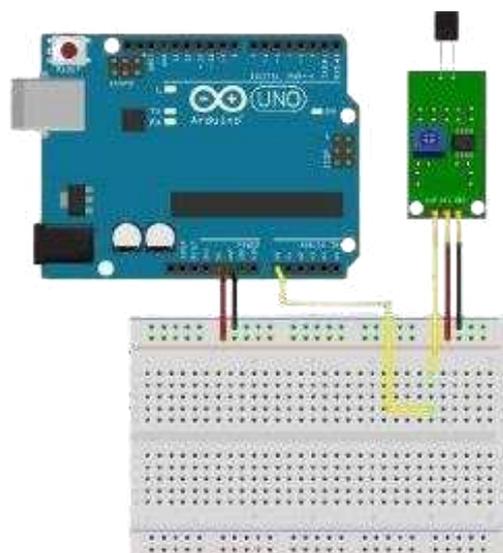
A seguir, é demonstrado o esquema de interligação do módulo de extensômetro com o *Arduino* para que a leitura da programação possa ocorrer posteriormente.

Figura 23 - Esquemático do sistema, 2024.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 24 - Diagrama de conexão dos componentes para os dados Aquisição.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 25 - Conexão do Sistema.



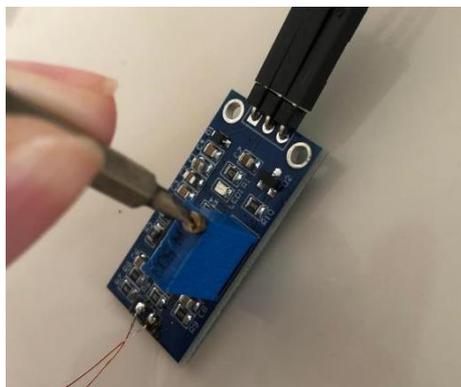
Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3. Programação do Sistema

#### 3.3.1. Calibração

Antes da aplicação das cargas no corpo de prova pela prensa mecânica, foi realizada a calibração do módulo sensor Strain Gauge BF350-3AA. Inicialmente, os códigos do sistema foram processados através da plataforma do Arduino e apresentados o percentual de deformação. Em seguida, o pino do módulo foi ajustado para que o percentual zerasse, tornando possível prosseguir com a medição da deformação partindo da origem, assim que o carregamento começasse. A Figura 29 demonstra o processo de calibração do módulo.

Figura 26 - Calibração do Módulo de sensor.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3.2. Código

No presente trabalho, utilizou-se o próprio programa do *Arduino* para a transmissão e leitura da conexão dos dispositivos. Inicialmente, é instalada no *hardware* do *Arduino* a biblioteca HX711 e incluída na programação.

Um exemplo de código, apresentado por Lubus M. (2021), é semelhante ao proposto neste trabalho. O código de exemplo começa com a definição do número do pino do link e a declaração de variáveis para armazenar os resultados.

Na sub-rotina de configuração, há apenas uma configuração da linha serial (monitor serial) para 9600, velocidade para a conexão e impressão dos dados medidos no computador.

Na primeira etapa, em um loop infinito, o valor analógico do pino definido é lido em uma variável e, em seguida, convertido em uma porcentagem. Essa conversão é feita usando a função de mapeamento, onde o intervalo de entrada de 0 a 700 é convertido para o intervalo de 0 a 100. O valor de entrada de 700 corresponde a aproximadamente 3,42 volts, onde o máximo de 1023 corresponde a 5 volts.

Após a conclusão do cálculo, os dois conjuntos de dados são impressos na linha serial e o programa aguarda 500 milissegundos antes de ser executado novamente.

Utilizando a base da programação de Lubus, modifiquei um pouco o código para que a unidade dos valores lidos e apresentados fosse em MPa, conforme exigido pelas normas da ABNT. O código utilizado é apresentado nos anexos deste trabalho.

