

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
CAMPINAS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E
DE TECNOLOGIAS**

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS COM
UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO**

**CAMPINAS
2018**

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS COM
UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Elisabete Paganelli
Guimarães de Avila Jacintho

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Nadia Cazarim da Silva Forti

**CAMPINAS
2018**

Ficha catalográfica elaborada por Marluce Barbosa – CRB 8/7313
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

t628.5 Silva, João Batista Lamari Palma e.
S586d Desenvolvimento de sistema para monitoramento de estruturas com
utilização da plataforma Arduino / João Batista Lamari Palma e Silva. –
Campinas: PUC-Campinas, 2018.
163f.

Orientadora: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho.

Coorientadora: Nadia Cazarim da Silva Forti.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas,
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação
em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui bibliografia.

1. Monitoramento ambiental. 2. Concreto armado. 3. Interfaces (Compu-
tador). 4. Arduino (Controlador programável). 5. Redes de sensores sem
fio. I. Jacintho, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila. II. Forti, Nadia
Cazarim da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro
de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em
Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD – 22. ed. t628.5

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA

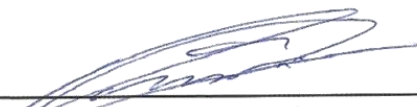
**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS COM
UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana. Orientador (a): Prof. (a) Dr. (a) Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho. Co-orientador (a): Prof. (a) Dr. (a) Nádía Cazarim da Silva Forti.

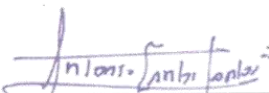
Dissertação defendida e aprovada em 09 de outubro de 2018 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Dedico este trabalho à minha
mãe Ligia, ao meu pai Julio (*in
memoriam*) e ao meu padrasto
Wayne (*in memoriam*);

à memória de meus avós
Zoraide, Alzira, Romeu e Julio;

aos meus alunos e minhas
alunas, com os(as) quais
aprendo constantemente.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo,
por permitir nosso acesso a sua obra.

À minha família e amigos(as),
por me apoiarem durante a realização deste Mestrado.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho,
pela confiança que me foi dada ao decorrer desta pesquisa, bem como por todo incentivo e apoio
prestado para consecução deste Mestrado.

À minha coorientadora Prof.^a Dr.^a Nadia Cazarim da Silva Forti,
por toda colaboração ao decorrer desta pesquisa, inclusive com as revisões desta dissertação.

À Profa. Dr.^a Lia Lorena Pimentel, Coordenadora Acadêmica deste programa de Mestrado,
por todo suporte acadêmico na realização deste Mestrado.

Ao Prof. Dr. Daniel Paz de Araujo,
pela contribuição na programação computacional *web* relacionada ao uso do servidor *FireBase*.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,
por toda colaboração ao decorrer desta pesquisa e pelos conselhos de vida.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar de Alvarenga Lucci,
pelo acolhimento no estágio docente.

Aos Técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC Campinas, Igor Citrangulo Pereira,
Joventino Manoel Gonçalves Filho e Wesley Rodrigues dos Santos,
por todo apoio e auxílio prestado nas atividades desenvolvidas no Laboratório.

Ao Sr. Kaine Ap. Antonio e a Srta. Karoline Carnier,
por todo apoio administrativo prestado durante minha fase discente neste curso.

À Pontifícia Universidade Católica (PUC) de Campinas e a todo seu corpo docente e administrativo,
pela manutenção deste programa de Mestrado.

Ao Tecg.^o Hertezi Lourenço Paulino,
pelas aulas de extensometria.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS),
por permitirem a realização dos testes junto a obra de construção das instalações do SIRIUS, localizado
em Campinas-SP.

À empresa Concremat Engenharia e Tecnologia,
pelo incentivo e apoio para realização deste Mestrado.

1N73LL1G3NC3 15 7H3 4B1L17Y 70 4D4P7 70 CH4NG3.
573PH3N H4WK1NG.
(1942 – 2018)

RESUMO

SILVA, João Batista Lamari Palma e. *Desenvolvimento de Sistema para Monitoramento de Estruturas com Utilização da Plataforma Arduino*. 2018. 163f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

As estruturas de concreto armado, ainda que extremamente difundidas, requerem especial atenção desde sua concepção até sua utilização. Esta atenção pode ser usada para contribuir com o aumento de sua vida útil, já que as patologias podem ser das mais variadas naturezas e causas, o que em muitas vezes torna a análise das condições de integridade estrutural muito complexa. O Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE) busca acompanhar o comportamento da estrutura, para avaliar suas condições, inclusive para verificar a ocorrência de danos e das eventuais necessidades de intervenções, visando a reabilitação estrutural. O MIE automatizado emprega aquisitores de dados que atuam como interface entre os sensores instalados nas estruturas e os sistemas computacionais, tornando sua utilização complexa e cara. Este trabalho teve por iniciativa empregar a plataforma *Arduino*, que é um sistema de prototipagem eletrônica, que utiliza um microcontrolador *Atmel*, de *hardware* e *software* livres, com entradas e saídas analógicas/digitais, de baixo custo e relativa facilidade de operação. Com isto, o objetivo da pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de estruturas, baseado em coleta de dados provenientes de sensores de deformação, deslocamento e força, em estruturas de concreto armado, para aquisição e transmissão remota de dados, para processamento e análise das informações. Foi construído um sistema de aquisição de dados, com a plataforma *Arduino*, sendo que este sistema emprega além da plataforma em questão, amplificadores de sinais e circuitos elétricos do tipo Ponte de *Wheatstone*. Desenvolveu-se um *software* do tipo aplicativo *mobile*, compatível com o sistema operacional *Android*, para que por meio de um *smartphone* ou *tablet*, fosse possível controlar o *Arduino*, mediante comunicação sem fio via *Bluetooth*. Este aplicativo envia e recebe dados, que são processados e analisados analítica e graficamente, decorrentes das informações dos sensores instalados nas estruturas, o qual possibilita a transmissão dos dados em tempo real via *internet*. O sistema foi testado em ensaios de flexão de lâminas metálicas e vigas de concreto armado, instrumentadas com extensômetros de resistência elétrica instalados na armadura e no concreto, como transdutores de deslocamento e células de carga. Além desta estrutura, o sistema também foi testado em um pilar de concreto armado de sustentação de uma ponte rolante, com a instalação de extensômetros na armadura. Nestes testes, a aquisição de dados foi feita por dois sistemas distintos, sendo o primeiro um aquisitor de dados comercial de referência e o segundo o sistema objeto desta pesquisa, para comparação dos dados das leituras obtidas entre ambos equipamentos e valores analíticos, tendo sido obtidos resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Sistema de Monitoramento, Integridade Estrutural, *Arduino*.

ABSTRACT

SILVA, João Batista Lamari Palma e. *Development of System to Structural Heart Monitoring with Arduino Platform Utilization*. 2018. 163p. Dissertation in Masters of Science. Post-Graduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2018.

The structures of reinforced concrete, although extremely diffused, require special attention from its conception, utilization its operation. This kind of attention could contribute for developing more useful time of usage, as since, the pathologies could be most varieties in complexes conditions, and so far is to analyze the integrity of the complexity of the structural condition. Structural Heart Monitoring (SHM) seeks the process of monitoring the behavior of the structure in order to assess the structure's conditions verifying the occurrence of damages and eventually in case of need for interventions, aiming at structural rehabilitation. The automated SHM uses data acquisition which acts as an interface between the sensors installed in the structures and the computational systems could be very complex and expensive. This work had the initiative to use the Arduino platform, which one is an electronic prototyping system, which uses an Atmel microcontroller, free hardware and software, with Analog/Digital inputs and outputs, low cost and relative ease of operation. The objective of this research was the development of a structure monitoring system, based on data collection from strain, displacement and force sensors, on reinforced concrete structures, for the acquisition and remote transmission of data, for processing and analysis of information. A data acquisition system was built with the Arduino platform, and this system has been used besides the platform in question, signal amplifiers and Wheatstone Bridge type circuits. A mobile application as a type of software has been developed, compatible with the Android operating system, through a smartphone or tablet, it was possible to control the Arduino through wireless communication via Bluetooth. This application sends and receives data, which is processed and analyzed analytically and graphically, resulting from the information of the sensors installed in the structures, which enables the transmission of the data in real time, via the internet. This system was tested in bending tests of metallic cantilever and reinforced concrete beams, instrumented with electric resistance strain gauges installed in the reinforcement and concrete, as displacement transducers and load cells. In addition to this structure, the system was also tested on a reinforced concrete column supporting a crane, with the installation of strain gauges in the reinforcement. In these tests, the data acquisition was made by two different systems, the first one being a commercial data acquisition purchaser and the second the system object of this research, to compare the data of the readings, obtained between both equipment and analytical values, establishing satisfactory results.

Key words: System Monitoring, Structural Integrity, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desabamento de trecho do Viaduto do “Eixão” Sul (Brasília-DF)	18
Figura 2. Ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira	18
Figura 3. Ensaio de Carga na Ponte Rio-Niterói	21
Figura 4. Ilustração do teste de flexão de Galileu	23
Figura 5. Ensaio da concepção estrutural da <i>Forth Bridge</i>	24
Figura 6. Ponte sobre o Rio (a); Modelo reduzido (b)	26
Figura 7. Viga da ponte sobre o Rio Mosel durante monitoramento	26
Figura 8. Posicionamento dos sensores e carregamentos.....	27
Figura 9. Subsistemas de um sistema de monitoração	28
Figura 10. Curva Tensão <i>versus</i> Deformação.....	32
Figura 11. Deformação atribuída a σ_x	33
Figura 12. Deformação atribuída a τ_{xy}	34
Figura 13. Elementos de tensão relativos aos eixos xyz	35
Figura 14. Leitura de deformação em três direções (a); Deformações em “ θ ” (b).....	36
Figura 15. Transformação rotacional no plano	37
Figura 16. Roseta de Deformações.....	38
Figura 17. Extensômetro de <i>Berry</i>	38
Figura 18. Tensômetro de Huggenberger	39
Figura 19. Diferentes tipos de Tensômetros de <i>Huggenberger</i>	40
Figura 20. Extensômetro Elétrico – vista em planta	40
Figura 21. Deformação de um fio sob tração (alteração do diâmetro “ d ” para “ d' ”) .	41
Figura 22. Ponte de <i>Wheatstone</i>	43
Figura 23. Analogia mecânica da Ponte de <i>Wheatstone</i>	44
Figura 24. Ponte Hidráulica	44
Figura 25 - Desvio Linear em modo de $\frac{1}{4}$ de Ponte de <i>Wheatstone</i>	45
Figura 26. Circuito com resistores em série	45

Figura 27. Ponte de Wheatstone com resistor de calibração	47
Figura 28. Ponte de Wheatstone nas configurações $\frac{1}{4}$ (“a”), $\frac{1}{2}$ (“b” e “c”) e completa (“d” e “e”).....	49
Figura 29. Extensômetros tipo Rosetas: retangular biaxial (a); retangular triaxial (b); delta triaxial (c).....	50
Figura 30. Circuito com utilização de TDC	51
Figura 31. Sensor de Corda Vibrante.....	51
Figura 32. Seção transversal de representação da fibra óptica	52
Figura 33. Estrutura submetida à esforços (a); Franjas isocromáticas (b)	54
Figura 34. Aplicação de película de resina fotoelástica.....	56
Figura 35. Arranjo de polariscópio plano acoplado a um computador.....	56
Figura 36. Viga indeformada (esquerda) e viga deformada (direita)	57
Figura 37. Curva de deslocamento vertical de uma viga.....	58
Figura 38. Relógio Comparador Analógico	61
Figura 39. Esquema de instalação do Relógio Comparador	61
Figura 40. Transdutor Potênciométrico Linear	62
Figura 41. Esquema Elétrico do Transdutor Potênciométrico Linear	63
Figura 42. Transdutor Capacitivo	64
Figura 43. Sensor de deslocamento capacitivo.....	64
Figura 44. Esquema de Bobinas de Transdutor Indutivo	65
Figura 45. Transdutor Indutivo de Deslocamento.....	66
Figura 46. Esquema de movimentação de um ímã em uma guia-de-ondas	66
Figura 47. Sensor baseado em transdutores magnetostritivo	67
Figura 48. Esquema de um Sistema de Nivelamento Hidrostático.....	67
Figura 49. Célula de Pressão instalada em sistema de nivelamento hidrostático	68
Figura 50. Esquema típico de um sistema de monitoramento computadorizado	69
Figura 51. Grandezas físicas (temperatura) nas formas de sinais analógicos (variações elétricas)	70

Figura 52. Exemplo de conversão de sinal numa resolução de 4 bits.....	71
Figura 53. Comparativos de níveis de resolução em 4 e 8 bits	71
Figura 54. Esquema do circuito de um conversor analógico-digital	72
Figura 55. Diagrama de rede sem fio aplicada a sensor de deformações	74
Figura 56. Simbologia de Amplificador Operacional.....	75
Figura 57. Amplificador de Instrumentação	76
Figura 58. Módulo conversor Analógico-Digital (ADC) do desenvolvedor <i>Avia Semiconductor</i>	76
Figura 59. Sistema de Aquisição de dados em ensaio de solo	77
Figura 60. Ponte sobre o Rio Exe: histórico de tempo do movimento horizontal da viga de aço na junta de expansão	79
Figura 61. Exemplos gráficos de Filtros Lineares.....	81
Figura 62. Exemplo gráfico de aplicação de Média Móvel (em vermelho)	82
Figura 63. Exemplo gráfico de aplicação de Filtro de Kalman linear (em azul)	83
Figura 64. Exemplo gráfico de aplicação de Filtro de Kalman Estendido (em preto)	83
Figura 65. Plataforma <i>Arduino UNO</i>	85
Figura 66. Janela principal do <i>Integrated Development Environment</i> (IDE).....	86
Figura 67. Leituras de Deformação e Erro Relativo	89
Figura 68. Leituras de Deformação “A”, “B” e “C”	90
Figura 69. Leituras de Deformação das cinco medições.....	90
Figura 70. Leituras de Deslocamento entre equipamentos	91
Figura 71. Leituras de variação de tensão elétrica decorrentes da deformação	92
Figura 72. Valores experimentais e analíticos de deformação	92
Figura 73. Leituras de Deslocamento.....	93
Figura 74. Leituras de Deslocamento.....	93
Figura 75. Esquema de ensaio a flexão simples de lâmina engastada.....	96
Figura 76. Esquema de ligação do canal A do módulo HX711	96
Figura 77. IDE Arduino com <i>firmeware</i> para módulo HX711 e fotoacoplador	97

Figura 78. Circuito montado junto a placa de fenolite	98
Figura 79. Estrutura de funcionamento do sistema de monitoramento “ ϵ -structure”	99
Figura 80. Arduino MEGA conectado aos circuitos	100
Figura 81. Projeto da PCB com o Easy EDA (trilhas em vermelho e componentes em amarelo)	101
Figura 82. Placa de fenolite após imersão	101
Figura 83. Hardwares do sistema “ ϵ -structure”	102
Figura 84. Código (sequência: parte “a” e parte “b”) do “ ϵ -structure” implementado no Arduino	104
Figura 85. Tela do ambiente <i>Designer</i> do <i>App Inventor</i>	105
Figura 86. Tela do ambiente <i>Blocks</i> do <i>App Inventor</i>	106
Figura 87. Fluxograma do aplicativo <i>mobile</i> do sistema “ ϵ -structure”	107
Figura 88. Tela inicial do aplicativo “ ϵ -structure”	108
Figura 89. Tela de Aquisição de Dados (local)	109
Figura 90. Fluxograma da calibração do sistema “ ϵ -structure”	110
Figura 91. Parte do algoritmo de blocos para calibração (cálculo de ϵ_{eq} dos Canais 1, 2 e 3)	111
Figura 92. Tela de Análise de Deformações e Círculo de <i>Mohr</i>	114
Figura 93. Tela de Aquisição de Dados (Remota)	114
Figura 94. Visualização remota das leituras em navegador <i>web</i>	115
Figura 95. Lâmina n.º 2 com extensômetro (SG) tipo roseta	115
Figura 96. Lâmina n.º 1 com ponto de medição do deslocamento (u)	116
Figura 97. Viga com disposição dos extensômetros (E1, E2, E3 e E4) e transdutores de deslocamento (D1 e D2)	117
Figura 98. A) Armadura da viga; B) Preparo da superfície; C) Instalação dos extensômetros E3 e E4; D) Proteção dos extensômetros	118
Figura 99. A) Preparo da superfície; B) Colagem do extensômetro e terminal; C) Conexão dos cabos dos extensômetros E1 e E2	119
Figura 100. Esquema do ensaio de flexão à 4 pontos	119
Figura 101. Seção homogeneização da seção retangular com armadura dupla	120

Figura 102. Ponte Rolante (Fabricante GH® – Cod. 106033).....	123
Figura 103. Corte do túnel, com indicação dos pilares e da ponte rolante.....	123
Figura 104. Vista de um dos pilares de sustentação da ponte rolante.....	124
Figura 105. A) “Janela” de acesso a armadura no topo do pilar; B) Preparo da superfície; C) Colagem do extensômetro e terminal; D) Instalação dos extensômetros; E) Proteção dos extensômetros.....	125
Figura 106. Ensaio de Lâmina n.º 1 sob flexão com QuantumX.....	126
Figura 107. Leituras de teste do HX711.....	128
Figura 108. Gráfico das leituras de calibração do HX711.....	129
Figura 109. Ensaio da Lâmina n.º 1 sob flexão com o amplificador HX711.....	130
Figura 110. Gráfico de Deformações Específicas vs. Forças – Lâmina n.º 1.....	131
Figura 111. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 1.....	131
Figura 112. Ensaio de lâmina sob flexão com o “ ϵ -structure”.....	132
Figura 113. Gráfico de Deformações Específicas vs. Força - QuantumX vs. “ ϵ -structure”.....	133
Figura 114. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 1.....	133
Figura 115. Lâmina metálica com extensômetro tipo roseta.....	134
Figura 116. Gráfico de Deformações Específicas vs. Forças – Lâmina n.º 2.....	134
Figura 117. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 2.....	135
Figura 118. Ensaio de deslocamento e medição de força na Lâmina n.º 1.....	136
Figura 119. Gráfico de Deslocamentos vs. Forças – Lâmina n.º 1.....	137
Figura 120. Variação % de Deslocamentos – Lâmina n.º 1.....	137
Figura 121. Comparação gráfica dos valores de forças para cada teste – Lâmina n.º 1.....	138
Figura 122. Variação % de Forças – Lâmina n.º 1.....	139
Figura 123. Viga REFSE (a) e Viga REFCE (b) em ensaio de flexão a quatro pontos.....	140
Figura 124. Gráficos de Deformação na Armadura das Leituras de Referência.....	140

Figura 125. Gráficos de Deformação na Armadura das Leituras de Comparação ..	142
Figura 126. Ensaio de flexão à 4 pontos da viga T1	143
Figura 127. Gráficos de Deformação no Concreto das Leituras de Comparação ...	143
Figura 128. Gráficos de Deformações vs. Força das Vigas de Concreto Armado ..	145
Figura 129. Gráficos de Deslocamento das Leituras de Comparação	148
Figura 130. Perfil metálico instalado na lateral das vigas e transdutores instalados em tripé	148
Figura 131. Gráficos de Deslocamento das Leituras de Comparação c/ perfil tipo “L”	149
Figura 132 – Ponte Rolante sobre Pilar D3 durante ensaio	150
Figura 133. Sobreposição das leituras, com ajuste de escala do eixo “y”	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de características das pesquisas	94
Tabela 2. Custos Estimados para construção do <i>hardware DAQ</i>	103
Tabela 3. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 - QuantumX.....	127
Tabela 4. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 - QuantumX vs. HX711	130
Tabela 5. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 – QuantumX vs. “ ϵ -structure”	132
Tabela 6. Valores de Deformações Específicas e de Erros Relativos – Lâmina n.º 2	134
Tabela 7. Valores de Deslocamento e Erros Relativos - Lâmina n.º 1	136
Tabela 8. Valores de Forças e Erros Relativos - Lâmina n.º 1	138
Tabela 9. Coeficiente de C de Pearson (r) e MER dos ensaios com o mesmo equipamento.....	141
Tabela 10. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER das Leituras de Comparação.....	142
Tabela 11. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER - Leituras de Comparação	144
Tabela 12. Propriedades dos concretos das vigas.....	144
Tabela 13. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER	149

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo	22
1.1.1. Objetivo principal.....	22
1.1.2. Objetivos secundários	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Monitoramento da Integridade Estrutural	23
2.1.1. Sistemas de Monitoramento.....	28
2.1.2. Sensores de Deformação.....	30
2.1.2.1. Deformações em Estruturas.....	31
2.1.2.2. Sensor Mecânico	38
2.1.2.3. Sensor por Resistência Elétrica	40
2.1.2.4. Sensor de Corda Vibrante.....	51
2.1.2.5. Sensor de Fibra Óptica	52
2.1.2.6. Medição Fotoelástica	53
2.1.3. Sensores de Deslocamento	57
2.1.3.1. Deslocamento em Estruturas	57
2.1.3.2. Sensor Mecânico	60
2.1.3.3. Sensor Potenciométrico	62
2.1.3.4. Sensor Capacitivo	63
2.1.3.5. Sensor Indutivo	65
2.1.3.6. Sensor Magnetostritivo.....	66
2.1.3.7. Nivelamento Hidrostático	67
2.1.4. Aquisição e Transmissão de Dados	68
2.1.5. Amplificadores Operacionais de Sinais	75
2.1.6. Análise e Processamento de Dados	78
2.2 Plataforma de Prototipagem Arduino	84
2.3 Sistemas Experimentais de Medição de Deformação e Deslocamento	88
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	95
3.1 Amplificador de Sinais HX711.....	95
3.2 Protótipo do Sistema de Monitoramento Remoto	99
3.3 Monitoramento de Deformações e Deslocamentos em protótipo de viga de concreto armado	117
3.4 Monitoramento de Deformações em pilar de concreto armado	122
4. RESULTADOS.....	126
4.1 Testes com Amplificador de Sinais HX711	126
4.2 Testes com o protótipo do Sistema de Monitoramento “ ϵ -structure”	132
4.3 Ensaio de monitoramento da viga de concreto armado	139
4.4 Ensaio de monitoramento do pilar de concreto armado.....	150

5. CONCLUSÃO	152
5.1 Pesquisas Futuras	152
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
7. APÊNDICE A – exemplos de diferentes configurações de Ponte de Wheatstone, com às respectivas equações de cálculo de deformação (ϵ).	163

1. INTRODUÇÃO

A discussão de como implementar o crescimento econômico e social, é um ponto comum para países desenvolvidos e em desenvolvimento, que gira em torno da infraestrutura. No Brasil as necessidades econômicas e sociais são significativas, enquanto que seu estoque de capital na área de infraestrutura ainda é muito baixo. (PEREIRA; PUGA, 2016).

Até a metade do século XX, grande parte dos investimentos brasileiros em infraestrutura decorriam de fontes privadas. Contudo, devido principalmente a má qualidade e baixa disponibilidade, o poder público passou a encabeçar os investimentos em infraestrutura, o que perdurou até o início da década de 90. A partir de então, o setor privado assumiu uma posição protagonista, com a ampliação de sua participação no setor, visto restrições fiscais e dificuldades do poder público em absorver novas tecnologias (FERREIRA; AZZONI, 2011).

Entretanto os investimentos de infraestrutura não devem ficar priorizados somente para novas obras, mas sim na manutenção e conservação das existentes. Medeiros (2014), destaca que no caso das rodovias, por se tratarem da principal infraestrutura de transportes no Brasil, em face das condições que as mesmas se encontram, são necessários maiores investimentos para reconstrução e manutenção, em caráter de urgência.

São quase que frequentes as notícias envolvendo algum incidente em obras de infraestrutura, por falta de manutenção de forma adequada. Pode ser dado como exemplo, o desabamento de parte de um Viaduto do “Eixão” Sul (Figura 1) do sistema viário de Brasília, ocorrido em 6 de fevereiro de 2018. Este viaduto foi construído há mais de 50 anos e o próprio poder público reconheceu a falta de manutenção, que era de sua responsabilidade (VALENTE; CANCIAN, 2018), sendo que em 2013 o Tribunal de Contas do Distrito Federal, já havia detectado a necessidade de reforma em uma auditoria (CRAIDE, 2018).

Figura 1. Desabamento de trecho do Viaduto do “Eixão” Sul (Brasília-DF)



Fonte: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/02/trecho-de-principal-via-expressa-de-brasilia-desaba.shtml>

Em geral, as obras de infraestrutura contam com os mais diversos tipos de materiais e tecnologias construtivas, contudo materiais como aço, concreto e madeira, de alguma forma estão presentes nestas obras, a exemplo da ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira (Figura 2), sobre o Rio Pinheiros, no município de São Paulo.

Figura 2. Ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Oct%C3%A1vio_Frias_de_Oliveira

Lorenzi (2015), destaca que o concreto, depois da água, é o material mais utilizado no mundo. Sua utilização em grande escala, se dá especialmente devido à grande durabilidade que se constata nas estruturas de concreto em geral. Além da durabilidade, o concreto tem sua utilização amplamente difundida devido, a sua versatilidade e custo relativamente baixo (BAROGHEL-BOUNY, 2014, *apud* MARAN *et al.*, 2015).

Sousas *et al.* (2017), expõem que as pontes de concreto, tal como outras construções com estruturas de concreto, necessitam de manutenções regulares, uma vez que, com a falta de intervenção necessária, o surgimento de patologias é algo inevitável.

Com a difusão do uso do concreto armado, Reginato *et. al.* (2016) destacam que é fundamental verificar as condições do concreto para se averiguar a situação das estruturas, em função do seu desempenho e do seu nível de segurança, visto que o avanço da deterioração incide no aumento dos custos de manutenção.

Para Santos *et al.* (2017), a durabilidade ou não, das estruturas de concreto está associada a diversos fatores, em especial a falta de manutenção durante sua vida útil, o que provoca a ocorrência de patologias. Por este motivo pesquisas são realizadas, buscando prever a vida útil das mesmas.

Assis (2007) pondera que em muitos casos, existe a necessidade de interdição de estruturas civis antigas, a exemplo de pontes, viadutos e estádios, em função de diversos fatores associados, tais como esforços diferentes dos previstos em projeto; degradação dos materiais; e aumento da agressividade ambiental.

Pravia; Braido (2015), destacam que inspeções visuais em estruturas, podem identificar a ocorrência de fissuras, grandes deformações e armaduras expostas, contudo tal inspeção é uma avaliação subjetiva, pois alterações na estrutura e em seus materiais podem passar despercebidas. Para tanto, utiliza-se o monitoramento de estruturas mediante instrumentação específica, para se conhecer os valores dos parâmetros a serem analisados.

A avaliação das condições de uma estrutura se dá inclusive com a medição de grandezas *in situ*, por meio do monitoramento de seu comportamento estrutural, possibilitando que sejam verificadas as teorias empregadas na modelagem da análise do comportamento estrutural, além de permitir que a detecção de problemas estruturais, seja de forma preventiva (SANTOS, 2014).

Veloso (2016) coloca o monitoramento como uma fase da avaliação estrutural, sendo que no caso das pontes e viadutos, compreende diversas fases, como a inspeção, instrumentação e análise computacional, com o intuito de se verificar a integridade e segurança das estruturas.

Silva (2015) destaca que, no caso de pontes, a utilização das técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE) tem como intuito constatar danos, visando analisar a necessidade de intervenções para reparos e reformas ou ainda em casos que se constate risco aos usuários, promover a demolição da construção.

O monitoramento permanente de estruturas, como por exemplo no caso de pontes, apresenta várias vantagens, como a redução de custos com a utilização de modelos de previsão ainda na fase de projeto e outras reduções associadas a fase operacional, quando da realização de inspeções e manutenções (COMISU et al., 2017).

Igualmente, o monitoramento estrutural não se limita tão somente a construções existentes e que já tenham sofrido desgaste com o uso e outras ações, mas também abrange estruturas em fase de construção, sendo possível identificar problemas estruturais e assim possibilitar a realização de operações de reparo já desde esta fase. Contudo, este monitoramento durante a construção, acaba se limitando às obras de alto custo (KOH, KIM e CHOO, 2005; ZINGONI, 2005 *apud* ASSIS, 2007).

Atualmente os sistemas de monitoramento de estruturas estão diretamente associados a sistemas computacionais automatizados, mas o monitoramento de integridade estrutural não é algo recente, nem mesmo no Brasil. De acordo com Santos (2014), diversos tipos de sensores foram utilizados nas estruturas da Ponte Rio-Niterói, desde sua construção, possibilitando o monitoramento até mesmo antes da liberação da ponte ocorrida em 1974, com a realização de ensaios de carga (Figura 3).

Figura 3. Ensaio de Carga na Ponte Rio-Niterói



Fonte: Santos (2014)

São diversos os equipamentos empregados para aquisição de dados no monitoramento de estruturas. Galante; Garcia (2014) destacam que os equipamentos e *softwares* disponibilizados pelos fabricantes possuem qualidade para atender as demandas, contudo sua utilização é problematizada por diversas questões, especialmente pelo alto custo, interoperabilidade e necessidade de conhecimento avançado dos usuários.

O Monitoramento da Integridade Estrutural colabora com a redução de custos das intervenções para manutenção, reforma e modernização das estruturas, contudo sua utilização ainda é dispendiosa devido ao tipo de equipamentos necessários à sua implementação, tais como sensores, aquisitores de dados, redes cabeadas e computadores, o que acaba, em muitos casos, impedindo sua utilização em grande escala (DEPARI et al., 2014).

Não obstante, podem ser encontrados no mercado diversos equipamentos para aquisição de dados, porém com custo relativamente alto, segundo Pinto (2015), que utilizou como solução de baixo custo a plataforma de prototipagem Arduino, para o desenvolvimento da interface de aquisição de dados, combinada com a utilização de um amplificador operacional.

É neste contexto que a plataforma Arduino se apresenta como uma solução de baixo custo e com relativa facilidade de utilização e implementação em projetos das mais diversas áreas de conhecimento.

Portanto, este trabalho pretende mostrar que é possível realizar o monitoramento de baixo custo e de forma remota, a partir da utilização da plataforma Arduino.

1.1 Objetivo

1.1.1. Objetivo principal

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um sistema de baixo custo, para monitoramento remoto de deformações e deslocamentos em estruturas de concreto armado.