## 3.4. Ensaio de Compressão dos Corpos de Prova

O ensaio de compressão empregado no presente trabalho envolve a utilização de uma prensa mecânica, de modelo FT 02, com capacidade de carga de 200 toneladas. O aparelho permite que o concreto seja submetido à tensão de compressão através da aplicação de cargas até sua ruptura. Os corpos de provas foram submetidos a cargas manuseadas manualmente pela prensa, adotando o controle de aplicação dessas cargas entre 6 e 7.

A seguir, são descritos os processos do ensaio, realizados para três corpos de prova:

I. Posicionamento na prensa: Para cada teste desenvolvido, os corpos de prova foram posicionados de forma centralizada, garantindo o máximo de contato entre os pratos da prensa.

II. Aplicação das cargas: Para a análise da deformação ocorrida no corpo de prova, o aparelho aplicou cargas graduais até a ruptura do concreto.

Figura 27 - Máquina de ensaios de compressão.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.5. Relação entre Tensão-Deformação

Para o desenvolvimento dos gráficos da relação tensão-deformação, foram registrados os valores das forças aplicadas pela prensa e as deformações correspondentes durante o ensaio de compressão. A unidade do carregamento da prensa é Tf (tonelada-força), sendo assim, foi necessário a conversão para Newtons (N), conforme o Sistema Internacional de Unidades (SI).

O cálculo da área foi realizado utilizando a Equação 2, com base nas dimensões dos corpos de prova (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura). Para a determinação da tensão partiu-se da aplicação da Equação 4.

Os resultados da deformação foram obtidos através da programação dos extensômetros, cuja leitura se baseou no percentual de variação da resistência.

### 3.6. Cálculo do Módulo de Elasticidade

Diante dos gráficos de tensão-deformação, foram escolhidos dois pontos pertencentes ao comportamento linear da curva. A variação da tensão e da deformação nesses pontos foi calculada para, posteriormente, utilizar a Equação 5.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ➤ Corpo de Prova 1

Para o corpo de prova 1, é possível observar pela Tabela 1 a série de medições de força (N), área (A), tensão ( $\sigma$ ), e deformação ( $\epsilon$ ). Com base nos dados, a tensão variou de 8,5406 MPa a 34,0624 MPa enquanto a deformação aumentou de 0% a 92,75%. A partir dessas medições, foi possível calcular o módulo de elasticidade (E) utilizando dois pontos apontados na Figura 31 para obter a variação da tensão e deformação, alcançando a medida da rigidez do material.

Os dados indicam que o material do corpo de prova 1 tem uma alta capacidade de resistir a tensões, com um módulo de elasticidade calculado em torno de 56,2303 GPa, conforme demonstrado pelos cálculos de tensão e deformação, exibido posteriormente pela Tabela 4.

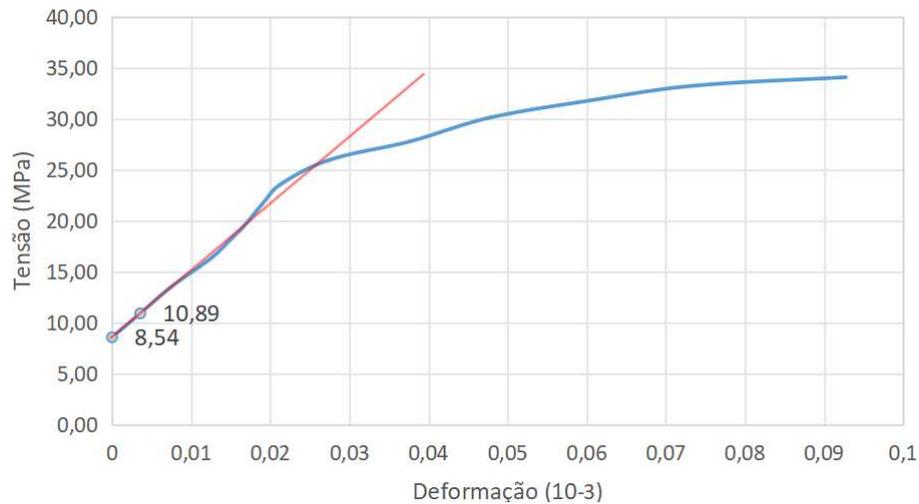
Tabela 1 - Relação tensão-deformação do CPI