1.1.2. Objetivos secundários

Dentro do contexto do objetivo principal, consistem-se em objetivos secundários, os seguintes:

- Selecionar e testar amplificador de sinais e sensores, compatíveis com a plataforma de prototipagem Arduino, para análise de deformações e deslocamentos em estruturas;
- Desenvolver sistema de aquisição remota de dados com a plataforma de prototipagem tipo Arduino;
- Desenvolver aplicativo (*software*) *mobile* para aquisição, armazenamento e compartilhamento dos dados obtidos no monitoramento;
- Realizar o monitoramento de deformações e deslocamentos, sob diferentes condições de carregamentos, com o sistema proposto e com equipamento de aquisição de dados comercial de referência;
- Processar os dados do monitoramento, para validação dos resultados obtidos, por meio de comparativos dos equipamentos utilizados e de parâmetros analíticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

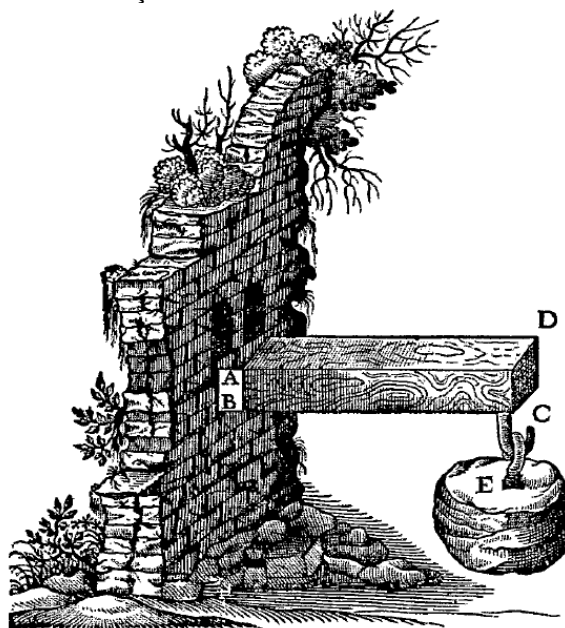
A partir do tema abordado nesta pesquisa, se faz necessário discorrer a respeito do estado da arte do monitoramento de integridade estrutural, bem como de questões relacionadas a sistemas experimentais, inclusive aqueles relacionados com a utilização da plataforma *Arduino*.

2.1 Monitoramento da Integridade Estrutural

O Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE), ou em inglês *Structural Health Monitoring (SHM)*, busca monitorar o comportamento da estrutura, sob várias condições de carregamento, para avaliar sua situação, visando inclusive verificar a ocorrência de danos ou deterioração. Os planos de monitoramento das estruturas, apareceram com a finalidade de se entender e checar os resultados dos modelos analíticos e numéricos (ANDRADE, 2012).

Neste sentido, muitas análises e propostas foram feitas ao decorrer da história, como por exemplo o teste de flexão (Figura 4) de Galileu Galilei (1564-1642), ao investigar a resistência a ruptura em vigas (TIMOSHENKO, 1953).

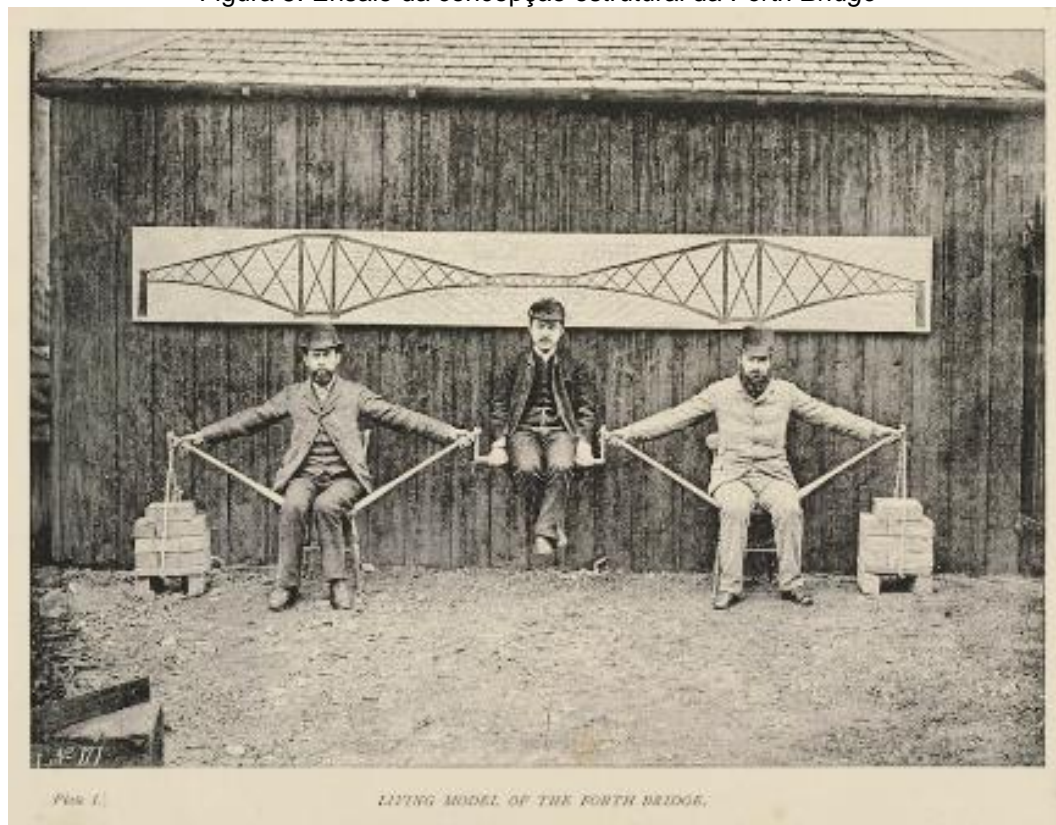
Figura 4. Ilustração do teste de flexão de Galileu



Fonte: Timoshenko (1953)

Historicamente o monitoramento de estruturas, também busca a validação de métodos construtivos, por meio da análise experimental, ainda que com o emprego de protótipos como no caso das treliças metálicas da ponte *Forth Bridge* (Figura 5), localizada em Edimburgo na Escócia (ANDRADE, 2012).

Figura 5. Ensaio da concepção estrutural da *Forth Bridge*



Fonte: <https://publicdomainreview.org/collections/the-forth-bridge-building-an-icon/>

Os primeiros métodos de monitoramento de estruturas, limitavam-se a observação do processo e leitura das medidas indicadas pelos instrumentos, com registro dos valores. Contudo, atualmente as técnicas e equipamentos são outros, que empregam sistemas integrados de medição, totalmente automatizados (LEUCKERT, 2000 *apud* ASSIS, 2007).

Um sistema de monitoramento pode ser basicamente dividido em sistemas que busquem emitir alertas sobre as condições da estrutura, ou sistemas com a finalidade científica. Alguns casos podem combinar as duas finalidades em um só sistema, como no caso de grandes construções urbanas, onde se monitora a estrutura e seus materiais (KLIKOWICZ; SALAMAK; POPRAWA, 2016).

Os ensaios não destrutivos, especialmente nas estruturas de concreto armado, tem se mostrado uma alternativa interessante para monitoramento, o que tem gerado

um crescimento na utilização destas técnicas, especialmente devido aos bons resultados obtidos (REGINATO et al., 2016).

Santos (2014) destaca que a detecção precoce de problemas estruturais e a verificação das análises teóricas de comportamento estrutural, são elementos que decorrem do monitoramento estrutural, que se dá por meio da aquisição e organização de dados e posterior análise sistemática dos dados.

O monitoramento de estruturas, especialmente o remoto e em tempo real e contínuo, tem evoluindo fortemente no que se refere à automatização das medições, possibilitando a obtenção de informação em grande quantidade, o que permite um maior conhecimento da situação da estrutura (SANTOS, 2014).

A exemplo do MIE em pontes, a partir de banco de dados dinâmico é possível demonstrar de forma completa, precisa e em tempo real as condições de viabilidade das pontes monitoradas (COMISU et al., 2017), possibilitando subsídios para uma tomada de decisão rápida, para eventual intervenção.

Vale destacar que o monitoramento de estruturas não se limita somente as obras prontas e em uso. Almeida (2006) afirma que a partir dos resultados de monitoração das estruturas de obras em construção, em comparação com os modelos matemáticos, têm sido possível dar continuidade no andamento destas obras com elevado controle e qualidade.

Outra aplicação do monitoramento de estruturas se dá na fase de concepção e projeto, mais especificamente no uso de protótipos em laboratório e modelos reduzidos, pois segundo Almeida (2006), isto possibilita obter dados relativos ao comportamento estrutural, permitindo assim, realizar a análise inversa, para obtenção de parâmetros que visem caracterizar os fenômenos estruturais.

Melo (2011) estudou o comportamento estrutural, no que se refere à deformações e deslocamentos, da Ponte sobre o Rio Suaçui (Figura 6a) com seu respectivo modelo em escala reduzida (Figura 6b), por meio de dados experimentais decorrentes do monitoramento estrutural realizado no modelo e na estrutura real, e concluiu que no comportamento global do modelo reduzido, “se mostrou coerente e semelhante com o modelo real”.

Figura 6. Ponte sobre o Rio (a); Modelo reduzido (b)



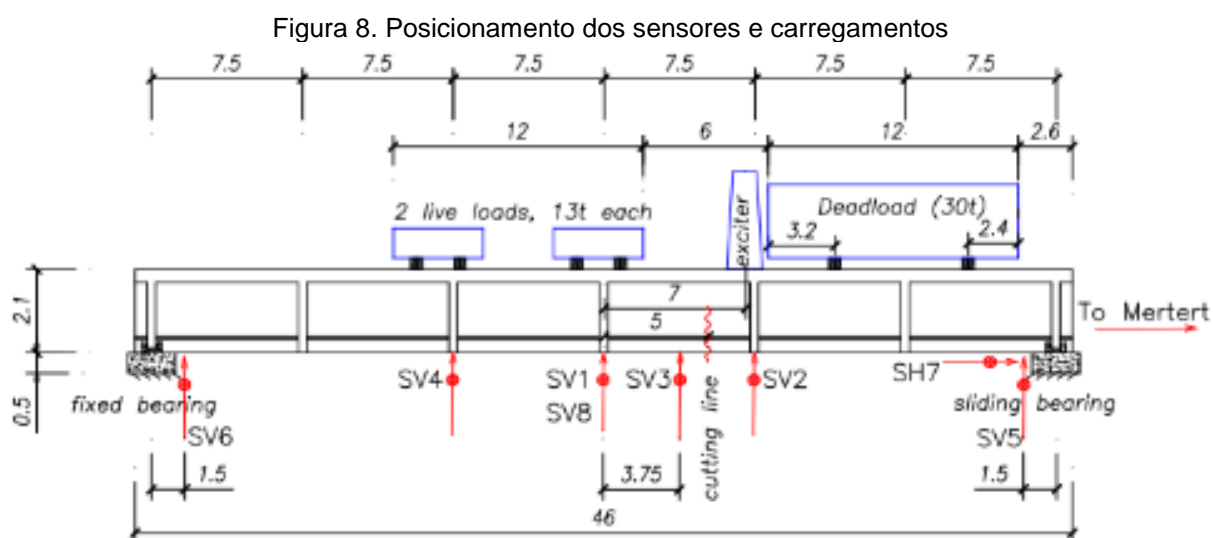
Fonte: Melo (2011)

Além da aplicação do monitoramento nas fases de projeto, construção e operação, ou seja, durante toda vida de uma estrutura, Nguyen *et al.* (2016) apresentaram a possibilidade de monitoramento após estas fases, neste caso, utilizando uma viga de concreto (Figura 7) de parte de uma ponte construída na década de 50 sobre o Rio Mosel, ligando as cidades de Grevenmacher (Luxemburgo) e Wellen (Alemanha), demolida em 2013 para ser substituída por uma ponte com vigas metálicas.

Figura 7. Viga da ponte sobre o Rio Mosel durante monitoramento

Fonte: Nguyen *et al.* (2016)

No ensaio em questão, a viga com 46m de comprimento, pesando 120tf, foi removida da ponte e Nguyen *et al.* (2016) realizaram o monitoramento contínuo de deslocamentos com a compensação de temperatura (levando-se em consideração as deformações decorrentes da variação térmica) por 30 dias, com a aplicação de carregamento estático (Figura 8), utilizando 8 transdutores de deslocamento, para verificação da integridade estrutural e detecção de danos.



Fonte: Nguyen *et al.* (2016)

Outro campo de atuação para o MIE, que se desponta de forma emergente em pesquisas, é o monitoramento de construções históricas, voltado inclusive para avaliação *on-line* das condições estruturais, visando a constatação de danos em estágios iniciais (BARONTINI *et al.*, 2017).

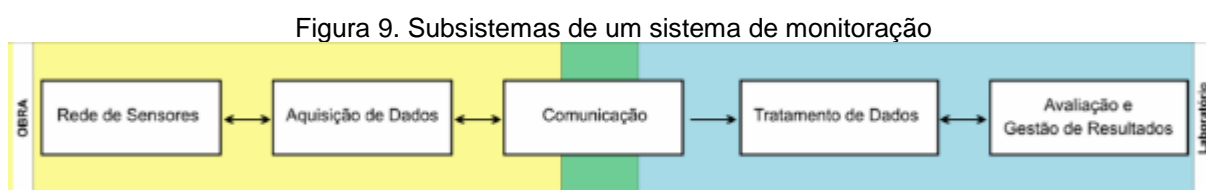
Hajdukiewicz *et al.* (2015) fazem uma abordagem interessante ao associar o monitoramento de integridade estrutural ao monitoramento ambiental e energético das construções, relacionando estes três itens, visando propiciar edifícios mais seguros, saudáveis, sustentáveis e confortáveis, desde sua concepção até sua operação. Contudo, os autores alertam que existem poucos estudos com enfoque no monitoramento integrado em tempo real, que melhorem o desempenho como um todo das edificações.

Embora a implantação de redes de sensores, especialmente as cabeadas, ainda seja algo bastante caro em função dos equipamentos necessários (CHANDRASEKARAN; CHITHAMBARAM; KHADER, 2016), o monitoramento

estrutural tem ganhado cada vez mais espaço em grandes construções, em função da miniaturização de componentes eletrônicos e ao aperfeiçoamento dos algoritmos utilizados nas análises de imagens digitais (KLIKOWICZ; SALAMAK; POPRAWA, 2016).

2.1.1. Sistemas de Monitoramento

Um sistema de monitoramento completo, abrange diversos subsistemas a exemplo da divisão proposta por Assis (2007) na Figura 9, que estão interligados desde a fase de obras, ou seja, a coleta de dados em campo, até seu processamento e análise em laboratório.



Fonte: Assis (2007)

Andrade (2012) destaca que o Monitoramento da Integridade Estrutural utiliza uma ferramenta de diagnóstico físico, integrando vários dispositivos e sistemas auxiliares, tais como os sistemas de sensoriamento, aquisição de dados, processamento de dados, comunicação, modelagem e detecção de dados.

Melo (2011) descreve um sistema de monitoramento automatizado como sendo uma rede de sensores responsável por converter grandezas físicas em um sinal elétrico, conectados a um condicionador de sinais responsável por amplificar, filtrar e equalizar os sinais, que são enviados a um aquisitor de dados capaz de armazenar os mesmos, com a respectiva conversão analógica/digital (AD) para posterior exibição.

A implementação de estratégias para avaliação das características e das condições de integridade estrutural esbarram na problemática de se automatizar os processos de monitoramento, que vão desde as redes de sensores até o diagnóstico das condições estruturais, para que os erros oriundos das decisões humanas sejam suplantados com o auxílio da automatização (BARONTINI et al., 2017).

Contudo, não se pode limitar a compreensão sobre o Monitoramento da Integridade Estrutural como sendo somente uma rede de sensores. Na maioria das vezes a detecção de um dano estrutural ou mesma a avaliação da integridade de uma

estrutura depende de informações ocultas em dados coletados ao longo do tempo. Com isto, o MIE depende, essencialmente, da análise destes dados que possibilitam tornar o dano ou sua ocorrência mais visíveis (WORDEN; CROSS, 2017).

O comportamento estrutural, está diretamente ligado ao deslocamento, tensões e deformações, em função das características da estrutura, tais como geometria, propriedades dos materiais, carregamentos e condições de contorno (ANDRADE; TRAUTWEIN; BITTENCOURT, 2013). Para avaliação de estruturas, a medição de deformações pode apresentar inúmeros dados de tensões ocorridas na estrutura (NI *et al.*, 2010).

Entretanto, o MIE aplicado a Engenharia Civil não se limita somente a utilização de sensores para coleta e análise de deformações e deslocamentos, abrangendo além destas grandezas, outras relacionadas à temperatura, rotação, aceleração e umidade relativa (ASSIS, 2007).

Ao abordar as grandezas a serem monitoradas Andrade (2012) destaca que:

A escolha da grandeza a ser monitorada dependerá diretamente do seu objetivo, podendo ser de uma análise de um problema existente (apresentação de patologia), de um monitoramento a fim de evitar problemas futuros (prevenção), ou do levantamento do comportamento estrutural (avanço tecnológico) (ANDRADE, 2012, p. 30).

A variação de temperatura, além de influenciar no comportamento estrutural, em conjunto com a umidade, são fatores que influenciam o comportamento dos componentes dos sistemas de medição de Monitoramento de Integridade Estrutural (KÖPPE; BARTHOLMAI, 2011).

São diversos os tipos de sensores utilizados para medição de temperatura, como por exemplo termopares (*thermocouples*) e os detectores de temperatura resistivos (*RTD – Resistance Temperature Detector*), e para medição de umidade relativa os sensores hidrométricos capacitivos (ASSIS, 2007). Também são encontradas aplicações de sensores baseados em Rede *Brag* de Fibra Óptica para medições de temperatura (RIBEIRO, 2014).

Tão importante quanto as demais grandezas, a medição da rotação (inclinação) das estruturas, ocorre em função de diversos fatores externos como, por exemplo a variação de temperatura e o recalque de fundação (ANDRADE, 2012).

Para medição da inclinação, dentre outros dispositivos, podem ser utilizados tiltímetros e inclinômetros. Assis (2007) destaca que o inclinômetro elétrico é utilizado para medições automatizadas, das variações angulares em relação ao plano de referência, com resoluções de até $0,001^\circ$, numa faixa de medição de $\pm 10\%$.

Por fim, para análise de vibrações de uma estrutura submetida às ações dinâmicas, vários métodos podem ser empregados, especialmente a medição de movimentação por meio da aceleração, onde o transdutor do tipo acelerômetro é um dos mais comuns, que conta com massa, mola e amortecedor e que gera variações elétricas proporcionais a sua aceleração (ANDRADE, 2012).

A vibração da estrutura, obtida por meio da utilização de acelerômetros, ajuda fornecer métricas do comportamento global da estrutura, num sistema de monitoramento de integridade, onde tais sensores são baratos e empregados em pequenas quantidades. A utilização de tais sensores, possibilita a detecção de danos, relacionando mudanças nas frequências naturais às alterações de rigidez da estrutura (OWEN; PEARSON, 2004).

Em geral, os sensores têm a função de transferir a energia do corpo medido para si próprios, ou no sentido inverso, dos sensores para os objetos em medição. Já os transdutores, atuam como conversores de grandezas físicas, como por exemplo, a conversão de uma deformação mecânica em um sinal elétrico (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

A seguir serão apresentadas as descrições dos seguintes subsistemas que compõem o Sistema de Monitoramento:

- Sensores, Transdutores e Grandezas;
- Aquisição e Transmissão de Dados;
- Análise e Processamento de Dados.

A pesquisa objeto desta dissertação abrange o monitoramento das deformações e deslocamentos em estruturas, com isto, será discorrido exclusivamente sobre estas grandezas e os sensores relacionados às mesmas.

2.1.2. Sensores de Deformação

Para melhor compreensão dos sensores de deformação, esta seção inicia-se com conceitos e formulações analíticas referentes as deformações em estruturas.

2.1.2.1. Deformações em Estruturas

Qualquer mudança de dimensão ou forma de uma estrutura, decorrente da aplicação de forças é denominada deformação. Contudo, a deformação específica (Equação 1) é uma métrica utilizada para medir a intensidade da deformação, e da mesma maneira a tensão é utilizada para medir a intensidade de uma força interna (RILEY; STURGES; MORRIS, 2003). No momento em que uma estrutura é submetida a esforços externos, as pequenas partículas que compõem a mesma, se deslocam até que se atinja o equilíbrio entre os esforços internos e externos (TIMOSHENKO, 1976).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (1)$$

Onde:

ε = deformação específica longitudinal

Δl = acréscimo ou decréscimo de comprimento

L = comprimento inicial

Entretanto, as deformações não são decorrentes somente da atuação de forças, mas também podem ocorrer em função de tensões térmicas, que são ocasionadas quando uma estrutura é aquecida ou resfriada (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

A relação existente entre tensões e deformações de estruturas, mediante a aplicação de esforços mecânicos, foi estabelecida em 1678 por *Robert Hooke* num experimento, onde fora aplicada uma força longitudinalmente numa mola, observando-se um deslocamento vertical, (BALBINOT, 2008), expressando-se assim a Lei de *Hooke* pela Equação 2.

$$F = kx \quad (2)$$

Onde:

F =Força

x = Deslocamento vertical obtido de forma mecânica

k =Constante de rigidez da mola

Esta constatação não fica limitada tão somente as molas, mas também pode ser aplicada a estruturas compostas de vários materiais, com a ocorrência de pequenas deformações (BALBINOT, 2008). Neste caso a Lei de *Hooke* pode ser descrita pela Equação 3.

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

Onde:

σ = tensão normal

E = Módulo de Elasticidade (longitudinal)

A relação tensão normal *versus* deformação específica é comumente apresentada em forma de gráfico, de onde se obtém o Módulo de Elasticidade do material (Equação 4), por relação trigonométrica, conforme Figura 10, válido somente para o Regime Elástico (Análise Linear).

$$\frac{\delta\sigma}{\delta\varepsilon} = \tan \alpha = E \quad (4)$$

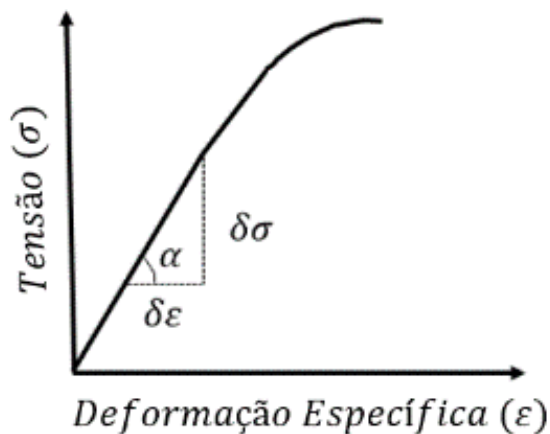
Onde:

$\delta\sigma$ = intervalo de tensão normal

E = Módulo de Elasticidade Longitudinal

$\delta\varepsilon$ = intervalo de deformação específica

Figura 10. Curva Tensão *versus* Deformação



Geometricamente a deformação normal pode ser representada em uma peça submetida à força normal de tração, conforme Figura 11, onde ocorre o alongamento no sentido longitudinal e encurtamento no sentido transversal, correlacionado com a deformação longitudinal.

Esta correlação, ou seja, a razão entre a deformação transversal e a deformação normal, é dada pelo Coeficiente de *Poisson* (ν), um número adimensional dado pela Equação 5 (GUADAGNINI; SARAIVA; ELISABETH, 2011).

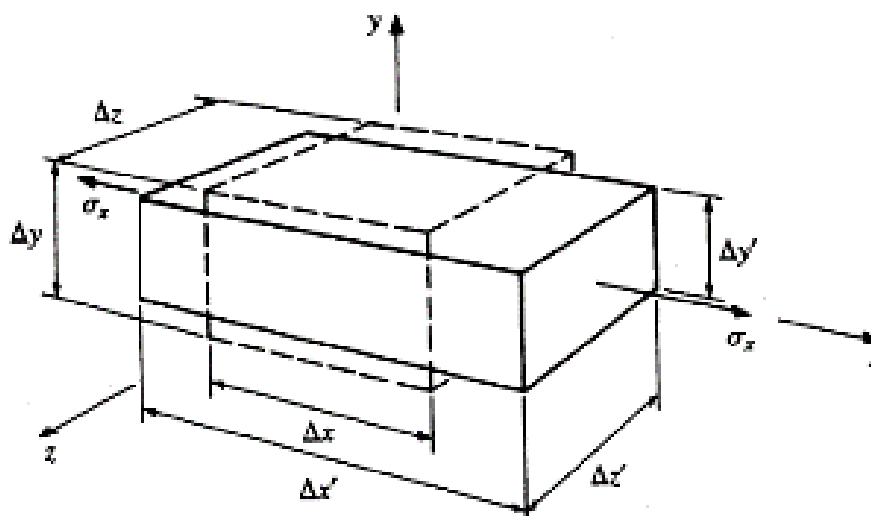
$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde:

ν = Coeficiente de Poisson

ε_t = deformação específica transversal

Figura 11. Deformação atribuída a σ_x



Fonte: Young; Budynas (2002)

Considerando a Equação 3 reescrita para obtenção da deformação (ε), até o limite da proporcionalidade tem-se a Equação 6 para o eixo x , deformação esta que no caso de alongamento é acompanhada por um encurtamento transversal dado pela Equação 5, tendo então as Equações 7 e 8, para as deformações nas outras direções (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

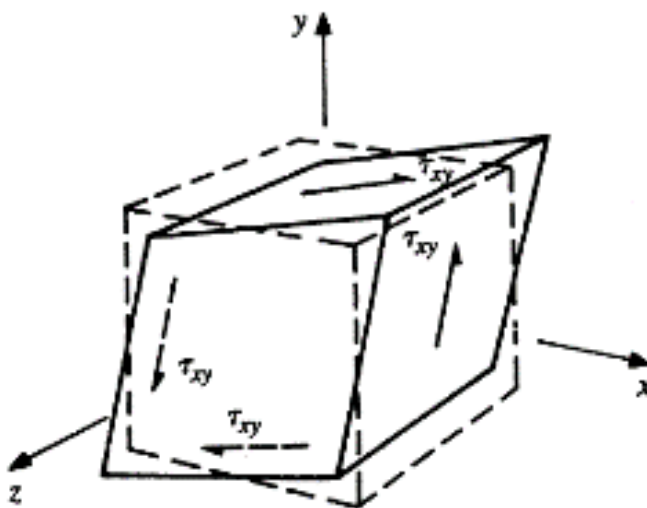
$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (7)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (8)$$

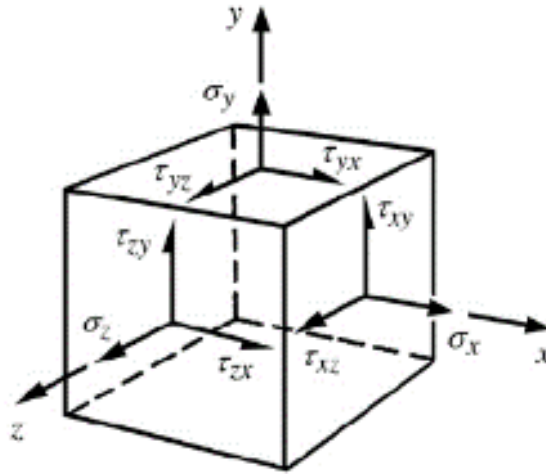
As deformações não ocorrem somente em função das tensões normais, as mesmas também podem ser decorrentes de tensões tangências (τ) provocadas por força cortante, que resultam em deformações angulares, ou seja, incorrendo em distorções nas peças, conforme Figura 12.

Figura 12. Deformação atribuída a τ_{xy}



Fonte: Young; Budynas (2002)

A Lei de *Hooke*, pode ser extrapolada para implementação das análises em estados de tensão biaxial e triaxial, constatados frequentemente na engenharia (RILEY; STURGES; MORRIS, 2003), dando ensejo a Lei de *Hooke* Generalizada. Considerando um elemento tridimensional, como o da Figura 13, solicitado nas direções principais, têm-se então a partir das Equações 6 a 8 as Equações 9 a 11, pela superposição dos efeitos.

Figura 13. Elementos de tensão relativos aos eixos xyz 

Fonte: Young; Budynas (2002)

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (10)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (11)$$

Para tanto, considerando-se a atuação de todas as tensões, obtém-se as Equações de 12 à 17 (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980), para determinação das deformações normais (ε) e angulares (γ), quando se tratar de deformações lineares em materiais homogêneos e isotrópicos (YOUNG; BUDYNAS 2002).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (13)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (14)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (15)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (16)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (17)$$

O Módulo de Elasticidade Transversal (G) é obtido por meio da Equação 18 (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980), para materiais isotrópicos.

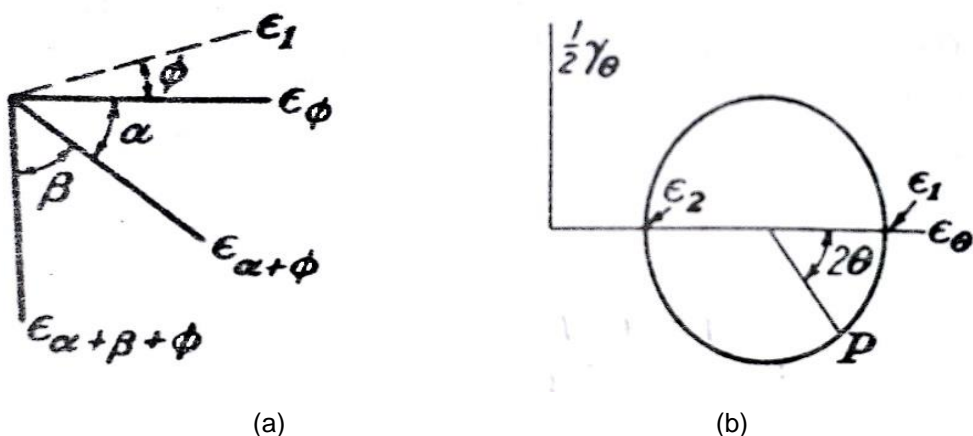
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

Na forma de matriz, o arranjo das deformações no plano pode ser escrito de acordo com a Equação 19 (SADD, 2004).

$$\text{Deformação} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

Já no caso das deformações principais, no Estado Plano, quando as direções principais são conhecidas e suas deformações são medidas, as tensões principais podem ser obtidas pela formulação apresentada anteriormente, contudo, quando tais direções principais não são conhecidas, torna-se necessária a medição de deformações em três direções (Figura 14a), ou seja, ε_ϕ , $\varepsilon_{\alpha+\phi}$ e $\varepsilon_{\alpha+\beta+\phi}$, o que permite determinar o estado de deformação por completo, onde ε_θ e γ_θ (Figura 14b) são obtidos pelas Equações 20 e 21 (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

Figura 14. Leitura de deformação em três direções (a); Deformações em "θ" (b)



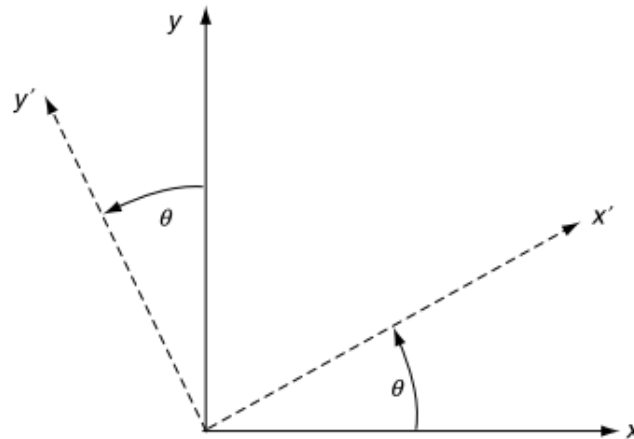
Fonte: adaptado de Timoshenko; Goodier (1980)

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta \quad (20)$$

$$\frac{1}{2}\gamma_\theta = -\frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin 2\theta \quad (21)$$

Ainda no caso bidimensional (Figura 15), os componentes de deformação no plano, se transformam de acordo com as Equações 22 à 24 (SADD, 2004).

Figura 15. Transformação rotacional no plano



Fonte: Sadd (2004)

$$\varepsilon'_x = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + 2\gamma_{yx} \sin \theta \cos \theta \quad (22)$$

$$\varepsilon'_y = \varepsilon_x \sin^2 \theta + \varepsilon_y \cos^2 \theta - 2\gamma_{yx} \sin \theta \cos \theta \quad (23)$$

$$\gamma'_{yx} = -\varepsilon_x \sin \theta \cos \theta + \varepsilon_y \sin \theta \cos \theta + \gamma_{yx}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (24)$$

Os trabalhos experimentais de medição de deformações em estruturas com extensômetros, partem das relações de transformação, expressas pelas Equações de 25 à 27, reescritas considerando o ângulo “ θ ” duplo (SADD, 2004).

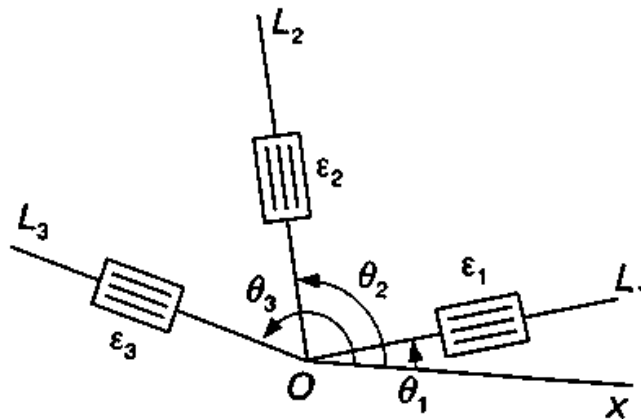
$$\varepsilon'_x = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \gamma_{yx} \sin 2\theta \quad (25)$$

$$\varepsilon'_y = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta - \gamma_{yx} \sin 2\theta \quad (26)$$

$$\gamma'_{yx} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{2} \sin 2\theta + \gamma_{yx} \cos 2\theta \quad (27)$$

No caso de uma roseta de deformação, composta por três extensômetros, onde os ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 (Figura 16) são conhecidos, e as equações das deformações podem ser reescritas em função de tais ângulos, conforme Equações de 28 à 30 (BEER; JOHNSTON, 1995).

Figura 16. Roseta de Deformações



Fonte: Beer; Johnston (1995)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{yx} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (28)$$

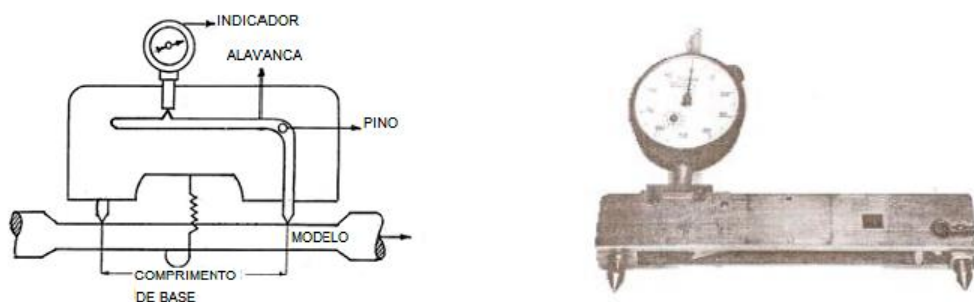
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{yx} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \quad (29)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{yx} \sin \theta_3 \cos \theta_3 \quad (30)$$

Finalmente, medindo-se ε_1 , ε_2 e ε_3 , é possível resolver as equações acima para obtenção de ε_x , ε_y e γ_{yx} , conseqüentemente determinando-se as tensões atuantes no ponto.

2.1.2.2. Sensor Mecânico

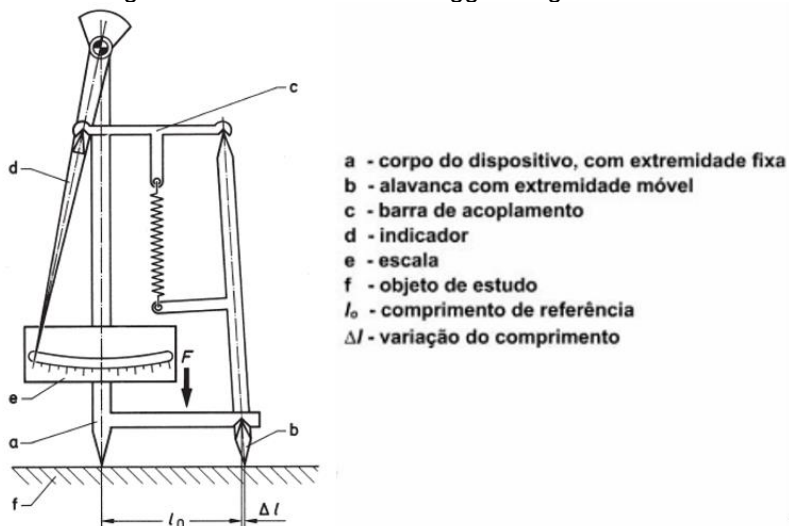
Diversos tipos de extensômetros mecânicos foram desenvolvidos no século XX, como por exemplo o extensômetro *Berry* (Figura 17), desenvolvido pelo Professor *H. C. Berry* em 1910, com uma precisão de $10\mu\text{m/m}$ (SINGER; ARBOCZ; WELLER, 1998).

Figura 17. Extensômetro de *Berry*

Fonte: Affonso (2011)

Têm-se registros, de que anterior ao de *Berry*, mais especificamente em 1888, foi desenvolvido um outro modelo mecânico, conhecido como extensômetro de *Howard*. Posteriormente a estes dois modelos, foi desenvolvido em 1935 o Tensômetro de *Huggenberger* (Figura 18), que como os demais, mede comprimentos específicos de trechos da estrutura, sendo determinada a deformação a partir da razão entre a variação de comprimento e o comprimento inicial. Entretanto, o mesmo praticamente não é mais utilizado, visto que somente pode ser empregado em análises estáticas e sem comunicação com sistemas automatizados de aquisição de dados (ASSIS, 2007; BARALDI, 2010)

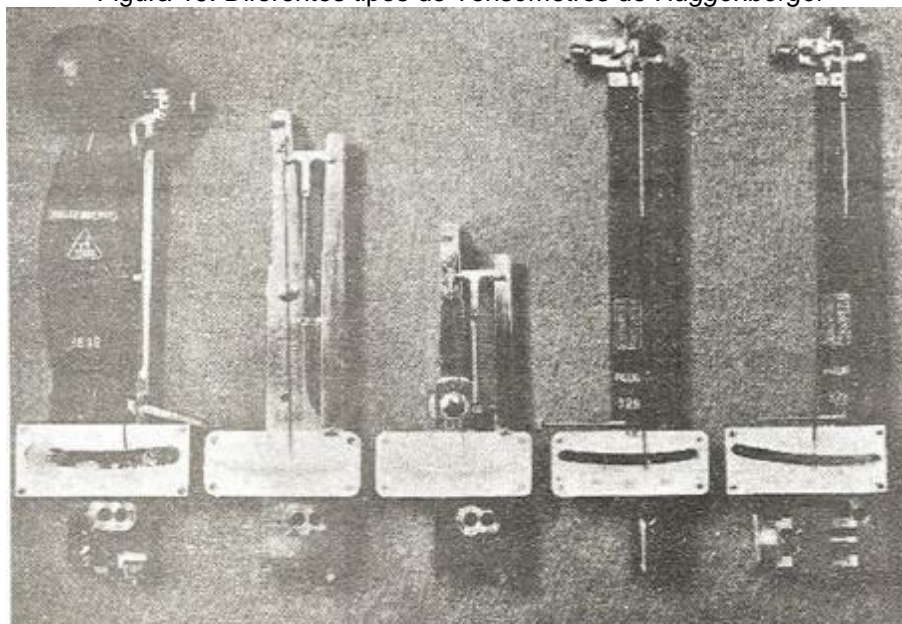
Figura 18. Tensômetro de Huggenberger



Fonte: Hoffmann (1989) *apud* Assis (2007)

Os coeficientes de ampliação dos Tensômetros *Huggenberger* (Figura 19), são decorrentes da variação do braço de alavanca de cada tipo disponível, que podem, por exemplo, fornecer sensibilidades da ordem de $0,1/1.000 = 0,1\mu$ e precisão de $0,2/1.000 = 0,2\mu$ (LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 1963).

Figura 19. Diferentes tipos de Tensômetros de *Huggenberger*

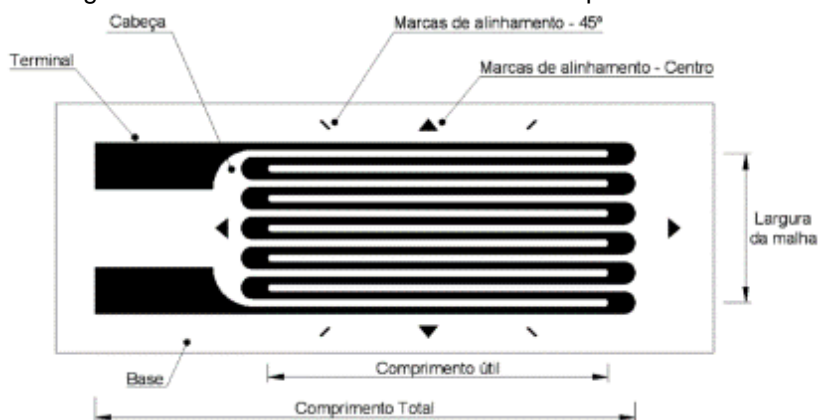


Fonte: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1963)

2.1.2.3. Sensor por Resistência Elétrica

Para medição das deformações, outra possibilidade é a utilização do sensor tipo extensômetro de resistência elétrica, do inglês *strain gage* (SG) ou *strain gauge*, (Figura 20), baseado na variação de resistência elétrica, quando ocorre deformação mecânica. O valor da deformação é obtido a partir da variação de resistência, que é correlacionada com o valor de tensão elétrica aplicada (PERTENCE JUNIOR; PERTENCE, 2010).

Figura 20. Extensômetro Elétrico – vista em planta

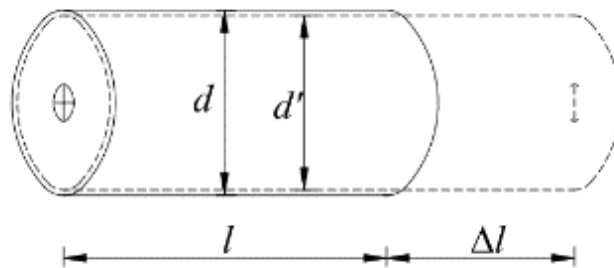


Fonte: Andrade (2012)

O extensômetro de resistência é aplicado na estrutura em análise antes da aplicação dos esforços externos. Após aplicação de força, esta promove deformações na estrutura que são diretamente transmitidas para base do extensômetro, que por sua vez deforma a resistência metálica, fazendo assim a variação da mesma (GUADAGNINI; SARAIVA; ELISABETH, 2011).

Conforme se observa na Figura 21, a medida que o fio sofre uma tração axial seu comprimento inicial l é alterado para $l + \Delta l$, o que ocorre na mesma proporção com a resistência elétrica que passa de R para $R + \Delta R$.

Figura 21. Deformação de um fio sob tração (alteração do diâmetro “ d ” para “ d' ”)



Fonte: Andolfato; Camacho; Brito (2004)

Sendo que a Resistência Elétrica (R) de um condutor metálico e isotrópico é dada pela Equação 31.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (31)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica do material

l = comprimento do elemento condutor

A = área da seção transversal do condutor

Diferenciando a Equação 31, tem-se a Equação 32.

$$dR = \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho \quad (32)$$

Considerando que nas medições de deformação com o uso deste tipo de extensômetros as variações de resistência elétrica são bem pequenas (ASSIS, 2007)

e com a aplicação da resistência elétrica (R) como divisor na Equação 32, tem-se a Equação 33, reescrita na forma da Equação 34.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\frac{\rho}{A}\Delta L}{\frac{\rho L}{A}} - \frac{\frac{\rho L}{A^2}\Delta A}{\frac{\rho L}{A}} + \frac{\frac{L}{A}\Delta\rho}{\frac{L}{A}\rho} \quad (33)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (34)$$

Entretanto, a deformação do condutor da Figura 21 não ocorre somente na direção longitudinal do mesmo, mas também no sentido transversal, sendo que d passa a ser d' , com redução da seção, no caso de tração, ensejando na aplicação do Coeficiente de *Poisson*, demonstrado pela Equação 5. No caso de condutor com seção circular, é utilizada a Equação 35.

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta d}{d} = 2 \frac{d'-d}{d} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (35)$$

Com a substituição da Equação 35 na Equação 34, obtém-se a Equação 36.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} + 2\nu \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta\rho}{\rho} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (36)$$

A relação entre a deformação específica e a variação de resistência é denominada *Gage Factor* (GF) ou Fator de Sensibilidade (K), coeficiente adimensional determinado pela Equação 37, que geralmente é um valor entre 1,85 e 2,15 fornecido pelo fabricante do sensor, conforme afirma Assis (2007).

$$GF = K = (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (37)$$

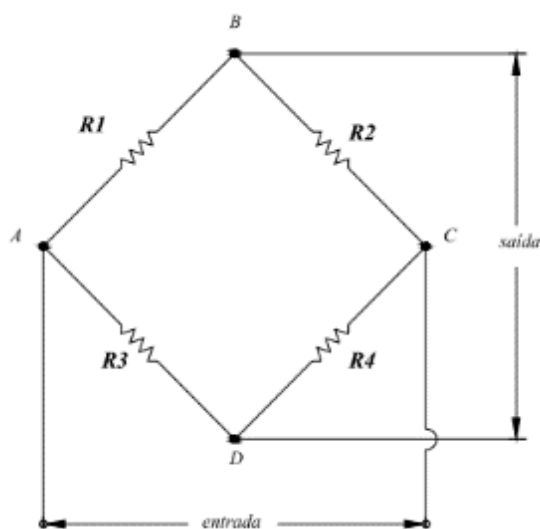
Por fim, a Equação 37 é reescrita em função da Equação 36, ficando expressa na forma da Equação 38, assim apresentada por Assis (2007).

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (38)$$

Quando as deformações causam pouca variação de resistência é necessária a utilização de uma Ponte de *Wheatstone*, que é um circuito elétrico onde o extensômetro ou os extensômetros são ligados a resistores de igual potência, o que totalizam quatro braços resistivos, sendo que a variação de resistência é medida indiretamente pela variação de tensão elétrica da saída da Ponte, proporcional a variação de resistência no extensômetro (GUADAGNINI; SARAIVA; ELISABETH, 2011).

Este circuito (Figura 22) denominado Ponte de *Wheatstone*, permite a medição com grande sensibilidade de grandezas como resistências, capacitâncias e indutâncias, circuito este desenvolvido por *Charles Wheatstone* (ASSIS, 2007).

Figura 22. Ponte de *Wheatstone*



Fonte: Andolfato; Camacho; Brito (2004)

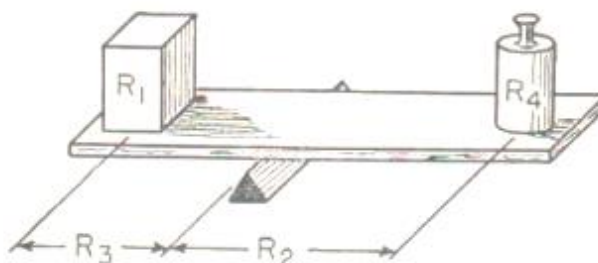
A Ponte de *Wheatstone* estará em equilíbrio quando ocorrer a igualdade expressa pela Equação 39, referente às resistências elétricas (R).

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \text{ ou } R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (39)$$

Diversas ilustrações ajudam na compreensão do equilíbrio da Ponte de *Wheatstone*. No primeiro caso, de forma análoga ao de uma balança com os braços de alavanca equilibrados (Figura 23) pelo mesmo momento (força pela distância), enquanto que no segundo caso, a vazão da Ponte Hidráulica (Figura 24) não terá

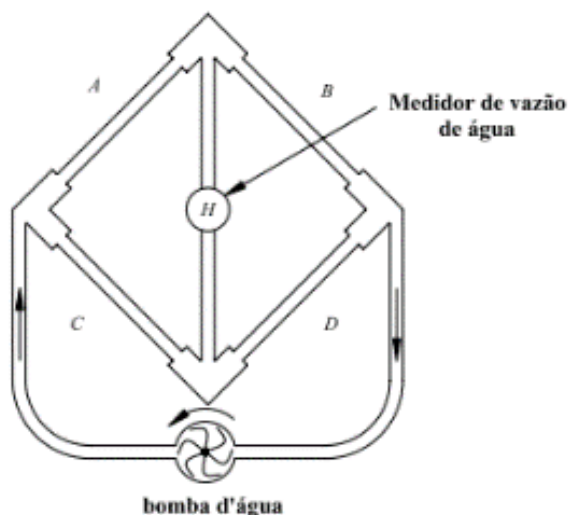
nenhuma alteração de vazão no ponto H , desde que não haja nenhuma alteração de resistência no tubos A, B, C e D .

Figura 23. Analogia mecânica da Ponte de Wheatstone



Fonte: Perry; Lissner (1962)

Figura 24. Ponte Hidráulica

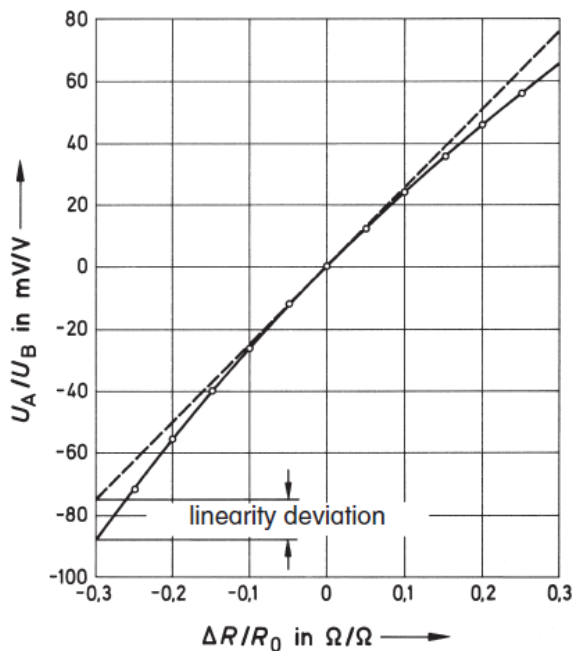


Fonte: Andolfato; Camacho; Brito (2004)

A partir da variação de uma das resistências (R_1, R_2, R_3 e R_4) da Figura 22, tem-se então a variação de tensão elétrica de saída (V_s) do circuito. Esta variação de resistência (ΔR), se dá pela variação de deformação mecânica (ε) no sensor, conforme explicado anteriormente.

Hoffmann (1989) adverte que em função das mudanças de resistência dos braços da Ponte de *Wheatstone*, bem como em função da qualidade do sinal, pode ocorrer um desvio linear (Figura 25) no equilíbrio da Ponte, o que pode ser interpretado como uma desvantagem no uso deste circuito.

Figura 25 - Desvio Linear em modo de ¼ de Ponte de Wheatstone

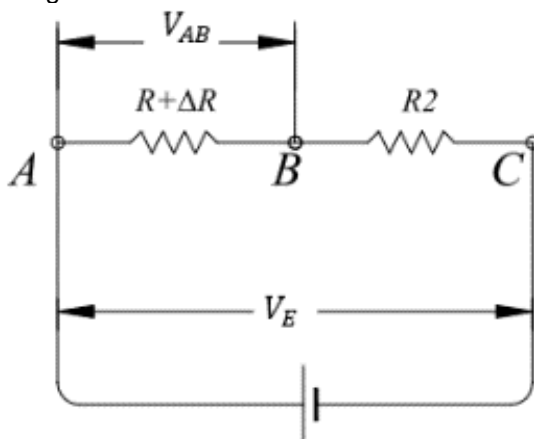


Fonte: Hoffmann (1989)

No caso de dois resistores ($R + \Delta R, R_2$) ligados em série, de acordo com a Figura 26, com uma tensão elétrica de entrada (V_E) aplicada nos pontos A e C, teremos uma tensão de saída (V_{AB}) entre A e B, dada pela Equação 40 (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

$$V_{AB} = \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] V_E \quad (40)$$

Figura 26. Circuito com resistores em série



Fonte: adaptado de Andolfato; Camacho; Brito, 2004

Extrapolando o circuito da Figura 26, para o circuito de uma Ponte de *Wheatstone* com quatro resistores, sendo um deles o sensor de deformação, a Equação 40 é substituída pela Equação 41.

$$V_s = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] V_E \quad (41)$$

Considerando que inicialmente todas as resistências são iguais, ou seja, $R = R_2 = R_3 = R_4$, a Equação 41 pode ser reescrita da seguinte forma, Equação 42:

$$V_s = \left[\frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} \right] V_E \quad (42)$$

O valor de $2R$ será muito maior que ΔR (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004), visto que as deformações que provocam as variações de resistência nos sensores são muito baixas, ou seja, $2R + \Delta R \cong 2R$, permitindo construir a Equação 43, que é válida para pequenas deformações.

$$V_s \cong \frac{\Delta R}{R} \frac{V_E}{4} \quad (43)$$

Substituindo a Equação 42 na Equação 43, tem-se então a Equação 44 (HOFFMANN, 1989) da variação de tensão, ou seja, tensão de saída V_s em função das características de sensibilidade do sensor (K) e da deformação (ε_n) em cada um dos quatro ramais (braços) da Ponte de *Wheatstone*, ocorrida na estrutura.

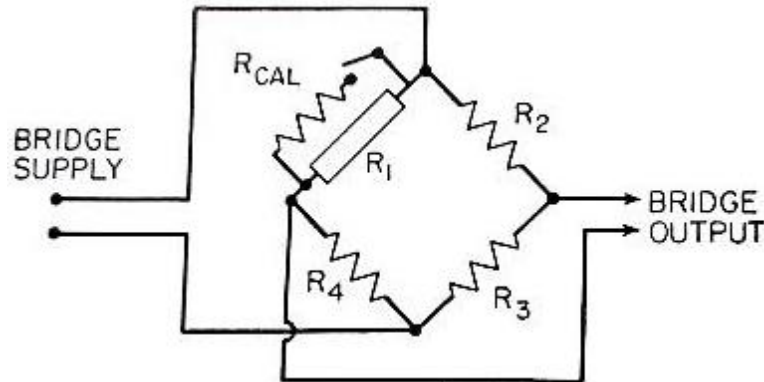
$$V_s = \frac{V_E}{4} K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (44)$$

Por fim, a Equação 44 por ser rescrita na forma da Equação 45, quando apenas $\frac{1}{4}$ da Ponte de *Wheatstone* estiver ativa (PAULINO, 2011), ou seja, quando por exemplo somente ε_1 for um extensometro. Assim, Andolfato, Camacho e Brito (2004) afirmam que “para se determinar o valor da deformação, é necessário apenas medir a voltagem de saída da ponte”.

$$V_s = \frac{V_E}{4} K \varepsilon \quad (45)$$

A calibração direta (usando força conhecida, comprimento padrão e etc...) não é indicada para se fazer uma calibração de medidas usando a Ponte de *Wheatstone* com extensômetros (HOFFMANN, 1989). Neste caso, uma forma de calibração é por meio da instalação de um resistor ligado em paralelo ao extensômetro (Figura 27), visando desbalancear o equilíbrio da Ponte de *Wheatstone* quando da calibração. Esta forma de calibração, é conhecida como técnica do resistor *shunt*.

Figura 27. Ponte de Wheatstone com resistor de calibração



Fonte: Perry; Lissner (1962)

Quando o resistor de calibração (R_{cal}) é acionado, a resistência do extensômetro (R_1 ou R_g) é somada a do resistor de calibração, de forma inversa (soma de resistores em paralelo) conforme Equação 46, obtendo-se então uma variação de tensão (V) na leitura da Ponte.

$$\frac{1}{R_{final}} = \frac{1}{R_{cal}} + \frac{1}{R_1} \quad (46)$$

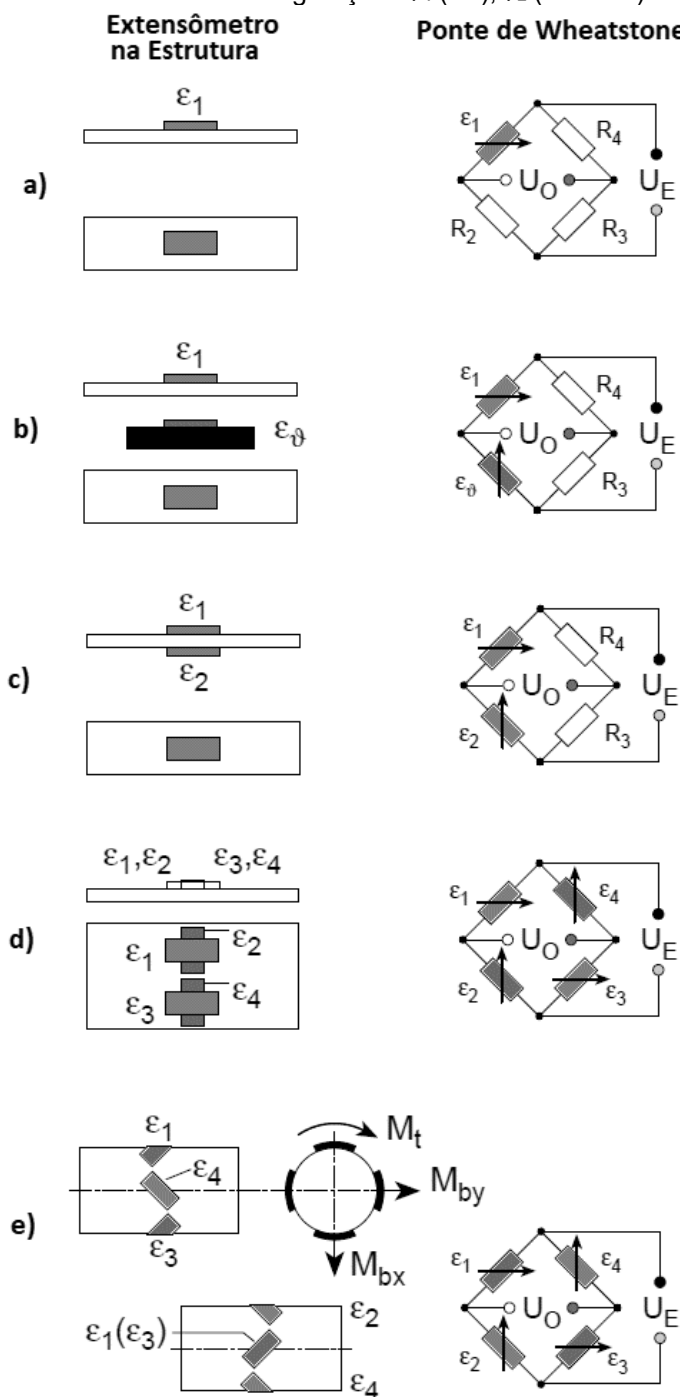
A calibração indireta é feita associando-se o valor da leitura digital (por exemplo em *bytes*), ao valor da deformação equivalente pela ligação do resistor de calibração. Segundo Hoffmann (1989) essa deformação equivalente é obtida (em $\mu m/m$) por meio da Equação 47.

$$\varepsilon_{eq.} = \frac{1}{K} \left(\frac{R_{cal}}{R_g + R_{cal}} - 1 \right) 10^6 \quad (47)$$

Como as variações de tensão elétrica (V) são proporcionais as variações de deformação (ϵ), uma relação entre o número digital (em *bytes*) e a deformação simulada é feita e com a obtenção de um fator de proporcionalidade é possível determinar outras deformações a partir da calibração do sistema.

A utilização de extensômetro numa Ponte de *Wheatstone*, não fica limitada somente a um sensor, ou seja, diferentes configurações (Figura 28), podem estar associadas à forma de instalação de um ou mais extensômetros uniaxiais na estrutura, de acordo com o esforço solicitante que se deseja mensurar, quando se conhece a posição das tensões principais. Entretanto a utilização de extensômetros como em exemplos da Figura 28, carecem da utilização Fator de Ponte (*Bridge Factor*), encontrados na literatura (Apêndice A), tendo em vista os diferentes arranjos de Ponte de *Wheatstone*, para obtenção da deformação final.