| <b>Corpo de Prova 1</b> |                               |                                     |   |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|
| <b>Força</b><br>(N)     | <b>A</b><br>(m <sup>2</sup> ) | <b><math>\sigma</math></b><br>(MPa) | <b><math>\epsilon</math></b><br>(10 <sup>-3</sup> ) |
| 16769,3715              | 0,0020                        | 8,5406                              | 0,00  |
| 21378,4970              | 0,0020                        | 10,8880                             | 3,57  |
| 26370,0819              | 0,0020                        | 13,4302                             | 7,38  |
| 32265,8398              | 0,0020                        | 16,4329                             | 12,72   |
| 36092,5712              | 0,0020                        | 18,3818                             | 15,29   |
| 37756,0438              | 0,0020                        | 19,2290                             | 16,42   |
| 42463,5202              | 0,0020                        | 21,6265                             | 19,00   |
| 46188,6645              | 0,0020                        | 23,5237                             | 21,25   |
| 50896,5331              | 0,0020                        | 25,9214                             | 27,40   |
| 54524,9740              | 0,0020                        | 27,7693                             | 37,70   |
| 59036,0330              | 0,0020                        | 30,0668                             | 47,60   |
| 62370,2940              | 0,0020                        | 31,7649                             | 60,30   |
| 65214,2225              | 0,0020                        | 33,2133                             | 73,35   |
| 66881,3530              | 0,0020                        | 34,0624                             | 92,75   |

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 31 expõe a tensão-deformação do corpo de prova 1 demonstra uma breve relação linear na fase inicial, indicando um comportamento elástico típico até a tensão de aproximadamente 15 MPa. A partir daí, o gráfico apresenta uma curva mais suave até a ruptura, evidenciando a fase plástica do material.

Figura 28 - Gráfico tensão-deformação do CP1.



Fonte: Autoria própria (2024).

### ➤ Corpo de Prova 2

No corpo de prova 2, as medições apresentam uma variação na força de 32360,1945 N a 90769,4208 N. A tensão correspondente variou de 1,6482 MPa a 46,2285 MPa e a deformação de 0% a 98,84%. Para obter o módulo de elasticidade desse corpo de prova, foi desenvolvido o mesmo processo do corpo de prova 1, fundamentando-se pela variação entre dois pontos. Na Figura 32 evidencia o comportamento desse concreto durante o ensaio.

O resultado do módulo de elasticidade para este corpo de prova é de aproximadamente 54,1445 GPa, o que indica uma rigidez considerável do material testado em ensaio. Na Tabela 2 é exposto os carregamentos aplicados durante o ensaio, assim como, a área do corpo de prova 2, sua tensão calculada e por fim o módulo de elasticidade para cada tensão encontrada durante o ensaio de compressão no corpo de prova 2.

Tabela 2 - Relação tensão-deformação do CP2.