Figura 28. Ponte de Wheatstone nas configurações $\frac{1}{4}$ ("a"), $\frac{1}{2}$ ("b" e "c") e completa ("d" e "e")

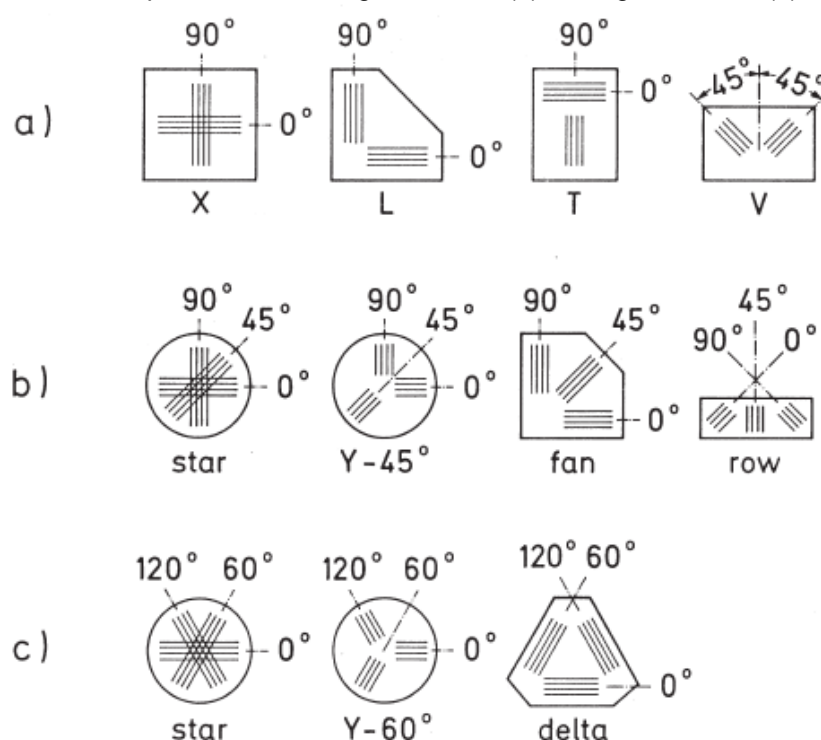


Fonte: adaptado de Laible (2000)

No caso "a" da Figura 28, o extensômetro capta as deformações provenientes de momento fletor e força normal; no caso "b" os mesmos esforços do caso "a", porém com a compensação de deformação por variação de temperatura; no caso "c" momento fletor; no caso "d" momento fletor e força normal; e no caso "e" momento torsor.

Contudo, quando a localização das tensões e deformações principais não são conhecidas, não é possível determiná-las com o uso de extensômetros uniaxiais, sendo para tanto necessário o uso de extensômetros tipo rosetas tipos “b” e “c” da Figura 29.

Figura 29. Extensômetros tipo Rosetas: retangular biaxial (a); retangular triaxial (b); delta triaxial (c)

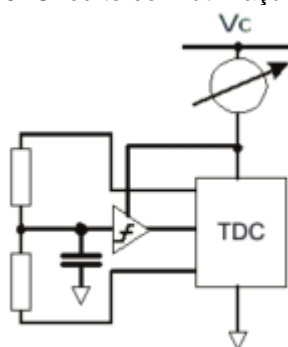


Fonte: Hoffmann (1989)

Conhecidas três deformações específicas em um ponto da estrutura, bem como angulação entre as mesmas e o Módulo de Elasticidade e Coeficiente de *Poisson*, é possível determinar as tensões normais e tensões tangenciais, máximas e mínimas, mediante formulação específica, descrita mais adiante.

Quando se tratar de um monitoramento de longa duração, com a utilização de um sistema de redes de sensores sem fio em extensômetros, é necessário utilizar um circuito eficiente para aplicação de energia. Pode-se utilizar um método, constituído da combinação de sensores de medição de tensão e de comunicação via rádio, com base em um conversor *Time-To-Digital Conversion* (TDC) em substituição a Ponte de *Wheatstone*, possibilitando medições com alta precisão e minimização da demanda de energia (KÖPPE; BARTHOLMAI, 2011), conforme Figura 30.

Figura 30. Circuito com utilização de TDC



Fonte: adaptado de Köppe; Bartholmai (2011)

Este tipo de sensor, extensômetro de resistência elétrica, foi contemplado com uma revisão da literatura mais extensa que os demais sensores de deformação, uma vez que este é o sensor empregado nesta pesquisa.

2.1.2.4. Sensor de Corda Vibrante

O funcionamento dos sensores de cordas vibrantes (Figura 31), se dá a partir da medição da frequência de vibração de uma corda metálica esticada, com relação à tensão na qual essa corda é submetida. É um sensor largamente utilizado para monitoramento de barragens e pontes, ou ainda utilizado como sensor para construção de células de carga e transdutores de deslocamento (ASSIS, 2007).

Figura 31. Sensor de Corda Vibrante



Fonte: <http://www.geokon.com/4000>

Apesar de muito utilizado em determinados tipos de monitoramentos, os extensômetros de corda vibrante, apresentam grandes dimensões se comparados a outros sensores e seu custo é maior se comparado aos extensômetros de resistência

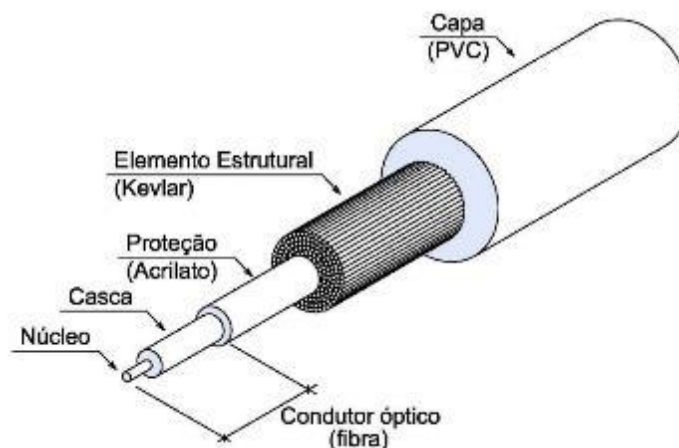
elétrica (SILVA; ASSIS, 2012). Tal sensor pode ser instalado dentro da estrutura, antes da concretagem, operando em temperaturas entre -20°C e 50°C , numa faixa de medição de até $3000\ \mu\text{m/m}$.

Devido à baixa sensibilidade para detectar elevadas frequências de vibração, tais sensores não são apropriados para análises com carregamentos dinâmicos (BERGMEISTER; ROSTAM, 2003, *apud* ANDRADE, 2012).

2.1.2.5. Sensor de Fibra Óptica

As fibras ópticas, (Figura 32), funcionam como guias para confinar e conduzir ondas eletromagnéticas, devido à variação entre os índices de refração da camada denominada casca e do núcleo. Tais fibras são geralmente produzidas com sílica, o que proporciona a característica de guia para as ondas (RIBEIRO, 2014).

Figura 32. Seção transversal de representação da fibra óptica



Fonte: [http://1.bp.blogspot.com/-](http://1.bp.blogspot.com/-9IVR5o7LqAw/UUXYKuJyv9I/AAAAAAAAATc/jnqvocas9F0/s1600/Drawing-38+Model+(1).jpg)

[9IVR5o7LqAw/UUXYKuJyv9I/AAAAAAAAATc/jnqvocas9F0/s1600/Drawing-38+Model+\(1\).jpg](http://1.bp.blogspot.com/-9IVR5o7LqAw/UUXYKuJyv9I/AAAAAAAAATc/jnqvocas9F0/s1600/Drawing-38+Model+(1).jpg)

Usualmente os sensores de fibra óptica são constituídos por diversos elementos, tais como a fonte emissora de luz, a fibra, o fotodetector, o demodulador, o processador e o expositor óptico, além de outros aparatos relacionados a eletrônica (ANDRADE, 2012).

Enquanto muitos sensores sofrem com efeitos eletromagnéticos, os sensores de fibra óptica são imunes a tais efeitos, o que torna sua utilização vantajosa sob este aspecto. Entretanto, a aquisição de dados para estes sensores requer o uso de sistemas específicos (SANTOS, 2014).

Neste mesmo sentido, Bremer *et al.* (2016), afirmam que os sensores de fibra óptica são adequados para uso no Monitoramento de Integridade Estrutural na Engenharia Civil, pois resistem às interferências eletromagnéticas e possuem a devida robustez para resistir à ambientes agressivos.

Os sensores constituídos por fibra óptica podem ser utilizados para medição de deformações em estruturas civis, além de outras grandezas (DOORNINK, 2004 *apud* ASSIS, 2007). Melo (2011) destaca que os sensores de fibra óptica podem ser utilizados para medição de temperatura, deslocamento, rotação, aceleração e umidade, além de sua aplicação para medição de deformações.

De acordo com o Maciel e Veloso (2013), o tema sensores ópticos é objeto de poucos trabalhos publicados e o custo para aquisição de materiais e equipamentos relacionados a tecnologia é muito elevado. Espera-se que com os avanços tecnológicos na área, os custos diminuam.

Ainda que existam fatores que dificultem a utilização dos sensores de fibra óptica em grande escala. Oh *et al.* (2017) destacam que os mesmo são utilizados para medição de deformações possibilitando estimar tensões e detectar danos nas estruturas.

2.1.2.6. Medição Fotoelástica

A medição fotoelástica consiste em um método e não em um sensor, em que um pedaço de material transparente é submetido a esforços e examinado à luz polarizada que passe pelo mesmo, gerando variações brilhantes na forma colorida, que estão associadas às tensões provocadas pelos esforços. Este método foi descoberto por *David Brewster* no início do século 19, contudo sua aplicação efetiva na engenharia, se deu somente muitas décadas após sua descoberta (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

Ao ser tensionado (Figura 33a), um material transparente isotrópico, se torna opticamente anisotrópico, fazendo com que o seu índice de refração (Equação 48) se torne direcional. Isso caracteriza este material como birrefringente, ou seja, o índice de refração varia em função do estado de tensão e de sua orientação. Esta birrefringência, permite que a luz polarizada seja dividida em duas componentes com velocidades distintas ao travessar o material translúcido, o que gera uma série de franjas coloridas (Figura 33b), ou seja, isocromáticas (PEROSA, 2013).

$$n = \frac{c}{v} \quad (48)$$

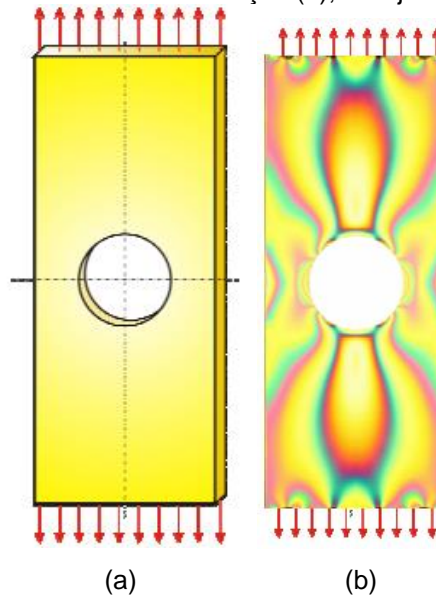
Onde:

n = índice de refração

c = velocidade de propagação da luz no material transparente

v = velocidade da luz no vácuo

Figura 33. Estrutura submetida à esforços (a); Franjas isocromáticas (b)



Fonte: adaptado de Frankovský, Ostertag e Ostertagová (2012)

No caso de uma estrutura, em que se tenha as tensões principais σ_1 e σ_2 , os índices de refração n_1 e n_2 , estarão nas mesmas direções destas tensões, o que permite estabelecer as Equações 49 e 50. Com isso, mediante a aplicação de uma luz polarizada na estrutura, ocorrerá uma retardação relativa (δ) entre as duas componentes da luz, determinada por meio da Equação 51 (PEROSA, 2013).

$$n_1 - n = c_1 \sigma_1 - c_2 \sigma_2 \quad (49)$$

$$n_2 - n = c_1 \sigma_2 - c_2 \sigma_1 \quad (50)$$

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (51)$$

Onde:

c_1 = coeficiente direto de tensão óptica (constante fotoelástica)

c_2 = coeficiente transversal de tensão óptica (constante fotoelástica)

λ = comprimento de onda da luz

h = espessura da estrutura (chapa)

A diferença das tensões principais é proporcional a retardação relativa (δ), também denominada *diferença de fase*, conforme determinado experimentalmente, num determinado material, numa determinada espessura para um comprimento de onda de luz, permitindo que a Equação 50, seja escrita na forma da Equação 52 (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (52)$$

Onde:

C = constante fotoelástica

As franjas isocromáticas observadas em experimentos de fotoelasticidade, possuem uma classificação quanto a sua ordem (N), fazendo com que $\sigma_1 - \sigma_2$ na franja de segunda ordem ($N = 2$) possua o dobro do valor de $\sigma_1 - \sigma_2$ na franja de primeira ordem ($N = 1$), sendo sua ordem calculada pela Equação 53, para que seja possível determinar a diferença das tensões principais (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = h \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (53)$$

Em muitos casos a estrutura a ser analisada não é constituída por um material transparente, contudo é possível em alguns casos, utilizar películas fotoelásticas (Figura 34), usualmente aplicada com tinta refletiva, sobre a estrutura que irá receber o esforço mecânico (PEROSA, 2013).

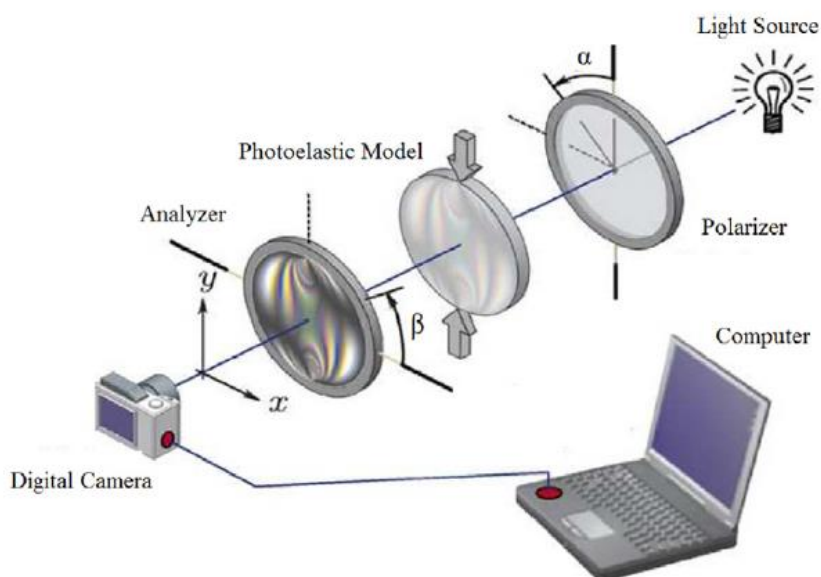
Figura 34. Aplicação de película de resina fotoelástica



Fonte: Vishay Precision Group *apud* Perosa (2013)

Atualmente a medição de tensões por fotoelasticidade conta com sistemas experimentais automatizados (Figura 35) como com a captura de imagens digitais a uma velocidade constante, por meio de uma câmera digital, para posterior processamento das mesmas, gerando dados mais precisos e com menos incertezas. Contudo, tais sistemas ainda carecem de mais estudos, para melhorar os resultados e a automatização dos mesmos (MAGALHÃES JÚNIOR; MAGALHÃES; MAGALHÃES, 2017).

Figura 35. Arranjo de polariscópio plano acoplado a um computador



Fonte: Pinit; Umezaki, 2007 *apud* Magalhães Júnior; Magalhães; Magalhães, 2017

Perosa (2013) concluí que a análise computacional de imagens de fotoelasticidade, ou seja, pixel a pixel, permite a obtenção de melhores resultados e mais completos, se comparado a outros métodos tradicionais, além da maior velocidade na análise e repetição do experimento, o que é fundamental em pesquisas científicas.

2.1.3. Sensores de Deslocamento

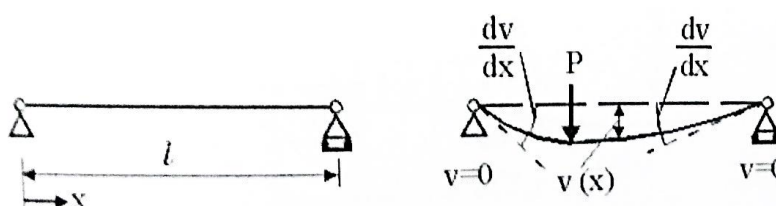
Visando um melhor entendimento sobre os sensores de deslocamento, esta seção inicia-se com conceitos e formulação analítica referentes a deslocamentos em estruturas.

2.1.3.1. Deslocamento em Estruturas

De maneira geral as estruturas estão sujeitas a deflexões, ou seja, seus eixos podem apresentar variações posicionais no espaço, sejam elas de translação ou rotação. Os movimentos de translação (deslocamentos) são aqueles lineares e o de rotação são os angulares. O deslocamento de uma estrutura, decorrente de uma deformação provocada por uma força externa, constitui elemento desta pesquisa, no que diz respeito à utilização de sensor para medição de sua grandeza.

Além de resistir aos esforços, as estruturas devem ser projetadas para que não ocorram deformações excessivas, caracterizadas pelos deslocamentos dos eixos de seus baricentros das barras nas direções x , y e z . Nas vigas de eixo reto (Figura 36), os deslocamentos verticais são os maiores em comparação aos demais, com isso, a componente vertical costuma ser denominada flecha ou deslocamento vertical (ASSAN, 2010).

Figura 36. Viga indeformada (esquerda) e viga deformada (direita)

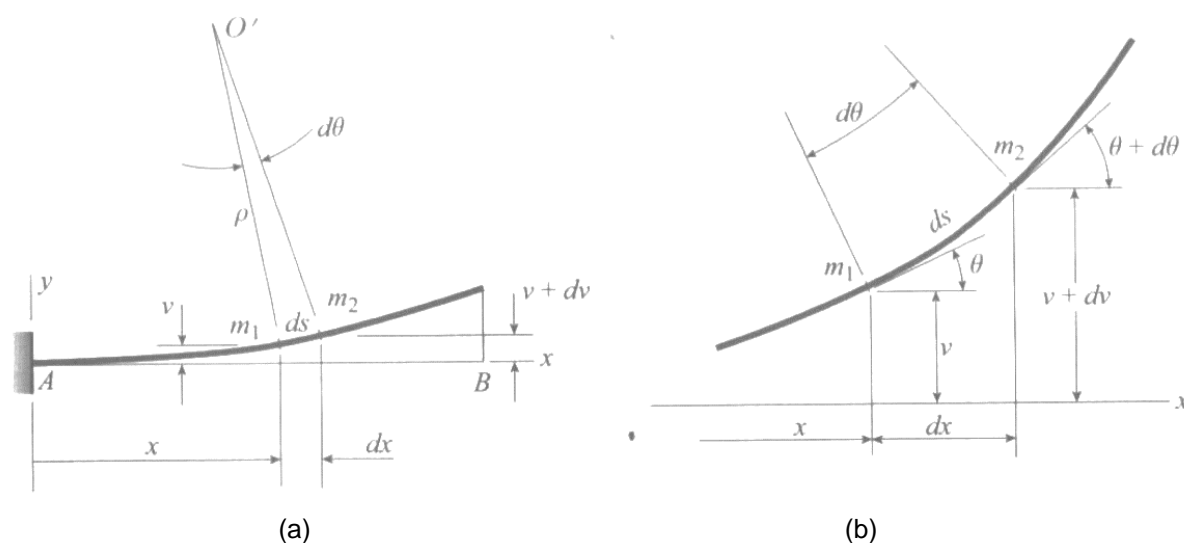


Fonte: adaptado de Assan (2010)

Em grande parte, para determinação dos deslocamentos verticais de vigas a resolução analítica se baseia em equações diferenciais da curva de deslocamentos verticais e relações associadas a mesma (GERE; GOODNO, 2015).

Quando uma viga é flexionada, a exemplo da viga da Figura 37a, além do deslocamento vertical expressa por v , uma rotação, caracterizada pelo ângulo θ (Figura 37b), também ocorre.

Figura 37. Curva de deslocamento vertical de uma viga



Fonte: Gere e Goodno (2015)

Segundo Gere e Goodno (2015), da Figura 37 o raio de curvatura (ρ) a partir do ponto O' , resulta na Equação 54 e, conseqüentemente, a curvatura (k) é dada pela Equação 54, sendo que a inclinação da curva de deslocamento vertical é a primeira derivada de dv/dx , referente a expressão do deslocamento v , ou seja, a inclinação é o incremento da distância dv , dividido pelo incremento da distância dx , os quais são infinitamente pequenos, fazendo com que a inclinação dv/dx seja igual a tangente de θ , obtendo então as Equações 56 e 57.

$$\rho d\theta = ds \quad (54)$$

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (55)$$

$$\cos \theta = \frac{dx}{ds} \quad (56)$$

$$\sin \theta = \frac{dv}{ds} \quad (57)$$

Contudo, nas construções civis, usualmente seus elementos estruturais incorrem em pequenos valores de rotação, o que permite fazer a aproximação demonstrada pela Equação 58 (GERE; GOODNO, 2015).

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{dv}{dx} \quad (58)$$

Derivando θ em x na Equação 58, com posterior substituição pela Equação 55, tem-se a Equação 59.

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (59)$$

Da Relação Momento-Curvatura, tem-se a Equação 60 (GERE; GOODNO, 2015), relacionando o Momento Fletor (M), com a curvatura (k), com o Módulo de Elasticidade (E) e com o Momento de Inércia (I).

$$M = kEI \quad (60)$$

Finalmente, substituindo k da Equação 60 pela Equação 59, tem-se a equação (61) diferencial da curvatura de deslocamento vertical básica de uma viga.

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (61)$$

Genericamente o valor do deslocamento (v) pode ser dado também pela Equação 62 (BEER; JOHNSTON, 1995), onde C é a constante de integração.

$$EI v = \int_0^x dx \int_0^x M(x)dx + C_1x + C_2 \quad (62)$$

A medição do deslocamento linear, especialmente em estruturais civis, quando de seu monitoramento, é um item de grande relevância para avaliação do processo construtivo, inclusive para evitar problemas estruturais futuros. O monitoramento de

deslocamento, é uma importante ferramenta para acompanhamento das respostas estruturais não previstas em edificações e para avaliação do seu estado de segurança (ASSIS, 2007).

Andrade (2012), destaca que para se medir o deslocamento de uma estrutura e necessário proceder em duas etapas, ou seja, antes e depois da aplicação da carga accidental, pois só assim é possível determinar o deslocamento em função da alteração geométrica.

A medição de deslocamento em estruturas civis, também pode ser feita por vários tipos de sensores como, por exemplo, por meio de comparadores elétricos, transdutores, sistemas de nivelamento hidrostático e sistema GPS (*Global Positioning System*) provido de precisão compatível com a necessidade do caso (ASSIS, 2007).

Os sistemas relacionados por meio de determinação topográfica, geodésica e Via Satélite não serão aqui abordados, por não terem aplicação direta no sistema objeto desta dissertação.

2.1.3.2. Sensor Mecânico

O sensor mecânico de deslocamento, também denominado *Relógio Comparador*, (Figura 38), pode ser baseado no instrumento projetado por *Abramson*, onde uma alavanca é associada a uma mola torcional do tipo fita e um ponteiro também é conectado a esta fita. À medida que a mesma tem seu tamanho aumentado, esta variação é proporcionalmente indicada pelo ponteiro. Outros sistemas mecânicos também podem ser utilizados nestes sensores, onde o cursor de deslocamento está ligado a um sistema de cremalheira/trem de engrenagens e este a um ponteiro instalado em um mostrador circular, semelhante a um relógio analógico (CAVACO, 2002).

Figura 38. Relógio Comparador Analógico

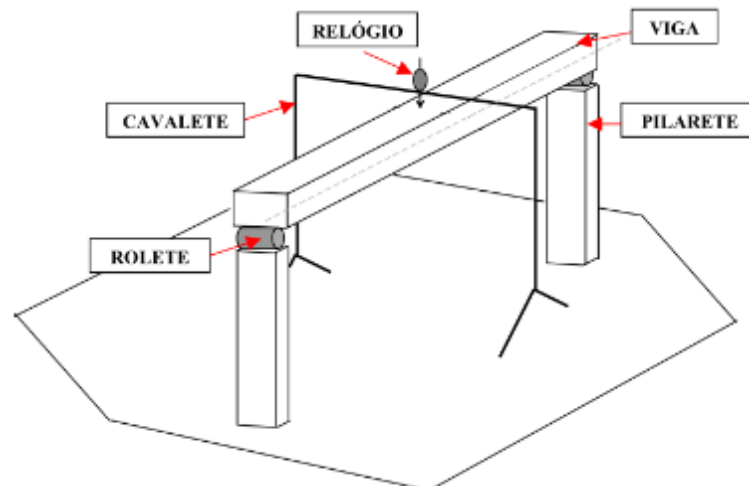


Fonte:

<http://www.mitutoyo.com.br/novosite/produtos/produtos/01small/relogiocomparadoranalogico.html>

Apesar de boa precisão, simples manuseio e baixo custo, os *Relógios Comparadores* apresentam algumas desvantagens, tais como a necessidade de uma fixação externa a estrutura em análise (Figura 39), o que impede seu uso em várias estruturas com grandes dimensões e distâncias do solo.

Figura 39. Esquema de instalação do Relógio Comparador



Fonte: adaptado de Sampaio (2004)

Apesar desta restrição quanto sua fixação externa, sua utilização é amplamente empregada em laboratórios e em protótipos de escala reduzida.

2.1.3.3. Sensor Potenciométrico

O sensor ou transdutor potenciométrico é mais uma solução para medição de deslocamentos. O mesmo trabalha com a relação entre resistência e comprimento de seu condutor. Para tanto, é empregado um potenciômetro linear onde a variação da resistência ocorre em detrimento do deslocamento de seu cursor, que deve estar conectado a estrutura em análise (ANDRADE, 2012).

Como a variação de resistência elétrica (R) implica em variação de tensão elétrica (V) e corrente elétrica (i), conforme Lei de *Ohm* (Equação 63), as distâncias, ou seja, deslocamentos, podem ser associados à essas variações do cursor do sensor.

$$V = Ri \quad (63)$$

No mercado podem ser encontrados vários tipos de Transdutores Pontenciométricos, como por exemplo, com cursor linear de 50mm (Figura 40) e resistência de $5k\Omega$.

Figura 40. Transdutor Potênciométrico Linear



Fonte: <http://www.gefran.com/pt/br/products/74-py3-apalpador-com-ponta-de-rolamento>

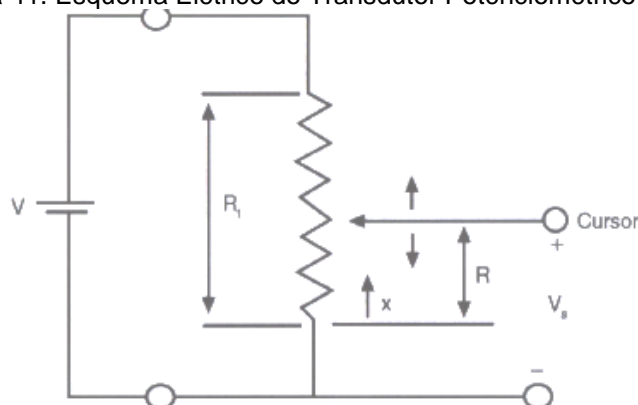
A resistência medida em um potenciômetro varia em função da resistividade (ρ) do condutor, de sua seção transversal (A) e do comprimento (L). Estes parâmetros associados a Lei de *Ohm*, geram o valor da resistência conforme Equação 64.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (64)$$

Com isto, os transdutores potenciométricos, (Figura 41), têm sua resistência elétrica (R) alterada em função da posição do cursor deslizante, sendo a resistência diretamente proporcional ao comprimento do condutor (x), que é dado pela posição do cursor, resultando na Equação 65 (BALBINOT, 2008).

$$R = \frac{\rho}{A} x \quad (65)$$

Figura 41. Esquema Elétrico do Transdutor Potenciométrico Linear



Fonte: Balbinot (2008)

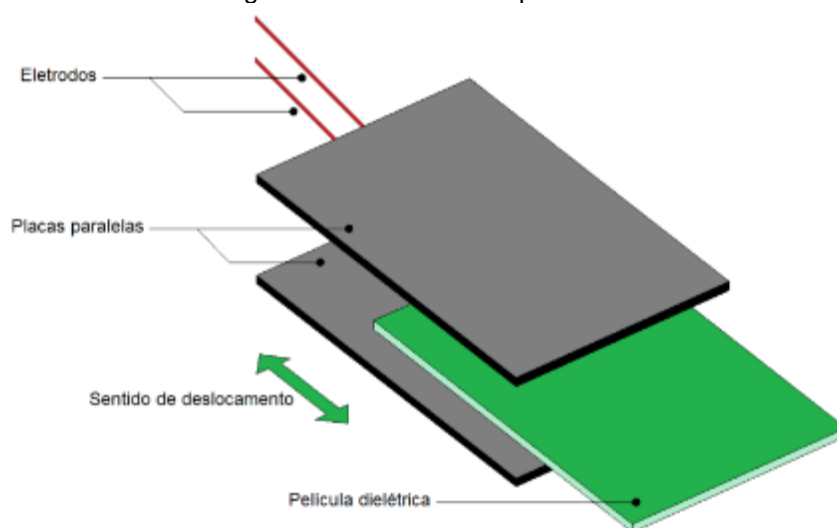
Tais sensores podem ter sua resolução limitada em função do aumento de ruídos em decorrência da presença de poeira, existência de umidade, oxidação e até mesmo desgaste. Em linhas gerais estes sensores são simples, robustos, de baixo custo e de boa precisão (BALBINOT, 2008).

O Transdutor Potenciométrico Linear foi contemplado com uma revisão da literatura mais extensa que os demais sensores de deslocamento, uma vez que este é o sensor empregado nesta pesquisa.

2.1.3.4. Sensor Capacitivo

Um sensor de deslocamento baseado em um transdutor capacitivo dispõe de um condensador, que mediante o deslocamento do cursor apresenta uma variação do valor nominal da capacidade. Seu funcionamento está baseado no esquema da Figura 42. O movimento de uma fina película de um material dielétrico entre duas placas paralelas do capacitor, ligadas a seus respectivos eletrodos, provoca uma variação de capacidade do condensador (ASSIS, 2007).

Figura 42. Transdutor Capacitivo



Fonte: Andrade (2012)

Estes sensores necessitam de um ambiente limpo, que seja isento de sujeiras e água, ou ainda meios dielétricos, que possam provocar interferências no sinal. Contudo, apresentam ótima resolução e estabilidade em uso (ANDRADE, 2012).

Na Figura 43 é apresentado um sensor de deslocamento baseado em transdutor linear capacitivo eletrostático, com resolução de 0,00001mm, exatidão de 0,000015mm e com um cursor de 12,7mm, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

Figura 43. Sensor de deslocamento capacitivo

Fonte: http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/catalogo geral/p2016/33_lineargage.pdf

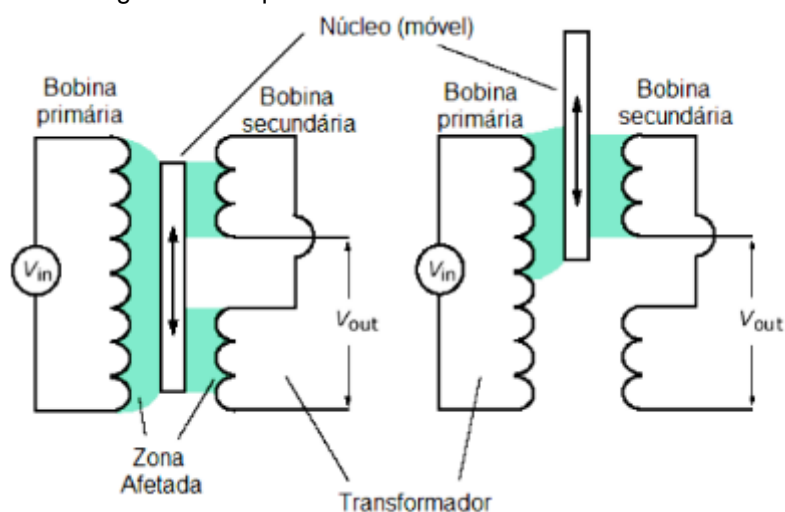
Outra vantagem na utilização dos sensores baseados em sistemas capacitivos é que sua operação é possível em ambientes com grandes variações de temperatura

(CAVACO, 2002), ocasionando menores interferências no processo de medição de deslocamentos.

2.1.3.5. Sensor Indutivo

Os sensores de deslocamentos, baseados em transdutores indutivos, também são conhecidos como LVDT, do inglês *linear variable differential transformer*. O mesmo é composto por um bastão magnético móvel, uma bobina primária e duas secundárias, conforme Figura 44. Com o deslocamento do bastão é gerada uma tensão na bobina primária, o que induz a uma tensão nas bobinas secundárias (ANDRADE, 2012), ou seja, com a variação do deslocamento ocorre variação da tensão elétrica de saída (V_{out}) nas bobinas.

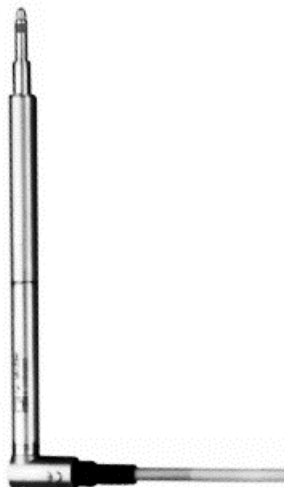
Figura 44. Esquema de Bobinas de Transdutor Indutivo



Fonte: Andrade (2012)

Cavaco (2002) destaca que este tipo de sensor apresenta inúmeras vantagens, tais como alta sensibilidade e boa imunidade a interferências decorrentes de fatores dos ambientes de utilização. O sensor da Figura 45, do fabricante HBM, série WA, possui uma sensibilidade nominal de 80 mV/V que pode operar em temperaturas de -40°C a +125°C.

Figura 45. Transdutor Indutivo de Deslocamento

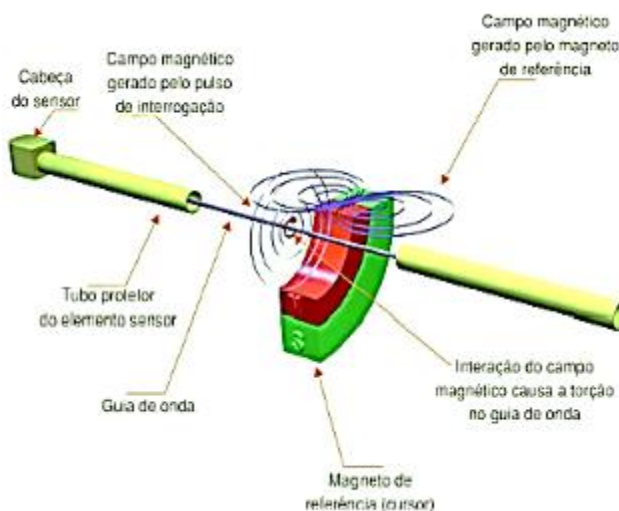


Fonte: adaptado de <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b0553.pdf>

2.1.3.6. Sensor Magnetostritivo

O funcionamento dos transdutores magnetostritivo baseiam-se no Efeito de *Wiedemann*, onde um ímã em movimento próximo a um guia-de-ondas, (Figura 46), cria uma onda ultrassônica que propaga-se até o limite do transdutor (ANDRADE, 2012).

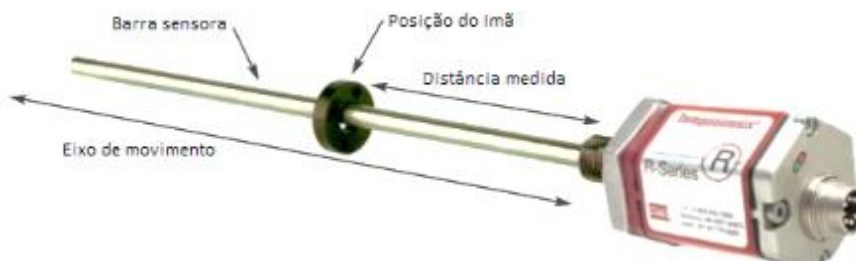
Figura 46. Esquema de movimentação de um ímã em uma guia-de-ondas



Fonte: adaptado de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfYOIAB/sensores>

A exemplo do sensor baseado neste princípio, o da Figura 47, disponibilizado comercialmente pela *MTS Systems Corporation*, apresenta uma resolução de 0,002mm, classificada pelo mesmo como alta.

Figura 47. Sensor baseado em transdutores magnetostritivo



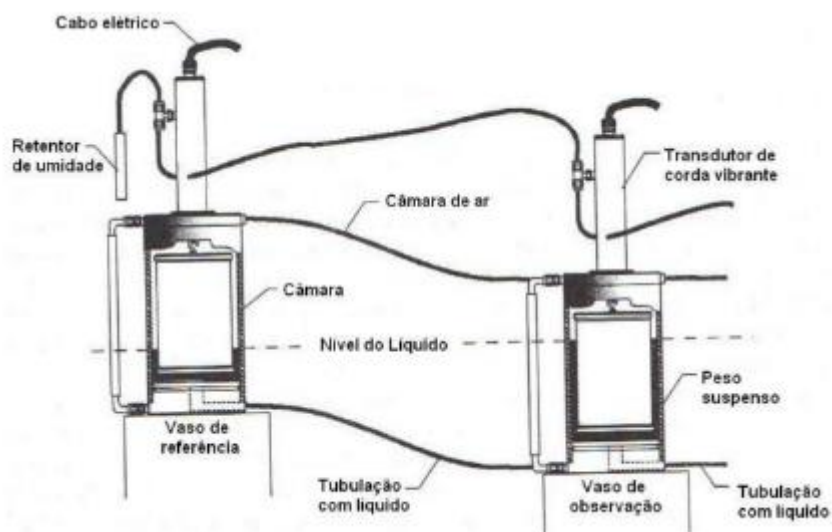
Fonte: adaptado de https://www.controldesign.com/assets/wp_downloads/pdf/mts_sensors.pdf

2.1.3.7. Nivelamento Hidrostático

Os sistemas de nivelamento hidrostático são baseados no princípio dos Vasos Comunicantes, ou seja, existe uma ligação entre todos os vasos que permite ao líquido fluir entre todos eles fazendo com que o nível do líquido na superfície se distribua por igual, criando uma superfície equipotencial (BARRETO, 2015).

Neste caso, à medida que um dos recipientes (Figura 48) interconectados se deslocarem, a diferença do nível do líquido no vaso de observação, entre a leitura do nível final e inicial, corresponderá ao deslocamento sofrido.

Figura 48. Esquema de um Sistema de Nivelamento Hidrostático



Fonte: Bergmeister e Rostam (2003) *apud* Andrade (2012)

Os sistemas de nivelamento hidrostáticos também podem estar associados às transdutores de pressão, o que possibilita a medição de deslocamentos verticais, conforme Figura 49, de Santos (2014), aplicada em estrutura da Ponte Salgueiro Maia, situada sobre o Rio Tejo no Vale de Santarém em Portugal.

Figura 49. Célula de Pressão instalada em sistema de nivelamento hidrostático



Fonte: Santos (2014)

Este sistema, por não necessitar de uma referência no solo, mas apenas um ponto fixo, é uma ótima opção para medição de deslocamento verticais em tabuleiros de pontes, (ASSIS, 2007). Seu custo está diretamente associado ao tipo do transdutor utilizado para efetuar a medida de pressão.

2.1.4. Aquisição e Transmissão de Dados

A aquisição de dados é compreendida por um sistema que abrange a coleta de dados dos sensores, sua conversão e envio ao responsável. Basicamente os sistemas podem ser manuais e informatizados (Figura 50). O informatizado, também conhecido como computadorizado, emprega dispositivos de aquisição de dados, ou DAQ, do inglês *Data Acquisition*, que inclui conversores analógicos-digitais (ADC), condicionadores de sinais (tratamento) e um computador (ANDRADE, 2012).

Figura 50. Esquema típico de um sistema de monitoramento computadorizado



Fonte: adaptado de <http://www.ni.com/dataacquisition/whatis/> e Mufti (2001), *apud* Andrade (2012)

Segundo Melo (2011), a função dos sistemas de aquisição de dados é controlar a captura, armazenamento e exibição dos mesmos, sejam eles analógicos ou digitais, os quais podem ser exibidos em forma de gráficos, depois de tratados, para melhor entendimento.

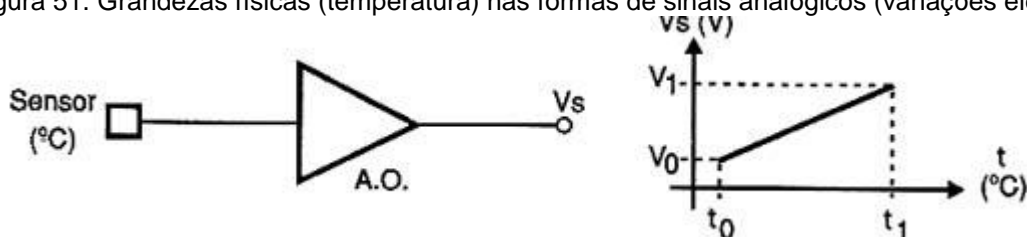
Conforme se observa a seguir, Assis (2007) separa as placas de aquisição em dois grupos: as introduzidas em computador e as sem o auxílio de computador.

Para fins de monitoração de estruturas de Engenharia Civil, os sistemas de aquisição geralmente são constituídos por placas de aquisição PCI (*Peripheral Component Interconnect*), PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association*) ou USB (*Universal Serial Bus*) introduzidas no computador, ou por equipamentos que realizam as tarefas básicas de aquisição sem o auxílio de um computador (*data loggers*). (ASSIS, 2007, p.25)

Um sistema de aquisição de dados é composto por condicionadores de sinais, conversores analógico-digital (AD) e *softwares* próprios. Os condicionadores são os sistemas eletrônicos responsáveis pelas ações de amplificação, filtragem e isolamento dos sinais ainda na condição analógica (ASSIS, 2007).

Os sinais analógicos são nada mais do que grandezas físicas, transformadas em sinais elétricos (tensão, corrente ou resistência), conforme Figura 51, por meio de transdutores, ou seja, de sensores adequados para medição de cada grandeza. A representação destes sinais analógicos, em forma numérica é denominada sinal digital, transformada por meio de um conversor de sinais AD que possui algumas variáveis como taxa de amostragem, resolução e faixa de entrada do conversor (ASSIS, 2007).

Figura 51. Grandezas físicas (temperatura) nas formas de sinais analógicos (variações elétricas)



Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/1879-ins059>

Basicamente um sinal digital, proveniente de um sinal analógico previamente convertido, está limitado a dois estados: baixo ou alto, o que torna tais sistemas binários, quando referenciados em um sistema numérico de dois dígitos, como 0 e 1 (SCHULER, 2013).

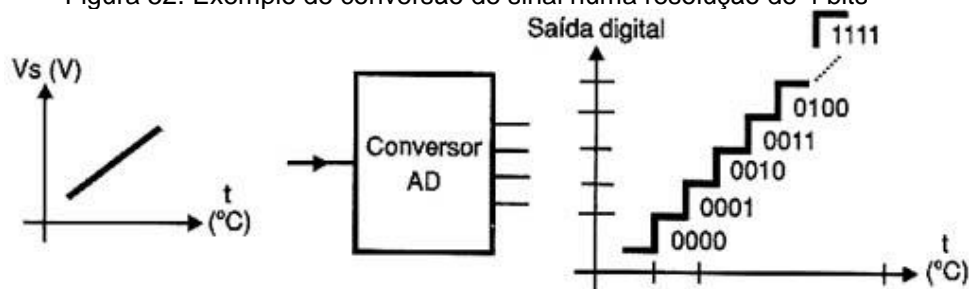
Por exemplo, um conversor de 4 *bits* de resolução, onde 1 *bit* representa dois estados, ou seja, 0 e 1, converterá uma tensão que varie de 0V a 5V em 16 níveis. A conversão baseia-se na Equações 66 e 67 (PINTO; DEGASPERI, 2015).

$$Níveis = 2^{bit} = 2^4 = 16 Bytes \quad (66)$$

$$\frac{\Delta V}{Byte} = \frac{5 V}{16 Bytes} = 0,3125V/Byte \quad (67)$$

A Figura 52, exemplifica a conversão de uma variação tensão elétrica, decorrente de uma variação de temperatura captada por um transdutor, em sinais digitais convertidos numa resolução de 4 *bits*, ou seja, 16 níveis.

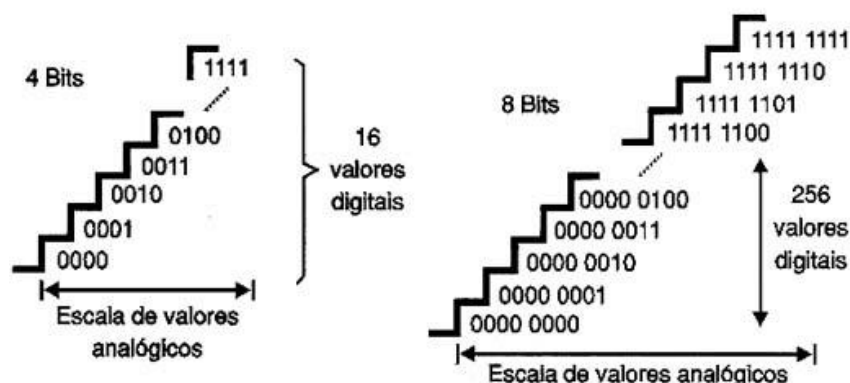
Figura 52. Exemplo de conversão de sinal numa resolução de 4 bits



Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/1879-ins059>

É de suma importância salientar que quanto maior a resolução do conversor analógico-digital, mais preciso serão os valores representados na forma digital, ou seja, serão obtidos mais níveis ou estados (Figura 53). Neste sentido, Schuler (2013) é categórico ao afirmar que se for utilizada a correta resolução e adequada taxa de amostragem, o sinal analógico será convertido num sinal digital exato.

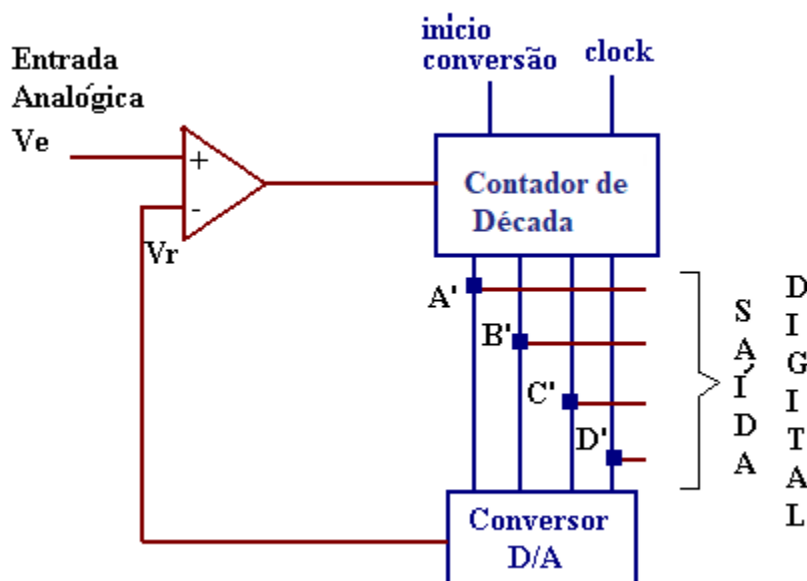
Figura 53. Comparativos de níveis de resolução em 4 e 8 bits



Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/1879-ins059>

Um circuito básico de conversão analógico-digital, conta com amplificador operacional, contador de década, responsável por gerar o código BCD 8421 nas saídas A', B', C' e D', bem como um conversor digital-analógico, conforme ilustrado na Figura 54 (IDOETA; CAPUANO, 2008).

Figura 54. Esquema do circuito de um conversor analógico-digital



Fonte: adaptado de <http://endigital.orgfree.com/sequencial/conversorAD.htm>

Este processo de conversão permite que a utilização do sinal digital, tenha inúmeras vantagens, como por exemplo a possibilidade do sinal ser facilmente gravado e desgravado de vários tipos de mídias, ou seja, armazenado em memórias de computadores, discos magnéticos, entre outras formas, as quais são mais seguras que formatos analógicos de armazenamento (SCHULER, 2013).

Outra vantagem na utilização de sinais no formato digital, é que o mesmo proporciona uma maior flexibilidade na utilização dos dados, uma vez que é possível, por exemplo, aplicar um filtro baseado em um algoritmo, com um simples comando em um sistema computadorizado, enquanto que num sistema puramente analógico, esta filtragem poderia depender da alteração de componentes analógicos do sistema (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Já os *softwares* são responsáveis por comandar todo o sistema de aquisição de dados, que são instalados em computadores ou dispositivos móveis (*smartphone* ou *tablet*) sejam eles específicos de um equipamento ou ainda, *softwares* genéricos para aquisição de dados.

Estes *softwares* muitas vezes dependem da instalação de *Drivers* dos equipamentos de aquisição utilizados. Os *Drivers* são específicos para as placas de aquisição e costumam ser fornecidos pelos próprios fabricantes dos equipamentos.

Dentre os diversos *softwares* genéricos que podem se comunicar com sistemas de aquisição (*hardware*) de diversos fabricantes, tem-se o *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) desenvolvido e comercializado pela empresa *National Instruments*, que segundo Melo (2011) é uma linguagem de programação gráfica, com base no modelo do fluxo de dados, a partir de um diagrama de blocos e um painel frontal para interface com o usuário, tendo como principais campos de aplicação a realização de medições e automação.

Outro *software* com características semelhantes ao *LabVIEW* é o *Agilent VEE*, tanto no que diz respeito a sua forma de programação, quanto ao seu espectro de aplicações. Gomes (2007) pontua diversas características da linguagem do *software Agilent VEE* tais como: fácil aprendizado da linguagem devido sua característica gráfica; direcionada ao uso em automação, controle e aquisição de dados; possibilidade de comunicação com outras linguagens computacionais, inclusive com possibilidade de interface com o *software Matlab*; e possibilidade de criação de painéis de interface com usuário.

Softwares específicos dos sistemas de aquisição também podem ser exclusivos de um *hardware*, como por exemplo o *Catman®* da fabricante *HBM* e o *AqDados* da *LYNX*.

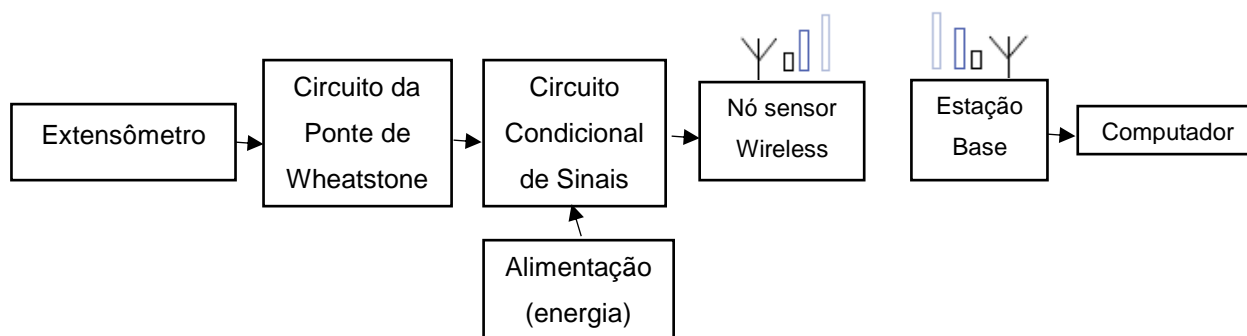
Além da possibilidade de uso destes *softwares* prontos, ainda é possível desenvolver *softwares* por meio de diversas linguagens de programação, tais como *Java*, *C*, *C++*, *C#*, *Python*, *Visual Basic*, *Delphi*, *Pascal* dentre muitas outras, para os sistemas de monitoramento automatizados, opção utilizada nesta pesquisa, a ser apresentada posteriormente.

Finalmente, quanto aos sistemas de transmissão de dados, a comunicação deve garantir o envio e recebimento de dados com a devida integridade, garantido que não ocorram perdas qualitativas ou quantitativas, para que estas informações digitalizadas cheguem ao operador do sistema, afim de que o mesmo possa oportunamente tratar e analisar os dados em um computador (ASSIS, 2007).

Esta transmissão de dados pode ser tanto mediante conexão física por meio de cabos e barramentos, como por meio de redes dotadas de sistemas de comunicação sem fio como *Wi-Fi*, *Bluetooth*, radiofrequência, dentre outras, inclusive com a possibilidade de conexão via *Internet*. Em seu trabalho, Liang e Yuan (2015) apresentaram um diagrama (Figura 55) de rede de sensor sem fio, com a aplicação de sensor tipo extensômetro, para medição de deformações num sistema multi-agente

(MAS) de Monitoramento de Integridade Estrutural, semelhante ao que se pretende implantar nessa pesquisa.

Figura 55. Diagrama de rede sem fio aplicada a sensor de deformações



Fonte: adaptado de Liang; Yuan (2015)

Também conhecida como WSN, do inglês *wireless sensor network*, esta técnica aplicada ao Monitoramento de Integridade Estrutural, por meio de redes sem fio, proporciona diversas vantagens como a redução de custos devido à eliminação da utilização de cabos coaxiais, que em grandes redes representam um alto custo devido às enormes quantidades de materiais empregados e da mão-de-obra utilizada para sua instalação. Além disso, as redes sem fio possibilitam maior flexibilidade e escalabilidade, uma vez que novos nós sensores podem ser facilmente adicionados em campo, conforme a necessidade do projeto, (DEPARI et al., 2014).

Em muitos casos, a utilização de redes sem fio pode estar associada a uma redução de custos no monitoramento, contudo a utilização desta técnica gera preocupações relacionadas à otimização do consumo de energia, uma vez que os sensores costumam ser alimentados por baterias, além de outros problemas como a sincronização entre os sensores, uma vez que a frequência de aquisição de sinais influencia na determinação da arquitetura do projeto de aquisição de dados (FEDERICI *et al.*, 2014).

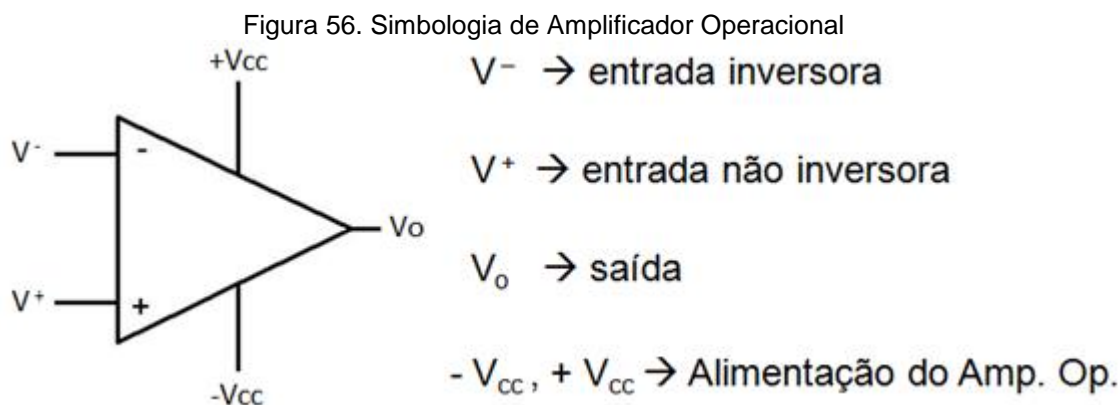
A utilização de rede de sensores sem fio não necessariamente emprega a *Internet*, limitando-se muitas vezes em apenas transmitir informações dentro de uma *LAN*, uma rede de área local, do inglês *local area network*. Contudo, o monitoramento remoto, inclusive em tempo real, necessita que as informações monitoradas não fiquem disponíveis somente nas proximidades do local de coleta, mas sim em qualquer lugar que se queira acessá-las. Basicamente o monitoramento remoto se dá

por meio da utilização da *Internet*. Segundo Casciati e Vece (2017) este monitoramento pode utilizar também sistema GNSS, Sistemas de Navegação Global por Satélite, do inglês *Global Navigation Satellite System*, para transmissão das informações para salas de controle.

Atualmente são utilizadas redes sem fio de sensores para monitoramento contínuo de deformações em grandes edifícios, contudo alguns dados podem ser perdidos ou alterados, devido a interrupções no sistema de transmissão, ou seja, estas falhas devem ser consideradas na análise das informações (OH *et al.*, 2017).

2.1.5. Amplificadores Operacionais de Sinais

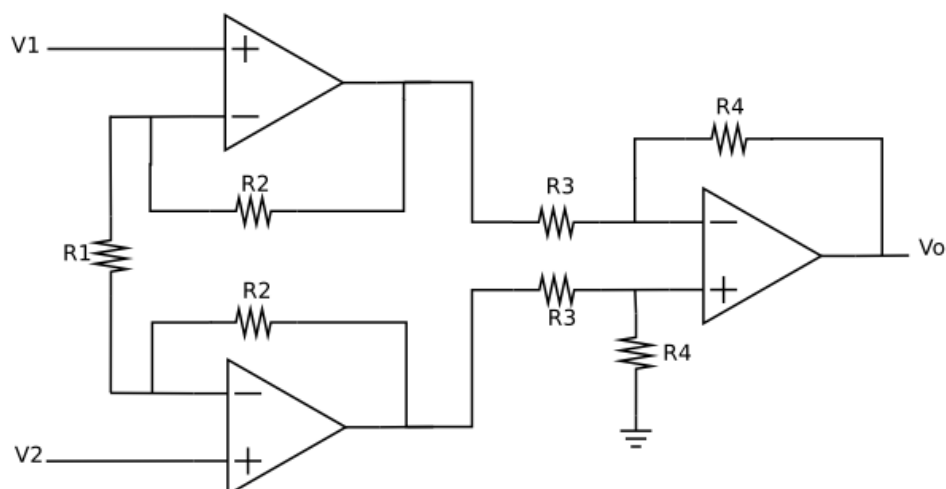
Devido a sua versatilidade, um Amplificador Operacional (AmpOp) é empregado em diversos tipos de circuitos, destacando-se as possibilidades de atuar como um integrador, diferenciador, somador, comparador, além de outras configurações de uso. Este componente analógico (Figura 56), possui dois terminais de entrada (IN_+ e IN_- , ou V_+ e V_-) e um de saída (V_o) (NUNES, 2016).



Fonte: <http://senosecossenos.com.br/eletrica/01-amplificadores-operacionais-em-malha-aberta/>

Para circuitos do tipo Ponte de *Wheatstone*, são empregados três amplificadores em conjunto (Figura 57), que aumentam a impedância de entrada do circuito e melhoram a rejeição do modo comum, denominando-se amplificador de instrumentação, tendo sua tensão de saída (V_o) calculada pela Equação 68 (NUNES, 2016).

Figura 57. Amplificador de Instrumentação

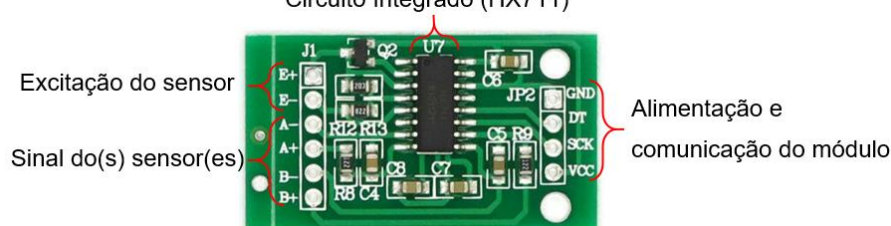


Fonte: Sedra, Smith (2009) *apud* Nunes (2016)

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1) \quad (68)$$

São inúmeros os amplificadores disponíveis no mercado, contudo foi selecionado o módulo HX711 (Figura 58) para testes iniciais, que além de amplificar, converte os sinais analógicos em digitais, numa resolução de 24 bits, ou seja, superior ao conversor de um Arduino UNO ou MEGA, que é de 10 bits.

Figura 58. Módulo conversor Analógico-Digital (ADC) do desenvolvedor *Avia Semicondutor* Circuito Integrado (HX711)



Fonte: adaptado de

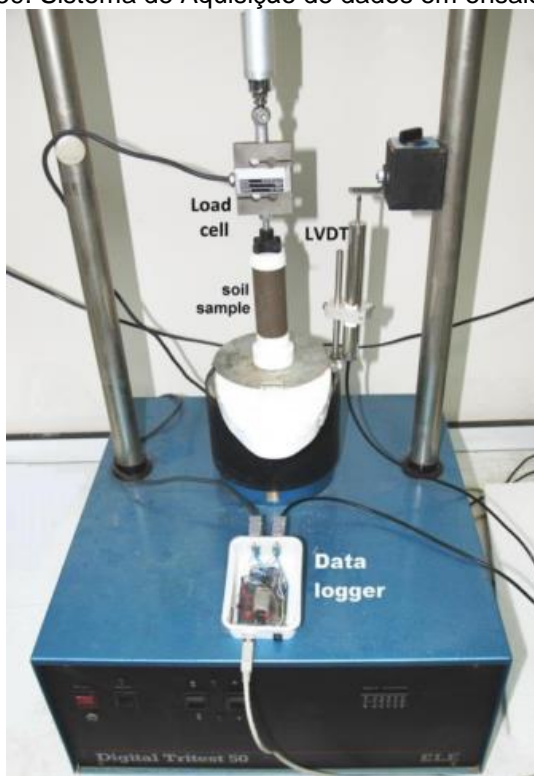
<https://potentiallabs.com/cart/image/cache/catalog/Latest%20components/HX711%20sensor%20module-800x800.jpg>

Além da alta taxa de conversão A/D e outras funções básicas, o HX711 possui diversas características que o destaca de outros amplificadores, tais como rápida resposta; baixo ruído; alta precisão; e baixo custo (KALANGE et al., 2017; KIT, 2016; SHALINI et al., 2017).