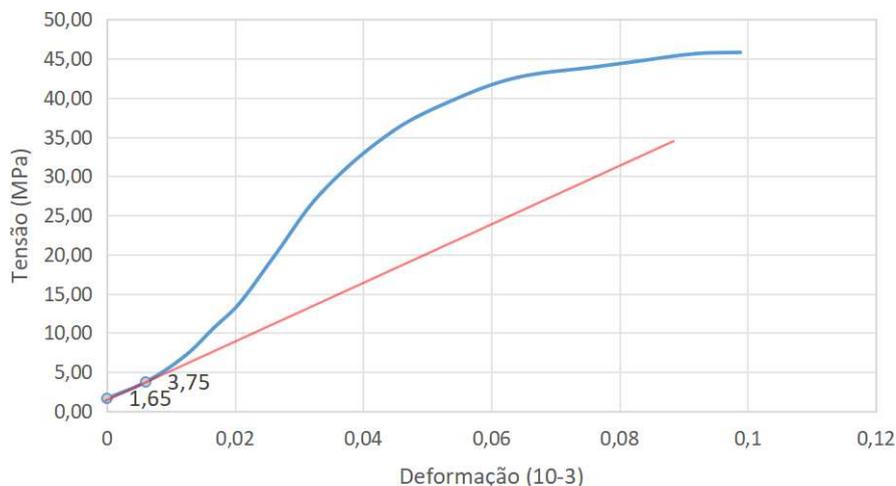
| <b>Corpo de Prova 2</b> |                              |                                      |  |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>Força<br/>(N)</b>    | <b>A<br/>(m<sup>2</sup>)</b> | <b><math>\sigma</math><br/>(MPa)</b> | <b><math>\epsilon</math><br/>(10<sup>-3</sup>)</b> |
| 3236,1945               | 0,0020                       | 1,6482                               | 0,00   |
| 7354,9875               | 0,0020                       | 3,7459                               | 6,05   |
| 13829,4751              | 0,0020                       | 7,0433                               | 12,14  |
| 21006,0502              | 0,0020                       | 10,6983                              | 16,76  |
| 26674,0880              | 0,0020                       | 13,5850                              | 20,48  |
| 38837,1681              | 0,0020                       | 19,7796                              | 26,10  |
| 55023,9952              | 0,0020                       | 28,0235                              | 33,62  |
| 70128,3740              | 0,0020                       | 35,7161                              | 44,57  |
| 78164,1784              | 0,0020                       | 39,8087                              | 54,29  |
| 83650,7245              | 0,0020                       | 42,6030                              | 64,06  |
| 86361,3806              | 0,0020                       | 43,9835                              | 76,54  |
| 87671,4216              | 0,0020                       | 44,6507                              | 82,63  |
| 90190,3871              | 0,0020                       | 45,9336                              | 91,86  |
| 90769,4208              | 0,0020                       | 46,2285                              | 98,84  |

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 32 o gráfico do corpo de prova 2 também apresenta uma fase inicial linear, mas com um módulo de elasticidade ligeiramente menor que o corpo de prova 1. A tensão atinge valores elevados antes da transição para a fase plástica.

É possível notar uma fase plástica prolongada, onde o material suporta grandes deformações antes de falhar.

Figura 29 - Gráfico de tensão-deformação do CP2.



Fonte: Autoria própria (2024).

➤ **Corpo de Prova 3**

Para o Corpo de Prova 3, as medições indicaram uma variação na força de 4118,7930 N a 43562,0905 N, com a tensão variando de 2,0977 MPa a 22,1860 MPa e a deformação de 0% a 99,80%. O módulo de elasticidade deste corpo de prova é menor comparado aos outros dois, com um valor de cerca de 42,1364 GPa, refletindo uma rigidez relativa menor. Calculado devido a variância da tensão e deformação entre dois pontos apontados pela Figura 33.

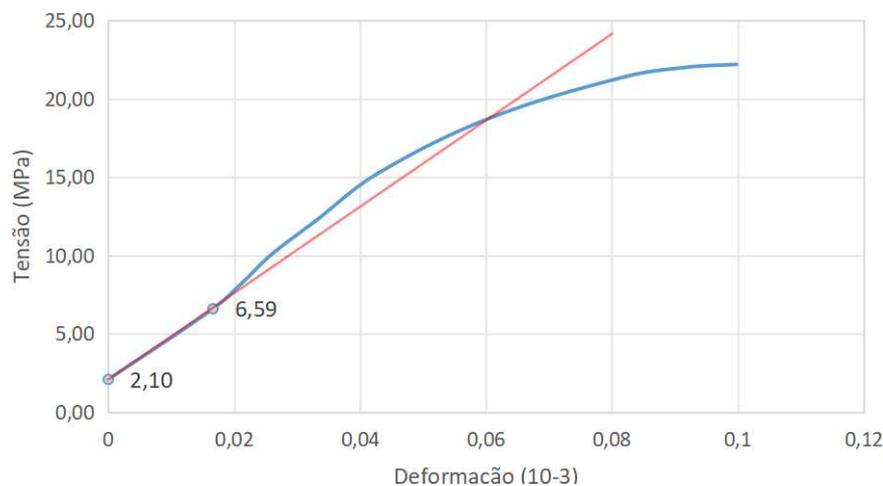
Tabela 3 - Relação tensão-deformação do CP3.