A maior parte das aplicações com o módulo HX711 está relacionada ao uso de células de carga. Como por exemplo, o sistema de aquisição de dados de ensaio de compressão de solos, no qual Dipova (2017), utilizou tal módulo em conjunto com um Arduino UNO e uma célula de carga (Figura 59).

Ainda no campo da aplicação das células de cargas integradas à plataforma Arduino por meio de um módulo HX711, Kalange *et al.* (2017) propuseram um sistema de controle e gerenciamento de estoques em prateleiras de supermercados, onde tanto os repositores, assim como os consumidores, interagem com o sistema, que busca otimizar o trabalho dos repositores e o tempo dos consumidores. Sendo que neste segundo caso, os consumidores utilizam um aplicativo *mobile* em seus *smartphones* para ajudar encontrar os produtos desejados, por meio de uma conexão *via internet*.

Figura 59. Sistema de Aquisição de dados em ensaio de solo



Fonte: Dipova (2017)

Gorbunovs *et al.* (2017) descrevem que em seus experimentos com pontes resistivas (Ponte de *Wheatstone*), as variações elétricas decorrentes dos transdutores de uma célula de carga sobre pressão, eram baixas e não podiam ser captadas por um multímetro comum, como já era esperado, sendo necessário então a amplificação de sinais. Foi quando que os mesmos optaram pela utilização de um módulo HX711

associado a um Arduino, para utilização num sistema que se assemelha a uma balança, para análise do equilíbrio humano, no auxílio à detecção de distúrbios de equilíbrio.

Já Shalini *et al.* (2017) propuseram em seu estudo, um sistema de monitoramento de cargas em veículos, por meio de um sistema de medição de pesos, empregando uma célula de carga, o módulo HX711 e um Arduino embarcados no próprio veículo, para que em um *display* LDC o usuário seja informado do valor carregado no veículo, inibindo assim, por exemplo, fraudes na venda de produtos a granel por peso. Este sistema também contaria com uma conexão GSM, para comunicação com os agentes de trânsito, informado se o veículo ultrapassou o peso permitido para tráfego.

Poucas aplicações com o módulo HX711 vão além do uso de células de carga, como a desenvolvida por Anderson *et al.* (2016), onde o referido módulo foi conectado diretamente a extensômetros de resistência elétrica, neste caso, para medições de deformações, na análise de tensões do aro e pneu de uma bicicleta esportiva. Os dados de deformações coletados neste experimento, de uma haste sujeita a esforços externos, foram feitos pelo equipamento MT3004 da Terco® e pelo módulo em questão conectado a um Arduino, sendo que segundo os autores, os resultados entre os dois equipamentos foi o mesmo.

O baixo custo para aquisição do módulo HX711, também foi um fator preponderante na seleção do mesmo. O custo de cada módulo varia entre U\$ 3,0 a U\$ 10,0, o qual pode ser facilmente encontrado em sites de venda pela *internet* (como Mercado Livre®) ou em lojas especializadas de componentes eletrônicos.

2.1.6. Análise e Processamento de Dados

No monitoramento do comportamento estrutural, Santos (2014) destaca que a aquisição de dados por sistemas automatizados gera a necessidade de armazenamento de dados de forma automática e com um processamento associado ao sistema de aquisição.

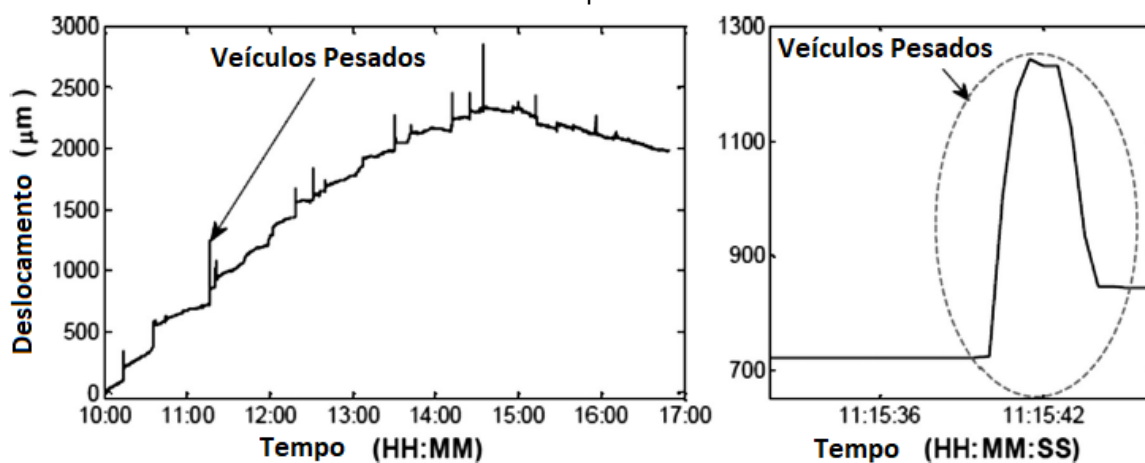
Em muitos casos parte das análises e tratamentos de dados são realizadas nos próprios *softwares* descritos no item anterior. Contudo, avaliações mais específicas necessitam de aplicações não encontradas nestes *softwares*.

Um tratamento de dados deve possuir ferramentas e recursos para visualização e manipulação estatística, de fácil manuseio, para possibilitar uma visão preliminar e confiável do monitoramento estrutural, para que posteriormente sejam feitas interpretações e análises em informações coerentes e criteriosamente processadas (ASSIS, 2007).

Lorenzoni *et al.* (2016) destacam em seu trabalho de monitoramento de integridade estrutural, o uso de ferramentas estatísticas nos dados coletados, com a finalidade de filtragem dos efeitos ambientais, visando a redução de incertezas nas estimativas, bem como no auxílio à detecção de dados estruturais.

No caso do monitoramento de pontes, não somente as cargas externas influenciam no comportamento da estrutura. Os fatores ambientais, que em muitos casos variam diariamente ou sazonalmente, deixam sua marca fortemente registrada na resposta estrutural, como no caso da Figura 60 (SOHN; WORDEN; FARRAR, 2002 *apud* KROMANIS; KRIPAKARAN, 2017).

Figura 60. Ponte sobre o Rio Exe: histórico de tempo do movimento horizontal da viga de aço na junta de expansão



Fonte: adaptado de Kromanis e Kripakaran (2017)

Em muitos casos, as análises de monitoramento de integridade estrutural consistem em comparar os resultados experimentais com modelos analíticos e modelos numéricos, relativos ao comportamento estrutural. Em um monitoramento realizado nas pontes da Ferrovia Carajás, Veloso (2016) destaca que a avaliação da integridade e segurança estrutural das pontes e viadutos necessita da realização de uma análise assistida por computador, em etapa subsequente ao pós-processamento dos dados adquiridos.

A elaboração de um modelo numérico prévio à realização da análise experimental possibilita identificar no comportamento estrutural as grandezas mais relevantes, sua localização e amplitude, o que colabora com definições para realização do procedimento experimental. Esta definição dos tipos de abordagens (estáticas ou dinâmicas) e periodicidade, permite definir o tipo de sistema de monitoramento a ser realizado (SANTOS, 2014).

A exemplo do monitoramento de pontes, um dos grandes desafios deste processo de detecção da integridade estrutural está em relacionar os dados coletados com o desempenho da estrutura, uma vez que o histórico de dados coletados em forma de sinais pode apresentar ruídos, em virtude das características dos sensores, ou até mesmo decorrentes do mal funcionamento dos mesmos e problemas com a aquisição de dados (KROMANIS; KRIPAKARAN, 2017), o que em muitas vezes torna necessária a aplicação de alguma ferramenta estatística.

No tratamento de resultados, são implementados modelos estatísticos, com filtros, capazes de reduzir ruídos e tratar sinais, que, com o auxílio de algoritmos, possibilita estabelecer correlações nos resultados e decomposição de sinais, visando facilitar a análise e entendimento sobre a integridade estrutural (STRAUSS, 2004 *apud* ASSIS, 2007).

Aos sinais elétricos, cabe classificá-los como de energia ou de potência, sendo que o primeiro tem potência média igual a zero, enquanto que o segundo possui energia infinita, contudo com uma potência média finita, como é o caso dos ruídos. Conseqüentemente aos ruídos está associada a grandeza densidade espectral de potência $S_x(\omega)$ (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). O ruído é definido como sendo uma “Porção indesejada ou interferência em um sinal.” (SCHULER, 2013).

Essa interferência provocada no sinal, na forma de ruído, é puramente aleatória, impedindo que seu valor seja determinado instantaneamente, o que limita a exatidão do sistema de instrumentação (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

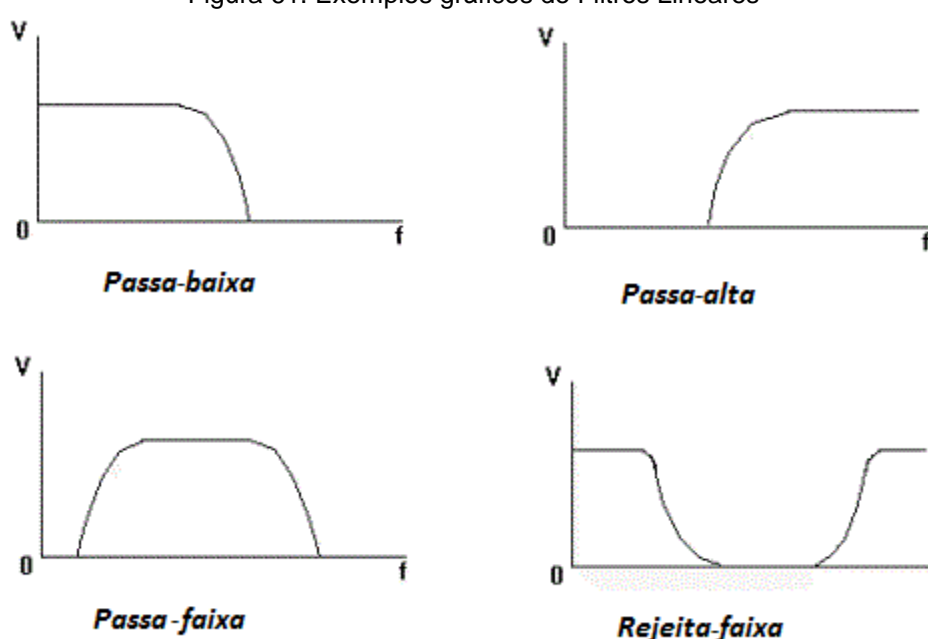
Os ruídos têm sua origem no próprio circuito ou na transmissão do sinal, cabendo assim ao projeto de instrumentação, reduzir o ruído a níveis adequados, promovendo medidas mitigadoras como por exemplo a blindagem de cabos, utilização de aterramentos, uso de componentes e fontes de alimentação adequados ao projeto (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

A redução de ruídos em sinais, também pode ser feita por tratamento matemático, mediante a utilização filtros estatísticos, como por exemplo, Kalman,

Savitzky-Golay e até mesmo Média Móvel, os quais já foram utilizados no processamento de dados de Monitoramentos de Integridade Estrutural de diversos experimentos (ASSIS, 2007; GULAL, 2013; SILVA, 2015).

Outras manipulações matemáticas de sinais, tais como Filtros Lineares, da Figura 61 (filtro passa-baixa, filtro passa-alta, filtro passa-faixa, filtro rejeita-faixa e filtro passa-tudo), Análise de Fourier, Transformada de Laplace e Transformada “Z” (MELO, 2011), também podem ser utilizadas para minimização de ruídos, ou tão somente para remoção de frequências indesejadas, de forma seletiva.

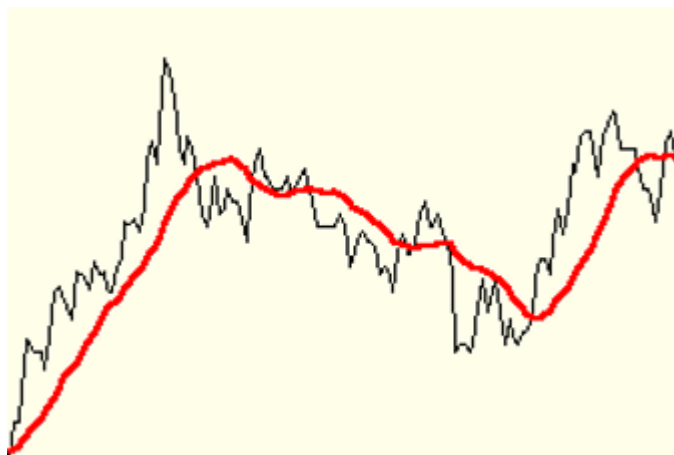
Figura 61. Exemplos gráficos de Filtros Lineares



Fonte: adaptado de http://www.hobbyprojects.com/general_theory/images/filter3.gif

O Filtro de Média Móvel (Figura 62) pode ser uma das formas utilizadas para reduzir os efeitos dos ruídos nas leituras, bem como suavizar as medidas coletadas (KROMANIS; KRIPAKARAN, 2017). O princípio do Filtro de Média Móvel é fracionar o sinal em vários intervalos com a mesma extensão, sequencialmente, ponto a ponto e a partir disto utilizar o valor médio do intervalo, para substituir o valor do ponto central, tornando simples o seu funcionamento (ASSIS, 2007).

Figura 62. Exemplo gráfico de aplicação de Média Móvel (em vermelho)



Fonte: adaptado de <https://www.fourmilab.ch/hackdiet/www/figures/figure627.gif>

Como outra opção bastante utilizada para tratamento de sinais, o Filtro de Savitzky-Golay, emprega um ajuste de pontos de um dado intervalo, com a utilização de um polinômio, diferentemente da média móvel, que utiliza uma simples média de um intervalo de pontos (SAVITZKY; GOLAY, 1964 *apud* ASSIS, 2007).

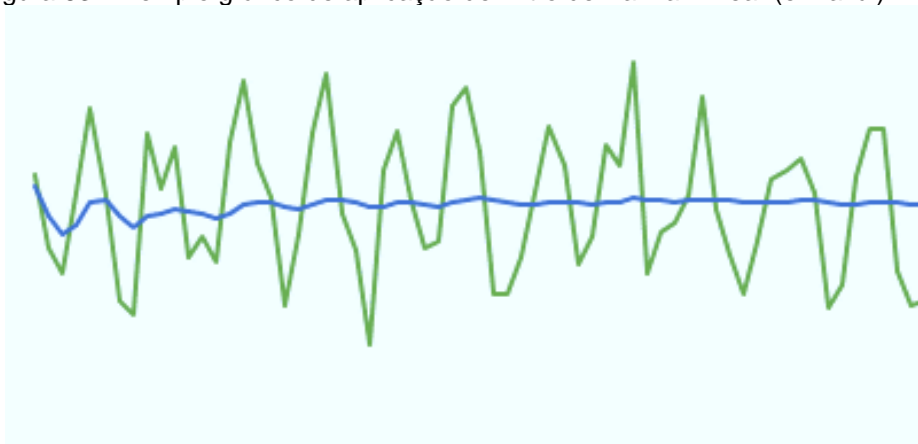
Com esta característica, o Filtro de Savitzky-Golay, possibilita a obtenção de melhores resultados, do que os obtidos com Média Móvel, quando se tratar de sinais com picos estreitos (MELLO, 1998 *apud* ASSIS, 2007).

Já o Filtro de Kalman (KF), tendo sua primeira versão elaborada em 1960 por *Rudolf Emil Kálmán*, que apresentou um modelo para solucionar problemas de filtragem linear de dados discretos, para melhorar a estimativa do estado dos sistemas complexos, vem sendo alvo de muitas pesquisas e aplicações, especialmente devido ao avanço da computação (GULAL, 2013).

Teixeira, Tôrres e Aguirre (2010) esclarecem que o Filtro de Kalman é baseado em um modelo matemático e as medições consideradas como informações incertas. Para utilização deste Filtro é necessária a garantia de linearidade e Gaussianidade, caso contrário sua utilização não é possível em sistemas não-lineares.

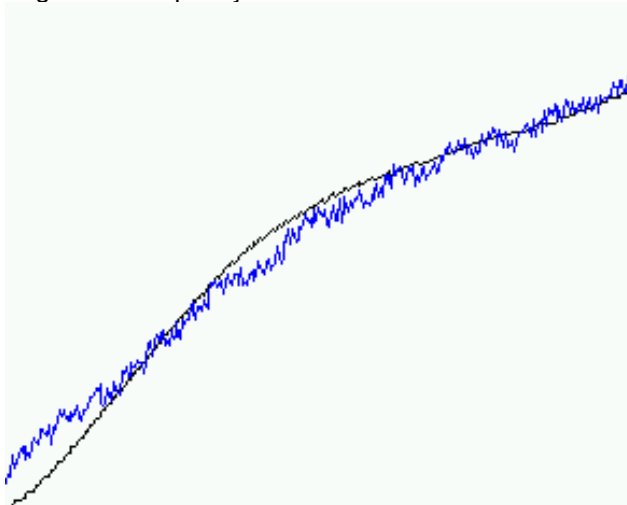
A Figura 63, mostra a leitura de sinais digitais de um potenciômetro, sem alteração de posição de seu cursor (sem variação de resistência), ou seja, a oscilação de valores nas leituras é em parte decorrente de ruídos, que são minimizados com a aplicação do Filtro de Kalman.

Figura 63. Exemplo gráfico de aplicação de Filtro de Kalman linear (em azul)



Contudo, o exemplo da Figura 63, trata de um caso de linearidade, sendo que nos casos de não-linearidade, deve ser avaliada a possibilidade de utilização do Filtro de Kalman Estendido (Figura 64), que é uma das soluções mais utilizadas para problemas não-lineares (TEIXEIRA; TÔRRES; AGUIRRE, 2010).

Figura 64. Exemplo gráfico de aplicação de Filtro de Kalman Estendido (em preto)



Fonte: adaptado de <http://www.mstarlabs.com/control/engspeed.html>

Por fim, Assis (2007) alerta que a utilização de qualquer filtro estatístico que seja, requer especial atenção as respostas obtidas, em relação ao sinal original, para que não se tenha perdas consideráveis de informações úteis, que venham comprometer a qualidade dos resultados.

2.2 Plataforma de Prototipagem Arduino

A plataforma Arduino é um sistema de *hardware* e *software* livres, de baixo custo, desenvolvida na Itália em 2005 por *Massimo Banzi* e *David Cuartielles*, visando possibilitar a criação de sistemas interativos. Com facilidade é possível utilizar sensores dos mais variados tipos e controlar dispositivos. Também é possível enviar e receber informações de outros sistemas eletrônicos (APÓSTOLO, 2015).

O Arduino pode ser compreendido como uma plataforma de prototipagem eletrônica de códigos abertos, utilizado atualmente numa enorme quantidade de projetos, onde o mesmo atua como protagonista, em aplicações que vão desde questões cotidianas até mesmo instrumentos científicos altamente complexos (ARDUINO, 2018).

Além da versatilidade nas criações e desenvolvimentos com a plataforma Arduino, o seu *hardware* é considerado de baixo custo, o que amplia suas possibilidades de aplicação (GALANTE; GARCIA, 2014; MCROBERTS, 2011; PINTO; DEGASPERI, 2015).

O custo de uma placa do modelo Arduino UNO, é por volta de US\$ 22,00 se comprada diretamente no site do fabricante na Itália, enquanto que no Brasil esta mesma placa é comercializada por aproximadamente US\$ 50,00. Contudo, os desenvolvedores da plataforma Arduino, licenciaram os *hardwares* por meio da licença *Creative Commons Attribution Share-Alike* (ARDUINO, 2018), o que permite que pessoas e empresas reproduzam a placa, sob determinadas condições, o que leva a comercialização de placas modelo UNO ao valor de aproximadamente US\$ 5,0, facilmente encontrada em *sites* na *Internet* (como Mercado Livre®).

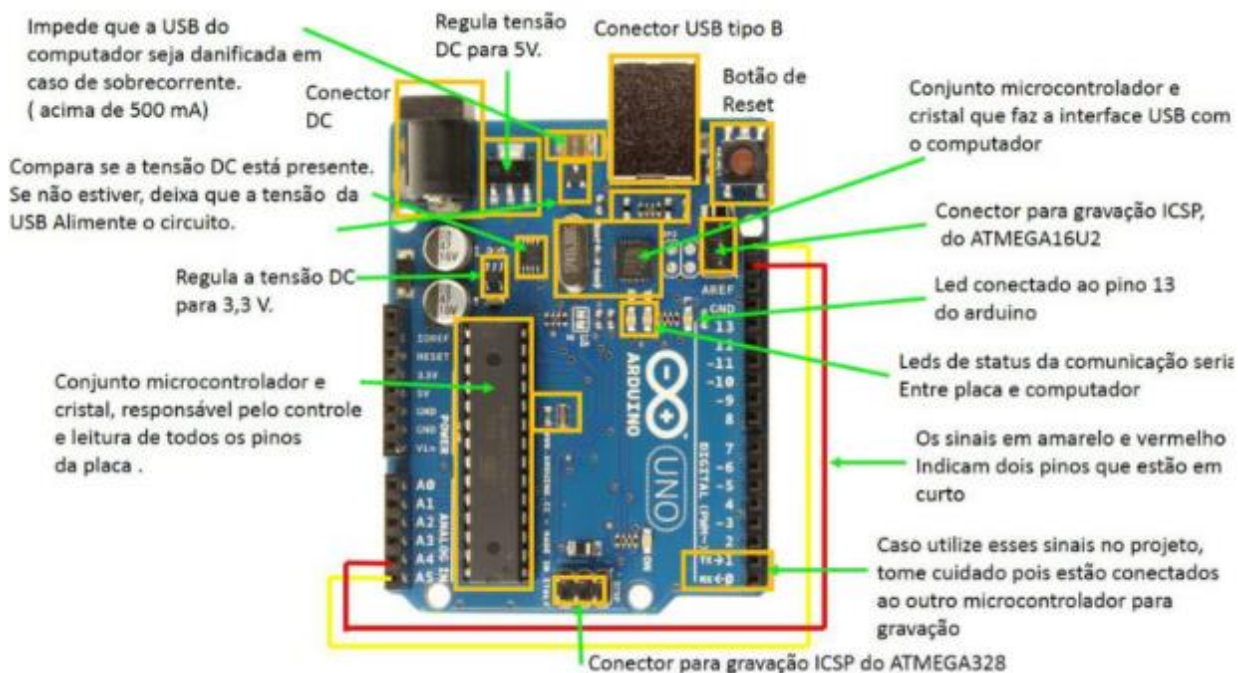
McRoberts (2011) destaca que *Arduino Project* consiste num pequeno computador, programável, onde é possível processar informações de entrada e saída entre os mais diversos dispositivos e componentes conectados a esta plataforma de prototipagem. Plataforma esta, composta por um *hardware* e *software* de computação física ou embarcada para interação com o ambiente.

O *hardware* do Arduino conta com um microcontrolador *Atmel*, sendo que existem outras plataformas de prototipagem eletrônica a exemplo do Galileo da Intel, os PICs da Microchip, o que permite seu uso para diversas aplicações, como por automação de projetos, desenvolvimento de sistemas de coleta de dados e até mesmo para aplicações didáticas (SILVEIRA, 2016).

O microcontrolador modelo ATMEGA328P-PU de 8 bits, possui 6 entradas/saídas analógicas e 14 entradas/saídas digitais. Destas, 6 são de sinal digital por modulação de largura de pulso, *PWM*, do inglês *Pulse Width Modulation*, o que permite obter resultados analógicos, por meios digitais, sendo que as entradas aceitam valores de tensão de até +5,5V (MCROBERTS, 2011; PETROCINO, 2015).

A placa Arduino *UNO* (Figura 65), possui um microcontrolador ATmega328, um oscilador de 16 MHz fundamentado num ressonador cerâmico, uma porta USB, soquete tipo *power jack* para alimentação, botão de *reset* e um *In Circuit Serial Programming* (ICSP) responsável pela gravação da programação no microcontrolador (APÓSTOLO, 2015), além de outros componentes eletrônicos.

Figura 65. Plataforma Arduino UNO



Fonte: Petrocino (2015)

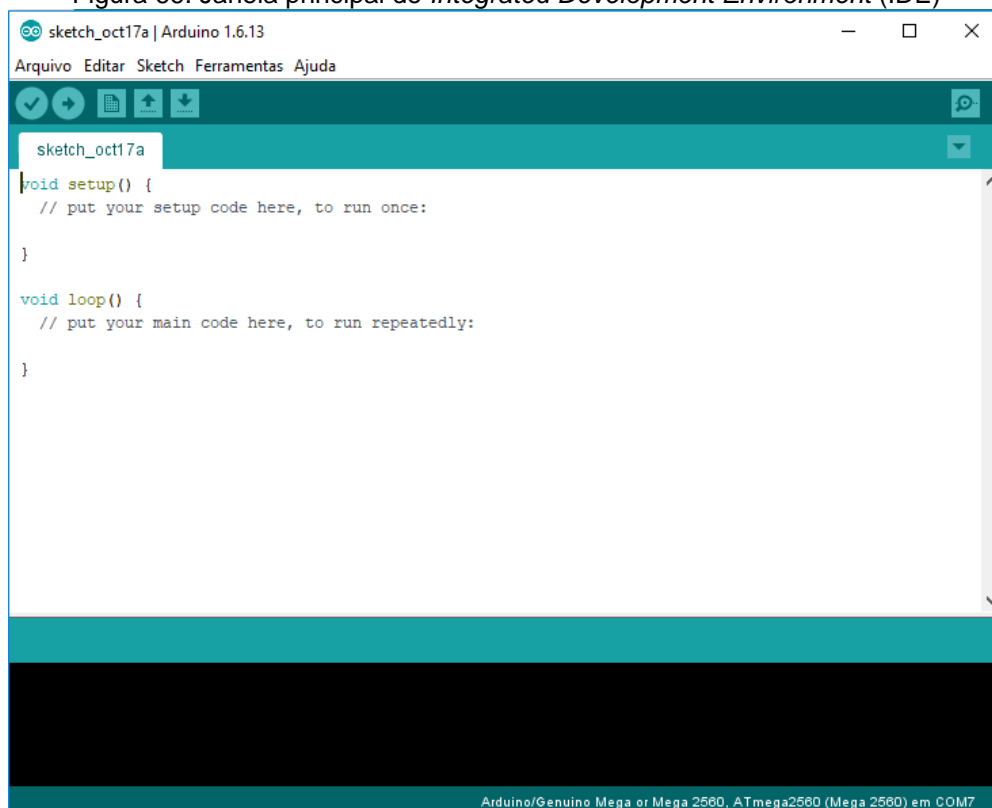
As entradas analógicas do Arduino *UNO*, dispõem de 1024 estados, que vão de 0V a 5V, possibilitando a escrita de uma palavra de 10 *bits*, o que corresponde a quantização de 4,9mV para cada *byte*, de maneira uniforme. Os pinos TX e RX e a porta USB, são os meios de conexão para comunicação, mediante utilização de um processo de comunicação serial UART TTL 5V ou I2C (PETROCINO, 2015).

A programação é feita em *software* específico, com uma linguagem proveniente da linguagem C/C++, sendo disponibilizada uma grande biblioteca de códigos que

auxiliam na comunicação com os mais variados sensores e dispositivos (PEREIRA; SANTOS; AMORIM, 2016).

A plataforma *Arduino* possui um compilador de código (Figura 66) *Integrated Development Environment (IDE)*, a partir de um *GNU Compiler Collection (GCC)*, baseado em *Wiring*, com uma interface gráfica desenvolvida em Java. O código desenvolvido pelo usuário no ambiente IDE, é enviado para a placa e gravado no microcontrolador, que passa a ser um *software* denominado *firmware* (APÓSTOLO, 2015).

Figura 66. Janela principal do *Integrated Development Environment (IDE)*



A estrutura de programação dentro da *IDE* é dividida em dois grandes itens, ou seja, o *void setup()* que corresponde às informações e instruções gerais para inicialização do software, executada somente uma vez, enquanto que no *void loop()*, constam todas as instruções que ocorrerão de forma continuada (MCROBERTS, 2011).

Existe uma divisão principal em três partes da programação para o *Arduino*: estrutura, valores (variáveis e constantes) e funções. As quais são subdivididas em (ARDUINO, 2017):

- Estrutura
 - Estruturas de Controle;
 - Sintaxe Adicional;
 - Operadores Aritméticos;
 - Operadores de Comparação;
 - Operadores Booleanos;
 - Operadores de Ponteiros de Acesso;
 - Operadores Bit-a-bit.

- Variáveis
 - Constantes;
 - Tipos de Dados;
 - Conversão;
 - Escopo Variável e Qualificadores;
 - Utilitários.

- Funções
 - E/S Digital;
 - E/S Analógica;
 - De uso simples;
 - E/S Avançada;
 - Tempo;
 - Matemáticas;
 - Trigonométricas;
 - Números aleatórios;
 - Bits e Bytes;
 - Interrupções externas;
 - Interrupções;
 - Comunicação;
 - USB.

O uso do recurso de bibliotecas na programação do Arduino, nada mais são que conjuntos de código destinados a dar maior funcionalidade ao projeto, sem a

necessidade de recriar algo, que em muitos casos está associada ao *hardwares* que podem ser conectados ao Arduino (MCROBERTS, 2011).

Por fim, a Plataforma Arduino atualmente conta com diversas placas além da Arduino *UNO*, tais como as placas: *MEGA*, *LEONARDO*, *101*, *ESPLORA*, *ZERO*, *DUE*, *MO*, *YÚN*, *ETHERNET*, *TIAN* e *MKR* (ARDUINO, 2017), cada uma com suas particularidades e especificidades.