| <b>Corpo de Prova 3</b> |                               |                   |                                 |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| <b>Força</b><br>(N)     | <b>A</b><br>(m <sup>2</sup> ) | <b>σ</b><br>(MPa) | <b>ε</b><br>(10 <sup>-3</sup> ) |
| 4118,7930               | 0,0020                        | 2,0977            | 0,00                            |
| 12949,0439              | 0,0020                        | 6,5949            | 16,62                           |
| 16185,2776              | 0,0020                        | 8,2431            | 21,24                           |
| 20007,6156              | 0,0020                        | 10,1898           | 25,86                           |
| 23830,1595              | 0,0020                        | 12,1366           | 32,71                           |
| 29910,2825              | 0,0020                        | 15,2332           | 42,81                           |
| 36873,0040              | 0,0020                        | 18,7793           | 60,71                           |
| 42070,4304              | 0,0020                        | 21,4263           | 82,33                           |
| 43242,4428              | 0,0020                        | 22,0232           | 92,30                           |
| 43562,0905              | 0,0020                        | 22,1860           | 99,80                           |

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 33 aponta o gráfico do corpo de prova 3, exibindo um comportamento semelhante com uma fase inicial linear seguida por uma transição para a fase plástica. No entanto, o módulo de elasticidade é o menor entre os três corpos de prova.

Figura 30 - Gráfico tensão-deformação do CP3



Fonte: Autoria própria (2024).

#### 4.1. Análise dos comportamentos dos resultados

Para comparação do módulo de elasticidade encontrado durante os ensaios de compressão, foi utilizado a equação do módulo de elasticidade inicial para o concreto aos 28 dias após sua moldagem. A Equação 16, mostra os coeficientes e valores utilizados para obter o módulo inicial.

$$E_{ci} = 5600 * (f_{ck})^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 16})$$

onde  $f_{ck}$  é a resistência a compressão encontrada durante os ensaios desenvolvidos.

A título de comparação com o módulo de elasticidade calculado pela Equação 16, a análise da variação para o módulo de elasticidade ensaiado nos três corpos de prova foi realizado através da média calculada diante os três resultados obtidos pelo ensaio. A Tabela 4 evidencia a tensão, deformação e o módulo de elasticidade de cada ensaio com os corpos de prova.

Tabela 4 - Comparação do módulo de elasticidade dos corpos de prova.

| CP -<br>Cilíndrico | $\Delta\sigma$<br>(Mpa) | $\epsilon$<br>( $10^{-3}$ ) | E<br>(GPa)     |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1                  | 3,0027                  | 5,34                        | 56,2303        |
| 2                  | 3,2974                  | 6,09                        | 54,1445        |
| 3                  | 1,9467                  | 4,62                        | 42,1364        |
| <b>Média =</b>     | <b>2,7489</b>           | <b>5,35</b>                 | <b>50,8371</b> |

Fonte: Autoria própria (2024).

Em resumo, é notório que os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova revelam comportamentos mecânicos distintos e elucidam a rigidez e a resistência do concreto.

Em análise do comportamento plásticos, todos os corpos de prova mostraram uma capacidade significativa de suportar deformações plásticas antes da falha, com o corpo de prova 3 apresentando a menor rigidez e, portanto, maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Essas informações são fundamentais tanto para a engenharia civil, assim como em disciplinas que dependem de materiais de construção com propriedades mecânicas específicas. A escolha do material adequado com base no módulo de elasticidade e na capacidade de deformação pode impactar diretamente a durabilidade e a segurança das estruturas construídas.

## 5. CONCLUSÕES

Assim sendo, são colocadas a seguir as conclusões obtidas com a realização deste trabalho:

Os experimentos realizados com os corpos de prova de concreto, monitorados por extensômetros elétricos, forneceram dados detalhados sobre o comportamento mecânico do material, especificamente em relação ao módulo de elasticidade. Os resultados revelaram diferenças significativas na rigidez e na capacidade de deformação entre os diferentes corpos de prova, destacando a eficácia dos extensômetros elétricos como ferramentas precisas e confiáveis para tais medições.

Os extensômetros elétricos mostraram-se extremamente eficazes para o monitoramento do módulo de elasticidade do concreto. Sua utilização permitiu a obtenção de dados precisos sobre a relação tensão-deformação, essencial para a determinação do comportamento elástico dos materiais. As principais vantagens observadas durante o desenvolvimento da metodologia proposta foram:

- Precisão na Medição: Os extensômetros forneceram medições detalhadas e precisas das deformações, permitindo a determinação exata do módulo de elasticidade;

- Detecção de Fases Elásticas e Plásticas: A capacidade de diferenciar claramente entre as fases elásticas e plásticas do material foi fundamental para entender o comportamento estrutural do concreto sob diferentes níveis de carga;

Consistência dos Dados: Os dados coletados foram consistentes entre os diferentes corpos de prova, permitindo comparações válidas e conclusões confiáveis sobre as propriedades mecânicas do concreto;

- Aplicabilidade Prática: A facilidade de uso dos extensômetros elétricos torna-os ferramentas práticas e eficientes para uso em ambientes de teste laboratoriais e em campo.

Dessa forma, a utilização de extensômetros elétricos no monitoramento do módulo da linha elástica do concreto não só é eficaz como também indispensável para a engenharia civil e outras áreas que dependem da avaliação precisa das propriedades mecânicas dos materiais. A aplicação desses dispositivos pode melhorar significativamente a compreensão e o desenvolvimento de materiais de construção mais seguros e duráveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDOFALTO, Rodrigo. **EXTENSOMETRIA BÁSICA, 2004**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometri-a-basica.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.
2. ARAUJO, S. S. *et al.* **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. IBRACON Structures and Materials Journal, Goiás, v. 5, n. 2, p. 566-575, out.2012.
3. ARDUINO. **Arduino - Introduction**. 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>. Acesso em: 20 marc. 2024.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2023. Projeto de estruturas de concreto - procedimentos. Rio de Janeiro, 2023. 23 p.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformações à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
6. BARRETO JÚNIOR, Euler. Extensometria: manual prático. São Paulo: [s.n.], 1998. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/extensometria-manual-pratico/4709263/>. Acesso em: 20 abr. 2024.
7. CALLISTER JR, William D; RETHWISCH, David R. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. cap. 6, p. 129-817. Disponível em: <https://idoc.pub/documents/ciencia-dos-materiais-callister-8-ed-livro-portuguespdf-klzzgkk67elg>. Acesso em: 02 abr. 2024.
8. DA GRAÇA NUNES, Fábio Wendell. Resistência E Módulo De Elasticidade De Concretos Usados No Rio De Janeiro. 2005. 126 f. Tese ( Mestrado em Ciências ) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
9. DJANIKIAN FILHO, João Gaspar. **Controle do módulo de elasticidade do concreto na estrutura com uso de célula de fluência**. São Paulo: EPUSP, 2010.
10. EXCEL. Extensômetros coláveis de resistência elétrica: acessórios para extensometria. São Paulo: Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda, 2013.
11. GALLINA, Renato. **Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências**. 2003. 75 f. Monografia (Pós-Graduação Lato Sensu em Mecatrônica) - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2003.