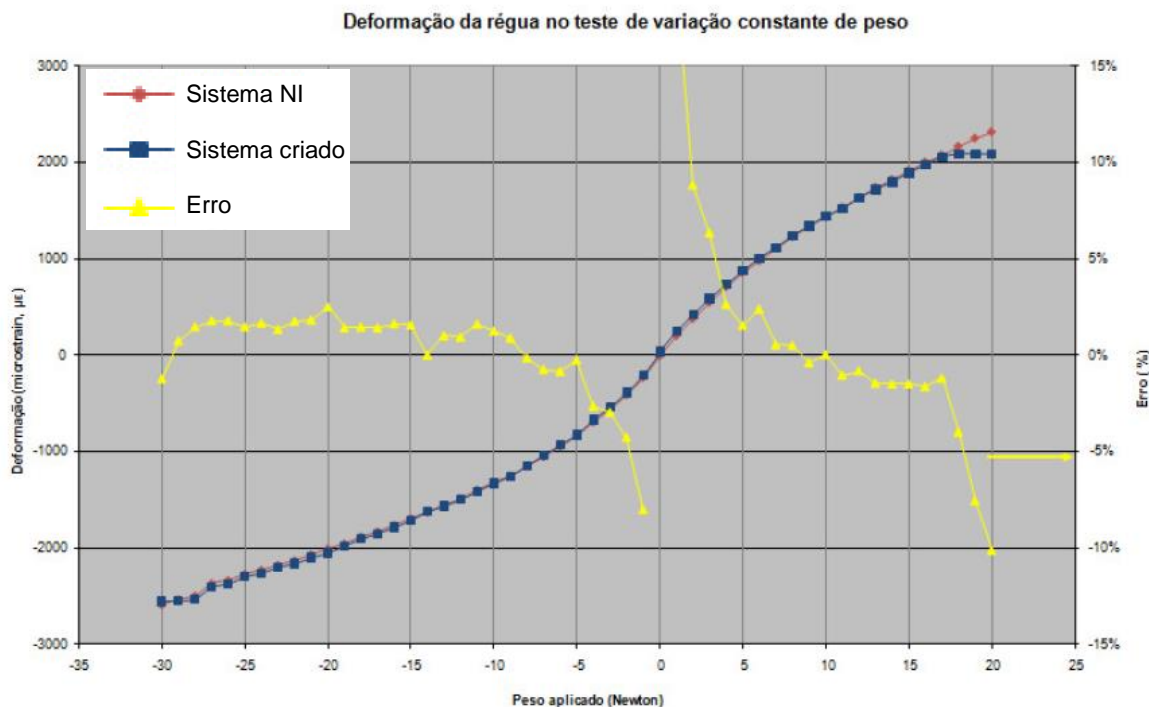
2.3 Sistemas Experimentais de Medição de Deformação e Deslocamento

Ao longo dos últimos anos, pesquisadores têm buscado desenvolver sistemas experimentais para medição de deformações e deslocamentos em estruturas, empregando microcontroladores de baixo custo, inclusive com a utilização da plataforma Arduino.

A seguir são apresentados resultados de algumas destas pesquisas publicadas nos últimos anos. Tais publicações foram selecionadas por utilizarem extensômetros ou transdutores de deslocamento, bem como por apresentarem resultados na forma de comparativos entre os sistemas desenvolvidos, *versus* sistemas comerciais e/ou parâmetros analíticos de deformação e deslocamento.

Dinis (2010) desenvolveu um sistema de aquisição de dados de deformações a partir de um Arduino modelo *Duemilanove*, tendo realizado ensaio de flexão em lâmina plástica, sendo que os resultados foram comparados com a aquisição de dados feita com um equipamento da fabricante *National Instruments*, o que resultou nas leituras do gráfico da Figura 67.

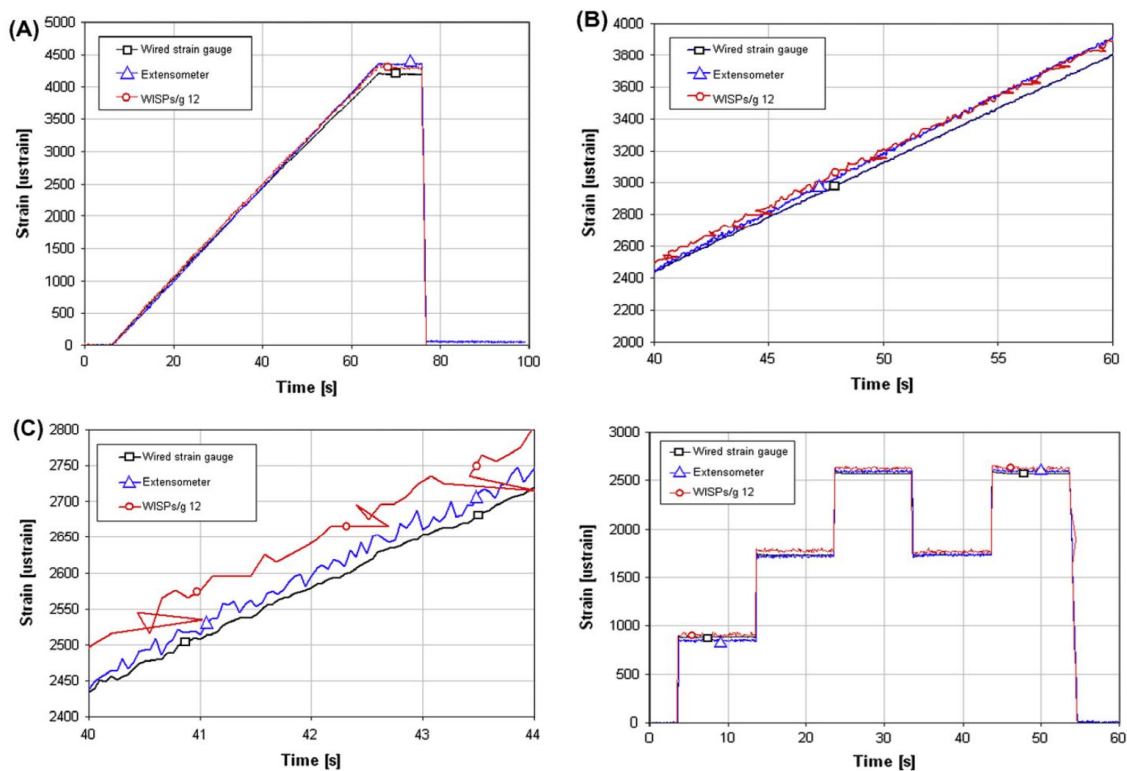
Figura 67. Leituras de Deformação e Erro Relativo



Fonte: Dinis (2010)

Gasco *et al.* (2011) desenvolveram um sistema a partir da utilização do microcontrolador *Intel WISP*, o qual teve as leituras de deformação comparadas a uma máquina de ensaios *Instron Universal* (aquisição com extensômetro convencional e um *clip-gage*), durante o ensaio de tração/compressão de uma lâmina de fibra de carbono, tendo obtido os resultados conforme gráficos da Figura 68. No caso das leituras “C” do “*WISPs/g 12*” da referida figura, observa-se provável inconsistência de dados, no que se refere a deformação *versus* tempo, visto que os valores de tempo (s) deveriam ser somente crescentes no referido gráfico.

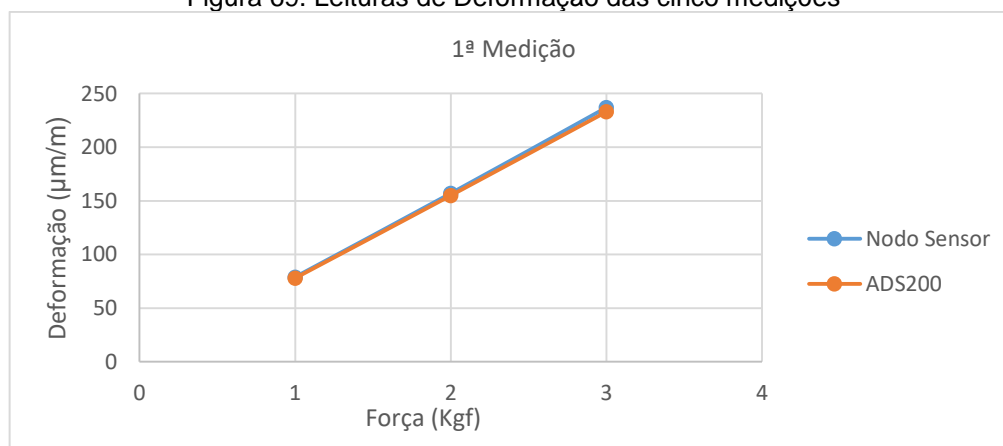
Figura 68. Leituras de Deformação “A”, “B” e “C”

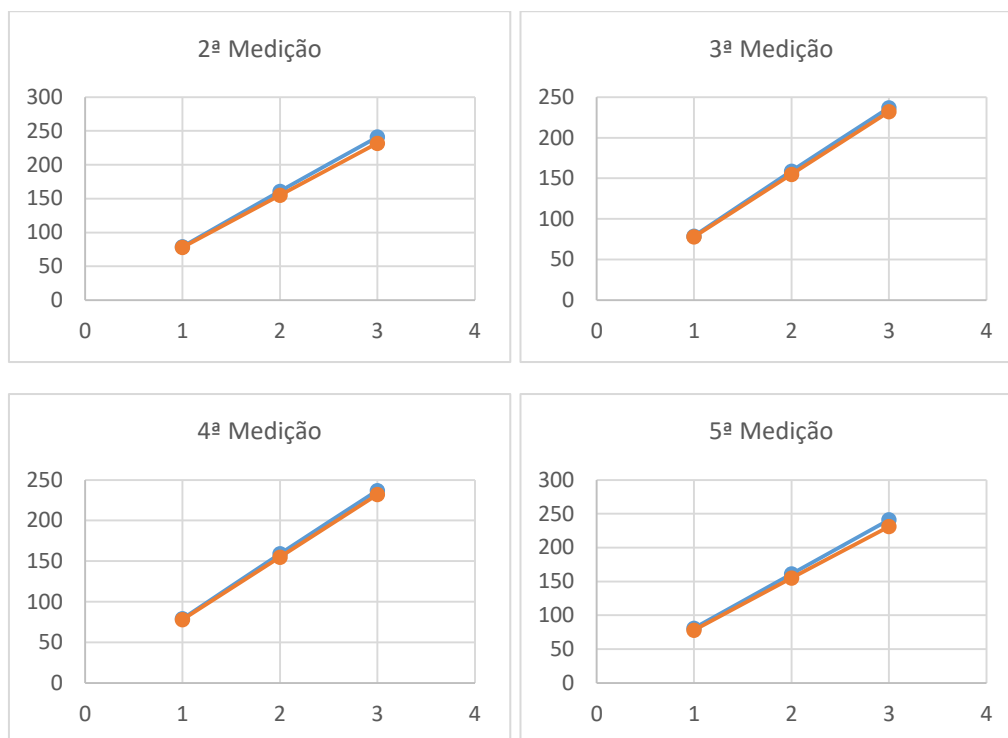


Fonte: Gasco *et al.* (2011)

Ataíde (2012) optou por desenvolver um sistema com a utilização do microcontrolador *ATmega128RFA1*, que foi comprado ao aquisitor de dados ADS2000 da fabricante Lynx, durante ensaio de flexão em lâmina metálica, com repetição de cinco medições, tendo obtido os resultados conforme gráficos da Figura 69.

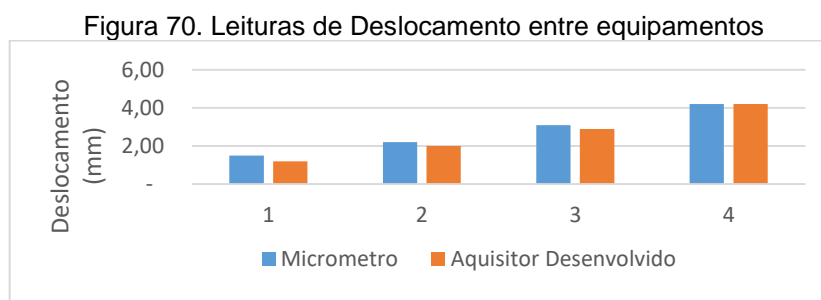
Figura 69. Leituras de Deformação das cinco medições





Fonte: extraído das Tabelas de leituras de Ataíde (2012)

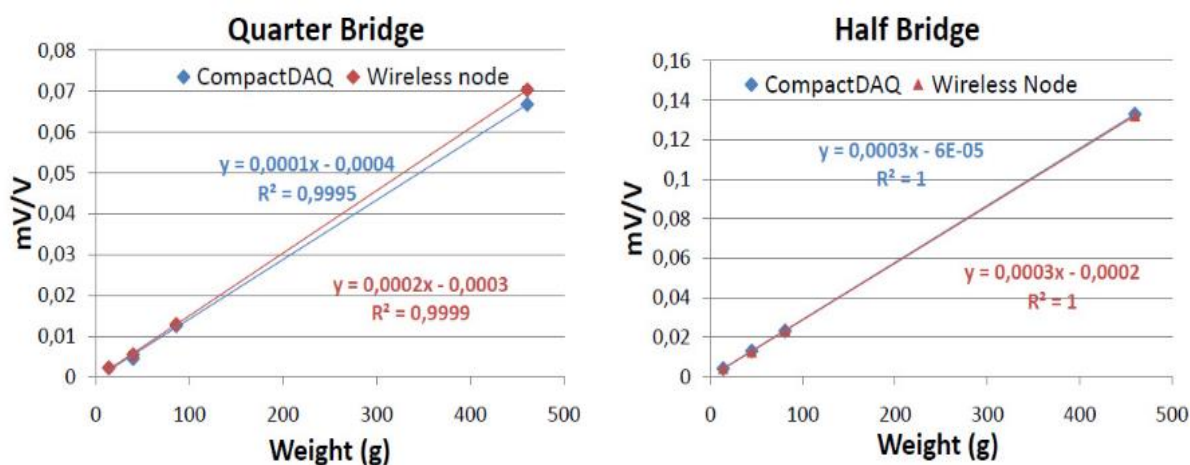
Silva e Assis (2012) mediram deformações a partir de uma placa de aquisição de dados, desenvolvida especificamente para a leitura de um extensômetro, que foi testada em uma lâmina metálica sob flexão, sendo que os dados de deformação foram transformados em deslocamento vertical, por meio de equações analíticas da Resistência dos Materiais e comparados a medição de deslocamento realizada por micrômetro digital, tendo obtido os dados do gráfico da Figura 70.



Fonte: extraído da Tabela de leitura de Silva; Assis (2012)

Herrasti *et al.* (2016) desenvolveram um sistema, que dentre outros tipos de sensores, efetua leituras de variação de tensão elétrica a partir de extensômetros. As leituras de variação de tensão elétrica do extensômetro, deste sistema desenvolvido, decorrentes da deformação de uma estrutura metálica, foram comparadas as lidas por um equipamento *National Instrument CompactDAQ*, conforme gráficos da Figura 71.

Figura 71. Leituras de variação de tensão elétrica decorrentes da deformação



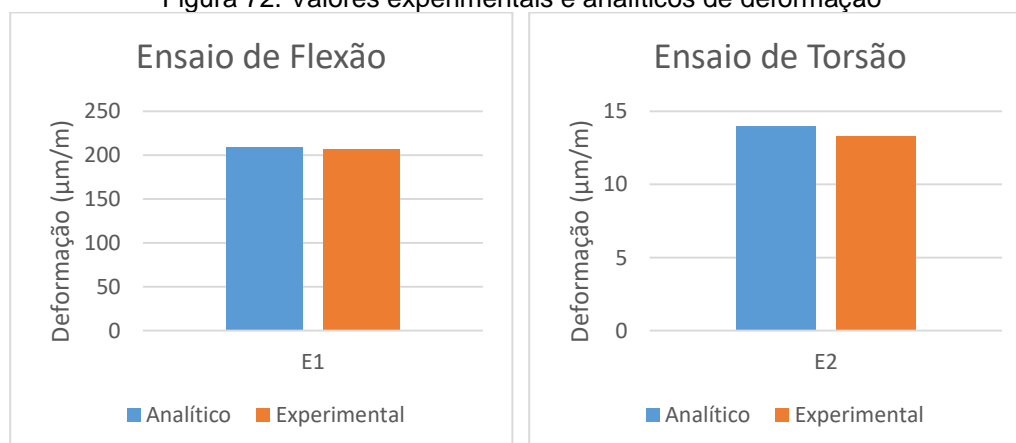
(a)

(b)

Fonte: Herrasti *et al.* (2016)

Silva, Varanis e Mereles (2017) utilizaram um Arduino modelo MEGA, associado a uma placa ADS1230 para amplificação dos sinais, bem como uma conversão AD numa resolução de 20 *bits*, conectada a um extensômetro. Esta combinação foi testada em um ensaio de flexão em lâmina metálica e em outro ensaio de torção de um eixo metálico, onde as leituras aquisitadas foram comparadas com valores analíticos, conforme gráficos da Figura 72.

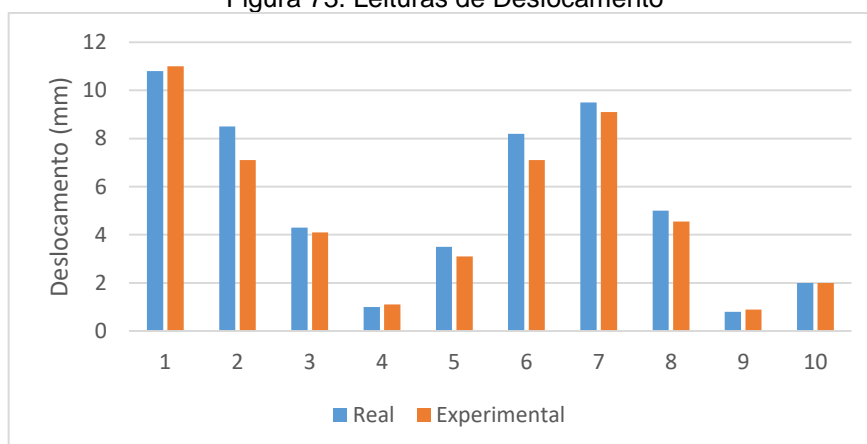
Figura 72. Valores experimentais e analíticos de deformação



Fonte: extraído da Tabela de leitura de Silva; Varanis; Mereles (2017)

Nasreen, Rokunuzzaman e Biswas (2017) construíram um transdutor de deslocamento do tipo LVDT, com um sistema de aquisição de dados utilizando um microcontrolador modelo *ATmega8*, o qual teve seu código compilado por meio de um Arduino UNO. Tal sistema foi utilizado para medição de ondulações e rugosidades em superfícies de madeira, tendo os autores, obtido os valores de leituras de acordo com o gráfico da Figura 73.

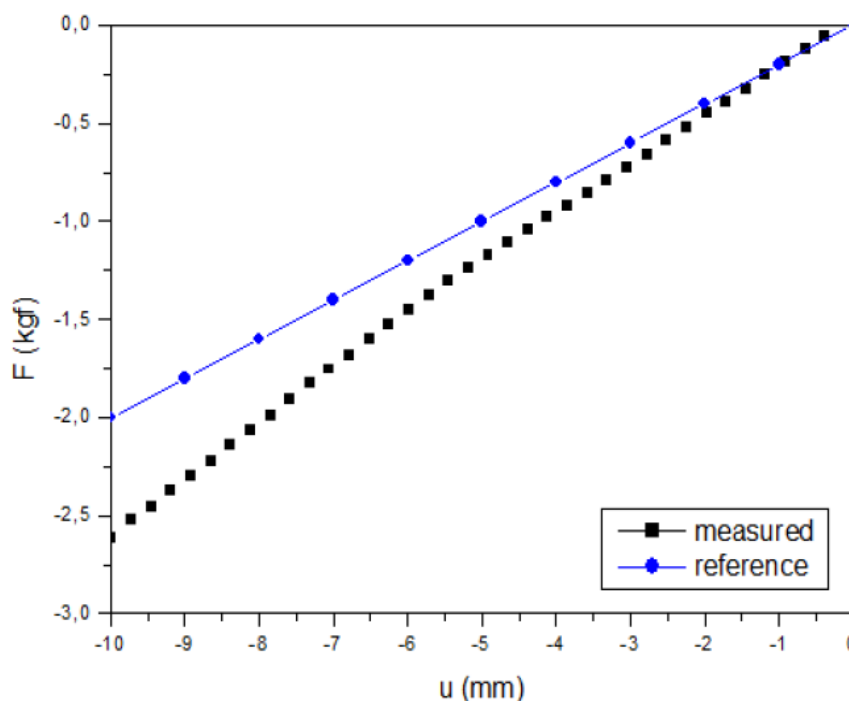
Figura 73. Leituras de Deslocamento



Fonte: extraído da Tabela de leitura de Nasreen; Rokunuzzaman; Biswas (2017)

Kenedi e Alvarães (2017) realizaram leituras de deslocamento com um transdutor adaptado a um multímetro, em comparação a um sistema de aquisição de dados composto por um transdutor de deslocamento potenciométrico conectado a um aquisitor *Spider 8* da fabricante HBM, tendo obtido os resultados apresentados no gráfico da Figura 74.

Figura 74. Leituras de Deslocamento



Fonte: Kenedi; Alvarães (2017)

A seguir, a Tabela 1 consolida as principais características de cada uma destas pesquisas, em função dos itens mais relevantes para esta dissertação.

Tabela 1. Resumo de características das pesquisas

Id	Autor(es)	Tipo de Grandeza	Utilizou Arduino?	Resultado comparados com?	Desenvolveu software?	Sem fio?	% de Erro Relativo
1	(DINIS, 2010)	Deformação	Sim	National Instruments DAQ	Sim (LabVIEW)	Não	2,5 a 10,0
2	(GASCO et al., 2011)	Deformação	Não	Instron Universal DAQ	Sim	Sim	1,73* a 3,18*
3	(ATAÍDE, 2012)	Deformação	Não	ADS200 Lynx DAQ	Sim	Sim	1,28 a 4,32
4	(SILVA; ASSIS, 2012)	Deslocamento	Não	Micrômetro	Sim (LabVIEW)	Não	6,45 a 20,0
5	(HERRASTI et al., 2016)	Deformação	Não	National Instruments DAQ	Não	Sim	4,79* a 56,52*
6	(SILVA; VARANIS; MERELES, 2017)	Deformação	Sim	Analítico	Não	Não	0,73 a 5,14
7	(NASREEN ; ROKUNUZ ZAMAN; BISWAS, 2017)	Deslocamento	Sim	Real ¹	Não	Não	0 a 19,72
8	(KENEDI; ALVARÃES, 2017)	Deslocamento	Não	HBM Spider 8 DAQ	Não	Não	12,01* a 27,07*

*Valores extraídos a partir de análise dos gráficos com auxílio do software AutoCAD;

¹Autores não especificaram como as medidas de referência foram obtidas.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para melhor compreensão da estrutura da proposta experimental desta pesquisa, as etapas foram dispostas em forma de tópicos. A saber:

- Teste com o amplificador de sinais HX711;
- Desenvolvimento do protótipo do sistema de monitoramento remoto;
 - *Hardware*: placa conectada ao Arduino;
 - *Software*: aplicativo *mobile* para *smartphone* e *tablet*;
- Ensaio de lâmina metálica;
- Ensaio de protótipos de vigas de concreto armado;
- Ensaio de um pilar de concreto armado.

3.1 Amplificador de Sinais HX711

Conforme descrito na Revisão Bibliográfica, o monitoramento de deformações em estruturas, necessita de um amplificador de sinais, uma vez que no caso das deformações, estas grandezas são relativamente pequenas, quando transformadas em variações de sinais elétricos.

A pesquisa para seleção de amplificadores de sinais considerou a existência de amplificadores já utilizados com a plataforma Arduino, porém empregados em células de carga, as quais possuem extensômetros de resistência elétrica, usualmente aplicadas em sistemas de balanças digitais, o que resultou na escolha do módulo HX711.

Inicialmente o módulo HX711 foi testado em ensaios de flexão simples (Figura 75) em lâmina metálica de (aço A36) com a instalação de extensômetro unidirecional.

Os valores experimentais foram comparados com os valores analíticos de deformação específica (ε), determinados com auxílio das equações 69 a 73, referentes a Momento de Inércia (I), Momento Fletor (M), posição da fibra mais distante (y) e Tensão Normal de Flexão (σ).

$$I = \frac{bH^3}{12} \quad (69)$$

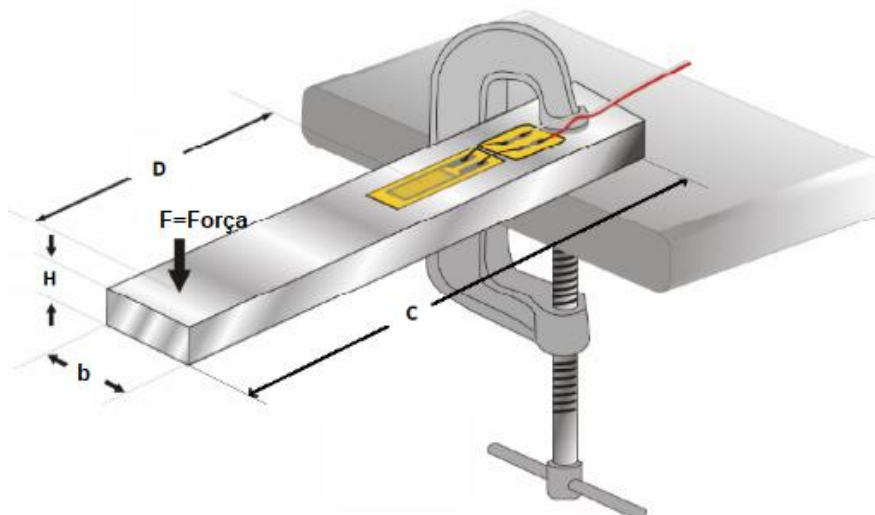
$$M = FD \quad (70)$$

$$y = \frac{H}{2} \quad (71)$$

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (72)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (73)$$

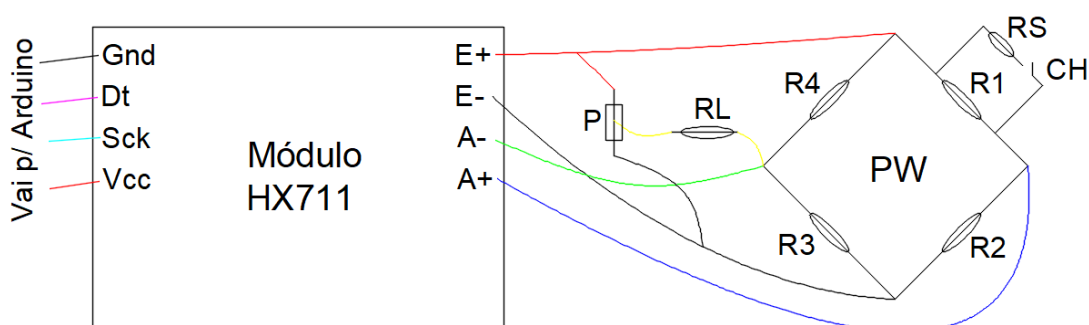
Figura 75. Esquema de ensaio a flexão simples de lâmina engastada



Fonte: adaptado de Paulino (2011)

A utilização do módulo (HX711) também implicou na construção de um circuito, tipo Ponte de *Wheatstone* (PW), conforme Figura 76, conectada ao módulo amplificador. A PW foi composta por 3 resistores (R2, R3 e R4) de 120,0 Ω (Precisão 1,0%), sendo a mesma regulável por meio de um potenciômetro (P) analógico (multivoltas de 10k Ω) e um resistor limitador (RL) de 1k Ω , bem como com a implementação de um sistema de calibração indireta por meio do resistor *shunt* (RS) de 75k Ω (valor medido com multímetro de 78,5k Ω), acionado por uma chave (CH), sendo esta feita com um fotoacoplador (4N25, tipo CI-DIP). Já o resistor R1 refere-se ao extensômetro instalado na lâmina metálica, com ligação a três fios.

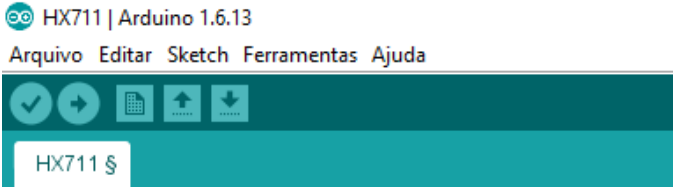
Figura 76. Esquema de ligação do canal A do módulo HX711



O potenciômetro, seja ele digital ou analógico, tem a função de promover ajustes de balanceamento na Ponte *Wheatstone*, para que por exemplo, a leitura inicial seja ajustada para zero. A medida que o valor da resistência do potenciômetro é alterado, o valor das resistências nos trechos de R3 e R4, também são alterados, conseqüentemente, provocando alteração na tensão (V) de saída da Ponte.

A programação do Arduino, via IDE, se deu com o código conforme Figura 77, adaptado da biblioteca do módulo HX711.

Figura 77. IDE Arduino com *firmware* para módulo HX711 e fotoacoplador



```

HX711 | Arduino 1.6.13
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

HX711 $
#include <HX711.h>
int porta_call = 7;
HX711 ampl(A0, A1);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(porta_call, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_call, LOW);
}

void loop() {
  delay(100);
  Serial.println(amp1.read());

  char teclado;
  teclado = Serial.read();
  if(teclado == 'D')
  {
    digitalWrite(porta_call, LOW);
  }
else
  if(teclado == 'L')
  {
    digitalWrite(porta_call, HIGH);
  }
}

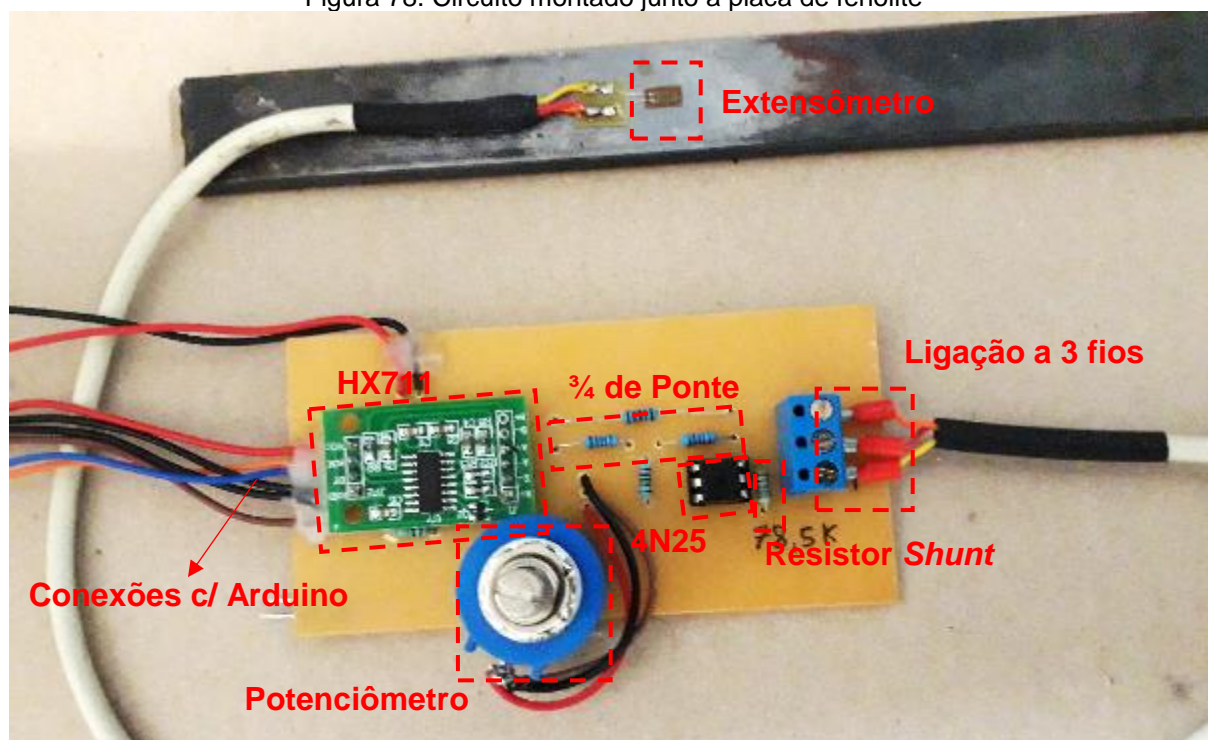
```

Leituras dos valores obtidos pelo módulo HX711.