12. GRANTE. Apostila de Extensometria. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Disponível em: <https://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf> . Acesso em: 20 abr. 2020.
13. GUZLENA S. *et al.* **Autocura de concreto reforçado com fibra de vidro (GRC) e concreto reforçado com fibra de vidro polimérica (PGRC) usando aditivos cristalinos.** ELSEVIER, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/construction-and-building-materials>. Acesso em: 04 marc. 2024.
14. Hareendran T.K. Electro Schematics, 2022. Introdução ao Módulo do Sensor Strain Gauge. Disponível em: <https://www.electroschematics.com/sensor-module-2/>. Acesso em: 11 abr. 2024.
15. HAREENDRAN, T.K. **Introdução ao Módulo do Sensor Strain Gauge.** ELECTRO SCHEMATICS. [S.l.]. 30 nov. 2022. Disponível em: <https://www.electroschematics.com/sensor-module-2/>. Acesso em: 17 abr. 2024.
16. HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) Test and Measurement GmbH. Disponível em: . Acesso em: 20 abr. 2020.
17. MARQUES JÚNIOR, A. L. Automatização de uma bancada de atrito e desgaste para seleção de materiais de uma bomba de sangue centrífuga implantável. Orientador: Eduardo Guy Perpétuo Bock. 2016. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. São Paulo: [s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/327043243\\_Automatizacao\\_de\\_uma\\_Bancada\\_de\\_Atrito\\_e\\_Desgaste\\_para\\_Selecao\\_de\\_Materiais\\_de\\_uma\\_Bomba\\_de\\_Sangue\\_Centrifuga\\_Implantavel](https://www.researchgate.net/publication/327043243_Automatizacao_de_uma_Bancada_de_Atrito_e_Desgaste_para_Selecao_de_Materiais_de_uma_Bomba_de_Sangue_Centrifuga_Implantavel)>. Acesso em: 20 marc. 2024.
18. MCROBERTS, Michael. **ARDUINO BÁSICO**, 2015, Editora Novatec. Disponível em: [books.google.com.br](https://books.google.com.br). Acesso em: 25 de out. , 2023.
19. **Measuring Strain with Strain Gages.** 2013. Disponível em: [www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages](http://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages). Acesso em: 19, marc. 2024.
20. MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M **CONCRETE Microstructure, Properties and Materials.** Nova Iorque: McGraw Hill LLC 2014. Disponível em: [www.academia.edu](http://www.academia.edu), [s.d.]. Acesso em: 04 marc. 2024.

21. MELO NETO, Antonio A. de; HELENE, Paulo R. L. **Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos.** São Paulo: USP, 2002.
22. METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 1993, **Structure, Properties, and Materials**, Second Edition, Prentice-Hall International, New Jersey.
23. 'Não vai passar, não', diz moradora do Palace 2 a famílias de prédios desabados no Rio. Folha de São Paulo, São Paulo, 14 abr. 2019. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/04/nao-vai-passar-nao-diz-moradora-do-palace-2-a-familias-de-predios-desabados-no-rio.shtml>. Acesso em: 25, marc. 2024
24. NEVILLE A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto.** Tradução de Ruy Alberto Cremonin. ed. 2. Porto Alegre. Bookman, 2013. Disponível em: [https://www.google.com.br/books/edition/Tecnologia\\_do\\_Concreto\\_2ed/cqY5AgAAQB-AJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=inauthor:%22A.+M.+Neville%22&printsec=frontcover](https://www.google.com.br/books/edition/Tecnologia_do_Concreto_2ed/cqY5AgAAQB-AJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=inauthor:%22A.+M.+Neville%22&printsec=frontcover). Acesso em: 04 marc. 2024.
25. NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5ed. São Paulo: São Paulo, 2016.
26. **O DESASTRE DO HYATT REGENCY EM FOTOS E MANCHETES.** The Kansas City Public Library. Kansas City, 13, julh. 2011. Disponível em : <https://kchistory.org/blog/hyatt-regency-disaster-photos-headlines>. Acesso em: 25, marc. 2024.
27. PACHECO, Jessika *et al.* **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto.** IBRACON, 2014. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2024.
28. PAULA, J. A. C. Y. *et al.* **PROPOSTA DE CORREÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE VALORES DE DEFORMAÇÃO EM EXTENSÔMETROS PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL.** REGRASP (ISSN 2526 - 1045), v. 8, n. 3, out. 2023.
29. PINHEIRO, Libânio M. *et al.* **Estruturas De Concreto - Capítulo 2.** São Paulo: USP, 2010. Disponível em: <https://web.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/02%20Concreto.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2024.
30. PUHLMANN, H. F. W. **Trazendo o mundo real para dentro do processador – Conversor A/D.** EMBARCADOS. [S.l.]. 18 set. 2015. Disponível em: <https://embarcados.com.br/conversor-a-d/>. Acesso em 17 abr. 2024.

31. SANTOS, J. A. R.; CHAVES, C. S. **ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA PONTE DE WHEATSTONE PARA A MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.** v. , n. 1, 2021.  
Disponível em: <http://enpe.ptc.iftm.edu.br/index.php/enpe/article/view/283>. Acesso em: 03 abr. 2024.
32. SARTORI, Felipe Silveira *et al.* Análise Comparativa De Métodos De Determinação De Módulo De Elasticidade Em Corpos De Prova De Concreto. REVISTA EXATAMENTO NEWTON. n. 1, p. 41-47, jul./dez. 2020.
33. SHAKEEL, Muhammad. KHAN, Wasim A. RAHMAN, Khalid. Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique. Sensors and Actuators A: Physical – Elsevier. Pág. 123- 130. Mar. 2017.
34. SILVA, A. L. *et al.* **A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 3, e20180206 (2019). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/NVcLkJ4zwNZDCr64zNXPLHS/> . Acesso em: 19 marc. 2024.
35. SILVA, J. B. L. P. *et al.* Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural. Revista Matéria: ISSN 1517-7076 artigo e-12528, 2019. CEATEC – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas
36. TORRES. W. S. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO SUBMETIDO À ALTAS TEMPERATURAS SOB O EFEITO DE TRAÇÃO.** UFCG. Pombal. PB. 2024.
37. VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais.** ed. 13. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. Disponível em: [https://www.academia.edu/36894590/Van\\_Vlack\\_Principios\\_de\\_Ciencia\\_dos\\_Materiais](https://www.academia.edu/36894590/Van_Vlack_Principios_de_Ciencia_dos_Materiais). Acesso em: 03 abr. 2024.
38. WEBER, Albano Luiz. **Metrologia e Instrumentação.** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2008. Disponível em: [http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain\\_gauge%20extensometria.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf) . Acesso em: 03 abr. 2024.

## ANEXOS

Código utilizado para a programação de leitura:

```
// Módulo de extensômetro BF350-3AA
// Configurando um pino de conexão#define pinOut A0// Variáveis para armazenar os
resultados
valor int = 0;
int porcento = 0;
void setup() {
  // Iniciando a comunicação através de uma linha serial
  // a 9600 baud velocidade
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  // Lendo um valor analógico a partir de um pino definido
  hodnota = analogRead(pinOut);
  // Conversão de dados lidos, da faixa analógica (0-700)
  // porcento (0-100)
  porcento = map(hodnota, 0, 700, 0, 100);
  // Imprimindo todas as informações em uma linha serial
  Serial.print("Valor: ");
  Serial.print(hodnota);
  Serial.print(" | ");
  Serial.print(procenta);
  Serial.println("%");
  // Pausa antes de uma nova medição
  delay(500);
}
```