Acionamento (L=ligar e D=desligar), do fotoacoplador (4N25), para calibração via resistor *shunt*.

Após testes preliminares com o circuito junto à *protoboard*, o mesmo foi produzido em uma placa fenolite (Figura 78), com todos os componentes devidamente soldados.

Figura 78. Circuito montado junto a placa de fenolite



Para este módulo, os testes foram realizados em uma lâmina com medidas de 22,22mm x 4,76mm x 490,0mm (L x H x C), com a instalação do extensômetro uniaxial de resistência 120Ω (BX120-3AA), distado (D) a aproximadamente 380,0mm do ponto de aplicação de carga. Tal lâmina, recebeu a denominação de Lâmina n.º 1.

Foi realizada a aplicação de cargas consecutivas, nos valores de 6,37N, 11,27N, 16,66N, 21,56N, 26,95N e 39,69N, sendo que os valores de deformação, calculados com base nos valores digitais fornecidos pelo amplificador, foram convertidos em microdeformação ($\mu m/m$), após calibração do sistema, com os cálculos realizados por meio de planilha do *MSEXce*®. Não foi empregada nenhuma técnica para compensação das deformações eventualmente ocorridas em função da alteração de temperatura, visto que as medições foram de curta duração, ou seja, realizadas em poucos segundos.

Os resultados destes ensaios, também foram comparados com valores de deformação específica, determinados analiticamente e com dados experimentais coletados por meio do equipamento comercial de referência *QuantumX-MX840* da fabricante HBM®.

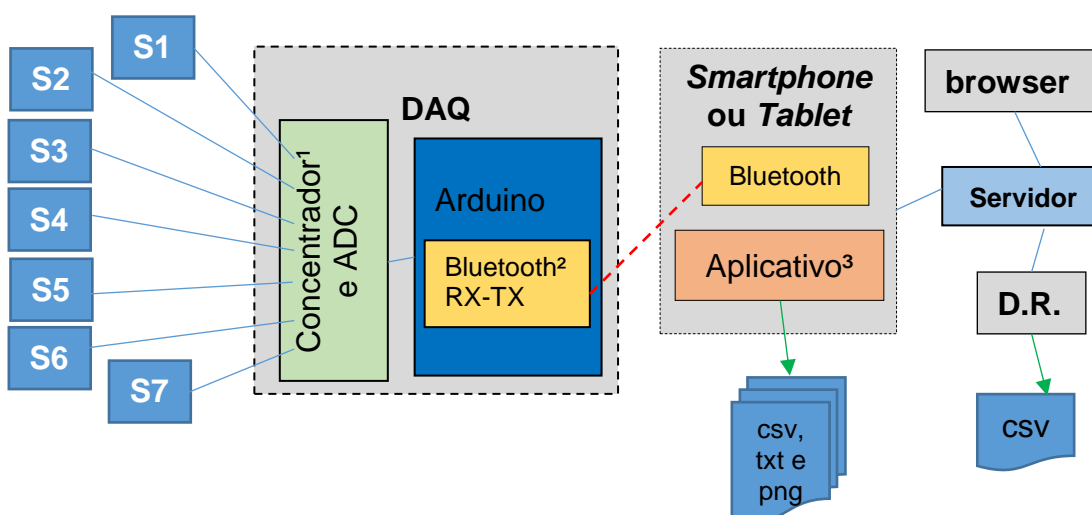
3.2 Protótipo do Sistema de Monitoramento Remoto

Após resultados obtidos com os testes descritos nos itens 3.1, desenvolveu-se um protótipo do Sistema de Monitoramento Remoto de Estruturas, objetivo desta pesquisa, conforme descrição a seguir, o qual recebeu a denominação simbólica de “ ϵ -structure” (a letra “ ϵ ” neste caso faz uma referência tanto a “deformação específica” usualmente representada pela mesma, quanto a palavra “*electronic*”, por se tratar de um sistema automatizado de monitoramento).

Neste sistema, composto de *hardware* e *software* (Figura 79) foram empregados múltiplos canais de leituras de sinais, para utilização de extensômetros de resistência elétrica, com ligações em $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte e ponte completa, bem como para utilização de células de carga (ponte completa) e transdutor potenciométrico de deslocamento.

No protótipo em questão foram projetados 4 canais com pontes de $\frac{1}{4}$, 1 canal com $\frac{1}{2}$ ponte e 1 canal para ponte completa. A maior quantidade de canais para ligações de $\frac{1}{4}$, foi feita para que seja possível a ligação de extensômetros tipo rosetas.

Figura 79. Estrutura de funcionamento do sistema de monitoramento “ ϵ -structure”



Legenda:

Sn sensores (de 1 a 7)

DAQ *data acquisition system*

¹ Pontes de Wheatstone, Módulos HX711 (amplificador e conversor AD)

² Módulo Bluetooth HC-05 (transmissor e receptor)

Sn sensores (de 1 a 7)

³ Aplicativo e Gateway

Servidor na *Internet*

----- Transmissão *wireless*

D.R. Dispositivo Remoto (*smartphone* ou *tablet*)

csv comma separated values

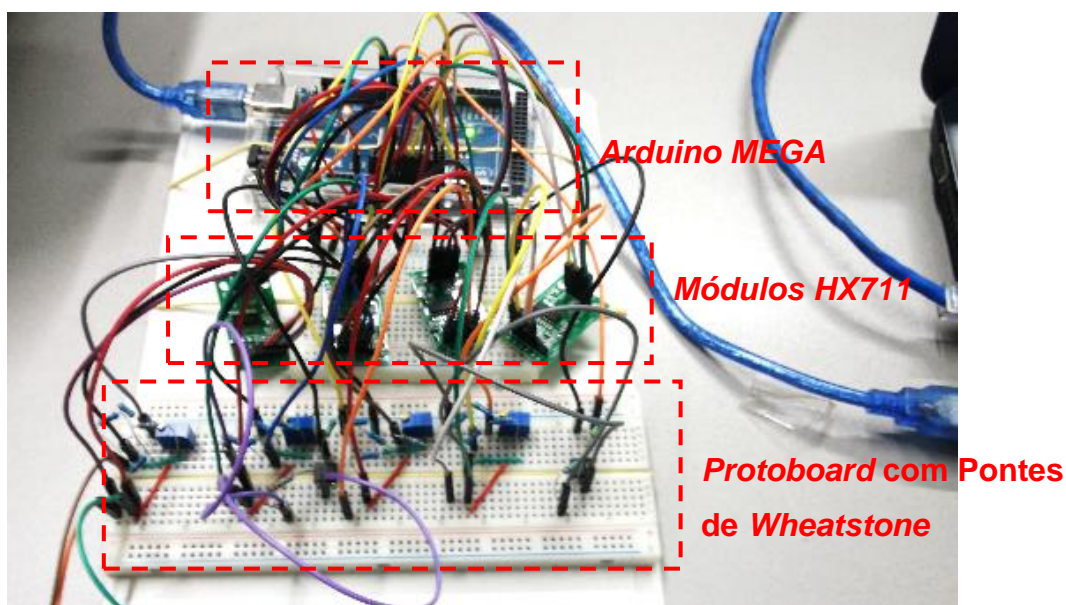
txt arquivo de texto padrão *ASCII*

png Portable Network Graphics

O sistema foi desenvolvido de forma a ser compatível com o Arduino modelo MEGA, uma vez que este dispõe de maior quantidade de pinos analógicos e digitais, colaborando com a utilização de múltiplos canais.

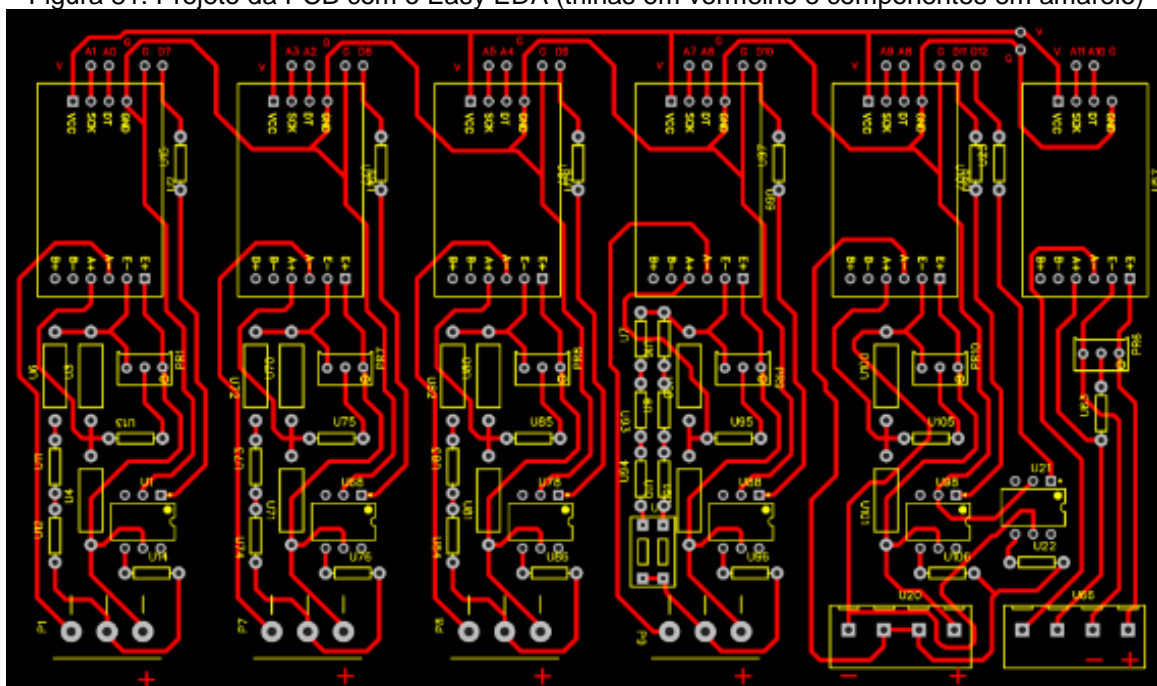
Inicialmente os módulos HX711 foram conectados ao Arduino MEGA, com auxílio de cabos *jumpers* e respectivas Pontes de *Wheatstone* (constituídas por resistores, *jumpers* e potenciômetros) por meio de *protoboards* (Figura 80), visando a realização de prova de conceito, para que o projeto da placa de circuitos em fenolite fosse desenvolvido na sequência.

Figura 80. Arduino MEGA conectado aos circuitos



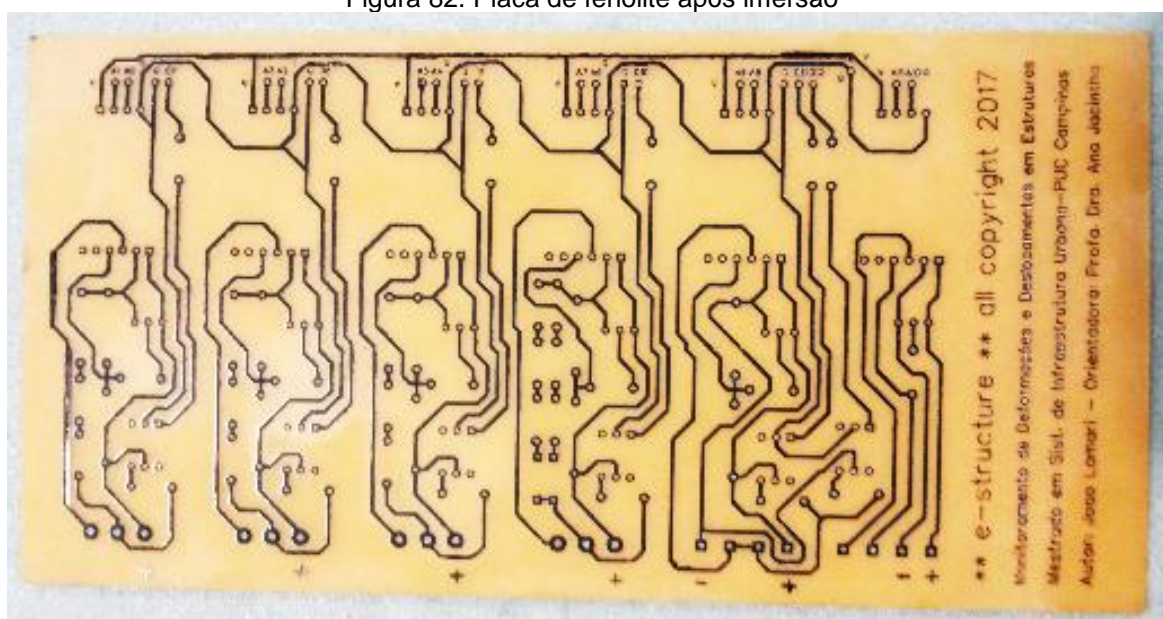
O projeto do circuito foi desenvolvido por meio da plataforma web *Easy EDA* (<https://easyeda.com/>) utilizada para desenhos de circuitos impressos PCB do inglês *Printed Circuit Board*, resultando no projeto da Figura 81.

Figura 81. Projeto da PCB com o Easy EDA (trilhas em vermelho e componentes em amarelo)



As trilhas (em vermelho) da Figura 81 foram impressas (impressora laser) em modo espelho, num papel fotográfico e transferidas a quente (prensa de estampagem) para placa de fenolite cobreada, que após imersão em perclorato de ferro (solução 42,0 %), resultou na placa apresentada na Figura 82.

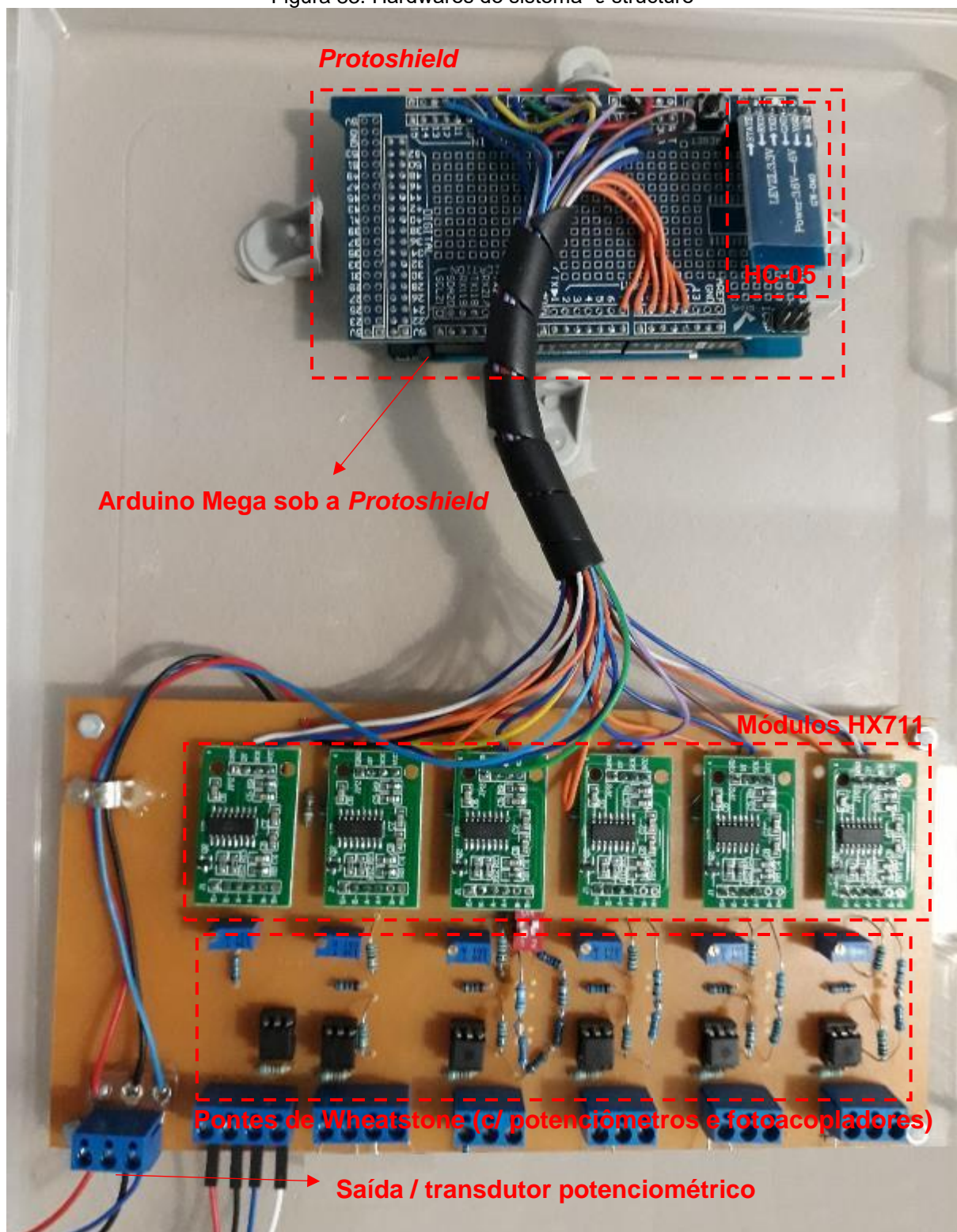
Figura 82. Placa de fenolite após imersão



Após furação dos pontos de instalação dos componentes eletrônicos, os mesmos foram soldados com estanho na placa. Esta placa foi fixada em uma caixa

plástica protetora, conectada a um *protoshield* que por sua vez foi conectado ao Arduino MEGA, bem como um módulo de comunicação *Bluetooth* HC-05, conforme Figura 83.

Figura 83. Hardwares do sistema “ ϵ -structure”



O referido módulo de comunicação *Bluetooth*, é capaz de efetuar transmissões de sinais de forma bidirecional, ou seja, enviar e receber sinais, via comunicação serial, pelas portas dos pinos RX e TX do Arduino.

Os principais materiais empregados na construção do *hardware*, tiveram o custo de aproximadamente US\$ 89,00, incluindo o Arduino MEGA, conforme descrição resumida constante da Tabela 2.

Tabela 2. Custos Estimados para construção do *hardware* DAQ

Descrição dos itens	US\$ Unit	Quant.	US\$ Total
Arduino Mega 2560 - R3 ¹ ²	35,0	1	35
Protoshield para Arduino Mega ¹	5,0	1	5
Modulo Bluetooth HC-05 ¹	8,0	1	8
Modulo Amplificador HX711 ¹	3,5	6	21
Outros componentes eletrônicos (resistor, terminal, fios, soldas, conector, placa de fenolite, interruptores, potenciômetros e fotoacoplador) ³			20,0
Total			89,0

¹Custo praticados nos valores baseados no site Amazon.com em julho/2018 (taxas e fretes não inclusos); ²Foi considerado uma placa Arduino original, porém com a placa clone o custo da mesma seria de aproximadamente US\$ 10,0; ³Custo Estimado; Mão-de-obra não inclusa.

Por meio do *Integrated Development Environment* (IDE), o Arduino foi programado com o *firmware* (Figura 84), onde foi preparada a aquisição de dados dos canais, como o envio das leituras pela porta *serial1* para o modulo HC-05 *Bluetooth*. Também foram programados os fotoacopladores para acionamento dos resistores *shunt*.

O processamento dos dados e controle do *hardware* foi feito em um aplicativo (*software*) desenvolvido para sistemas operacionais *Android*, para instalação em dispositivos móveis (*smartphones* e *tablets*).

A comunicação entre o Arduino e o dispositivo móvel foi feita via *Bluetooth*, tanto para enviar quando para receber dados por meio da porta *serial* (neste caso *serial1*).

Figura 84. Código (sequência: parte “a” e parte “b”) do “ε-structure” implementado no Arduino

(a) Início

```

e-structure | Arduino 1.6.13
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

e-structure
// e-structure
const int Deslocamento = A12;
int leituraA12;

#include <HX711.h>
int porta_cal1 = 7;
int porta_cal2 = 8;
int porta_cal3 = 9;
int porta_cal4 = 10;
int porta_cal5 = 11;
int porta_cal6 = 12;
HX711 amp1(A0, A1);
HX711 amp2(A2, A3);
HX711 amp3(A4, A5);
HX711 amp4(A6, A7);
HX711 amp5(A8, A9);
HX711 amp6(A10, A11);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);
  pinMode(porta_cal1, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal1, LOW);
  pinMode(porta_cal2, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal2, LOW);
  pinMode(porta_cal3, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal3, LOW);
  pinMode(porta_cal4, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal4, LOW);
  pinMode(porta_cal5, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal5, LOW);
  pinMode(porta_cal6, OUTPUT);
  digitalWrite(porta_cal6, LOW);
  pinMode(Deslocamento, INPUT);
}

```

Definição dos pinos.

Definição do estado dos pinos.

(continua...)

(b) continuação

```

void loop() {
  leituraA12 = analogRead(Deslocamento);
  delay(100);

  Serial1.print("1000");
  Serial1.print("X,");
  Serial1.print((amp1.read()));
  Serial1.print("A,");
  Serial1.print((amp2.read()));
  Serial1.print("B,");
  Serial1.print((amp3.read()));
  Serial1.print("C,");
  Serial1.print((amp4.read()));
  Serial1.print("D,");
  Serial1.print((amp5.read()));
  Serial1.print("E,");
  Serial1.print((amp6.read()));
  Serial1.print("F,");
  Serial1.print(leituraA12);
  Serial1.print("G,");
  Serial1.print("1000");
  Serial1.println("Y");

  {
  if(Serial1.available())
  {
    char numero = Serial1.read();
    if (numero == '1')
    {
      digitalWrite(porta_cal1, HIGH);
      digitalWrite(porta_cal2, HIGH);
      digitalWrite(porta_cal3, HIGH);
      digitalWrite(porta_cal4, HIGH);
      digitalWrite(porta_cal5, HIGH);
    }
    else
      if(numero == '2')
      {
        digitalWrite(porta_cal1, LOW);
        digitalWrite(porta_cal2, LOW);
        digitalWrite(porta_cal3, LOW);
        digitalWrite(porta_cal4, LOW);
        digitalWrite(porta_cal5, LOW);
      }
    }
}
}

```

Leituras dos valores obtidos pelo módulo HX711.

Acionamento (1=ligar e 2=desligar), do fotoacoplador (4N25), para calibração via resistor *shunt*.

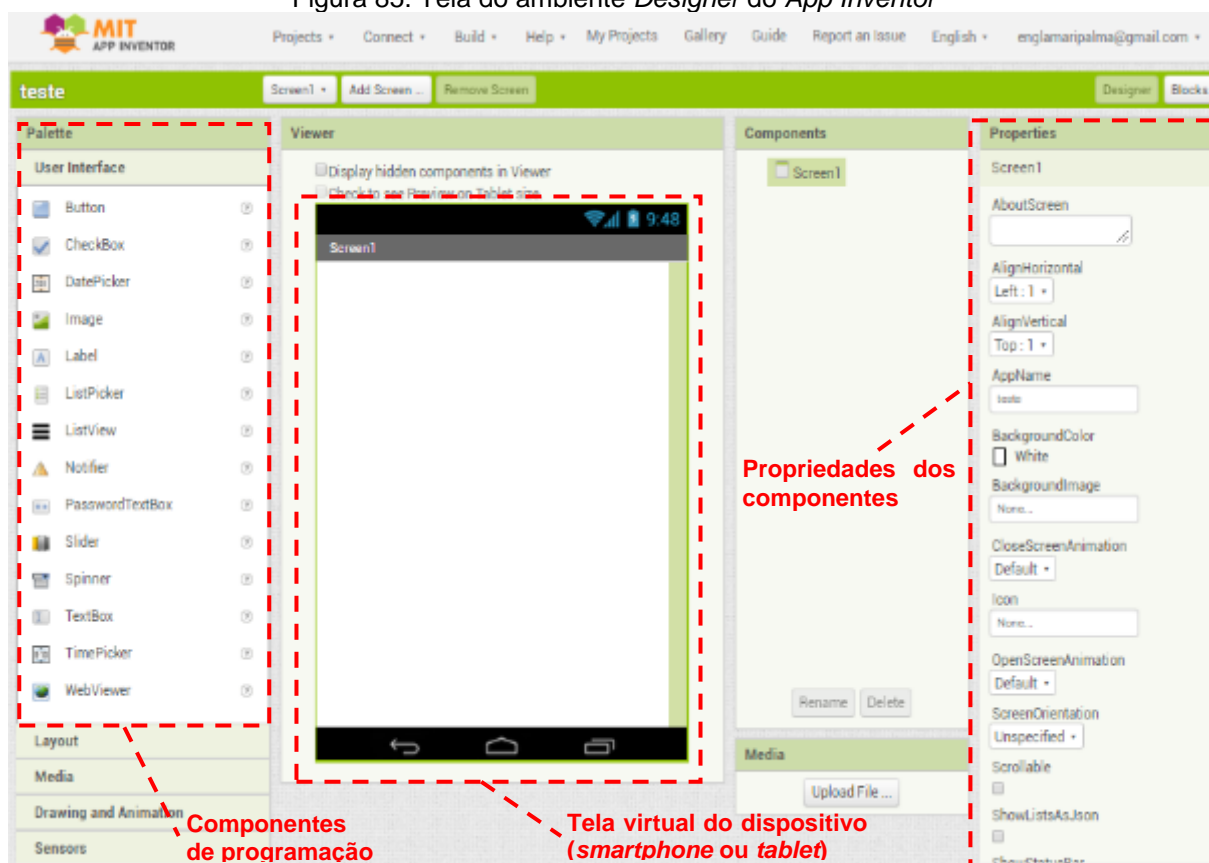
Leituras dos valores obtidos pelo transdutor de deslocamento.

O aplicativo foi desenvolvido a partir da plataforma *web MIT App Inventor* (www.ai2.appinventor.mit.edu), *open source*, desenvolvida pela Google® e atualmente mantida pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

O desenvolvimento de aplicativos na plataforma em questão é basicamente dividido em duas partes, denominadas *Designer* e *Blocks*.

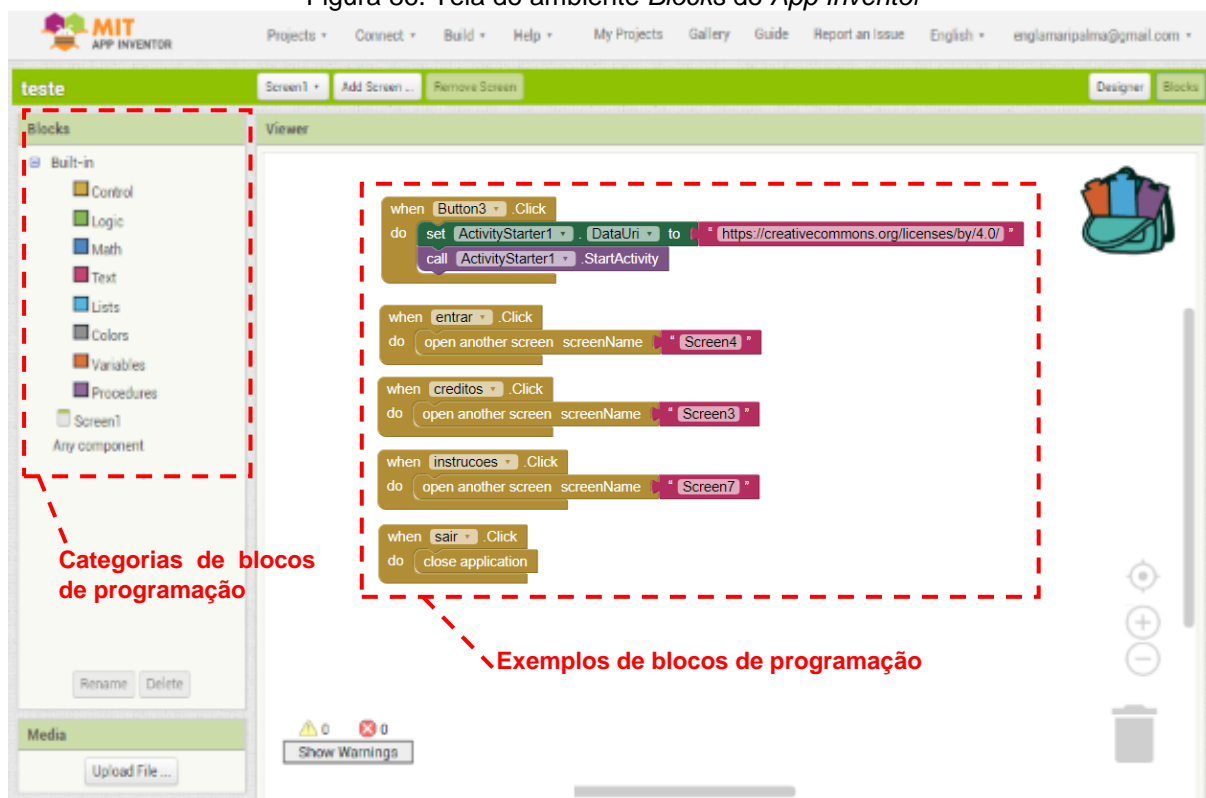
O ambiente *Designer* (Figura 85), conta com uma tela semelhante à de um *smartphone* no centro, onde o programador insere todos os elementos de interface com o usuário, tais como botões, caixas de texto, caixas de seleção, imagens, vídeos, etc.

Figura 85. Tela do ambiente *Designer* do App Inventor



Fonte: <http://ai2.appinventor.mit.edu>

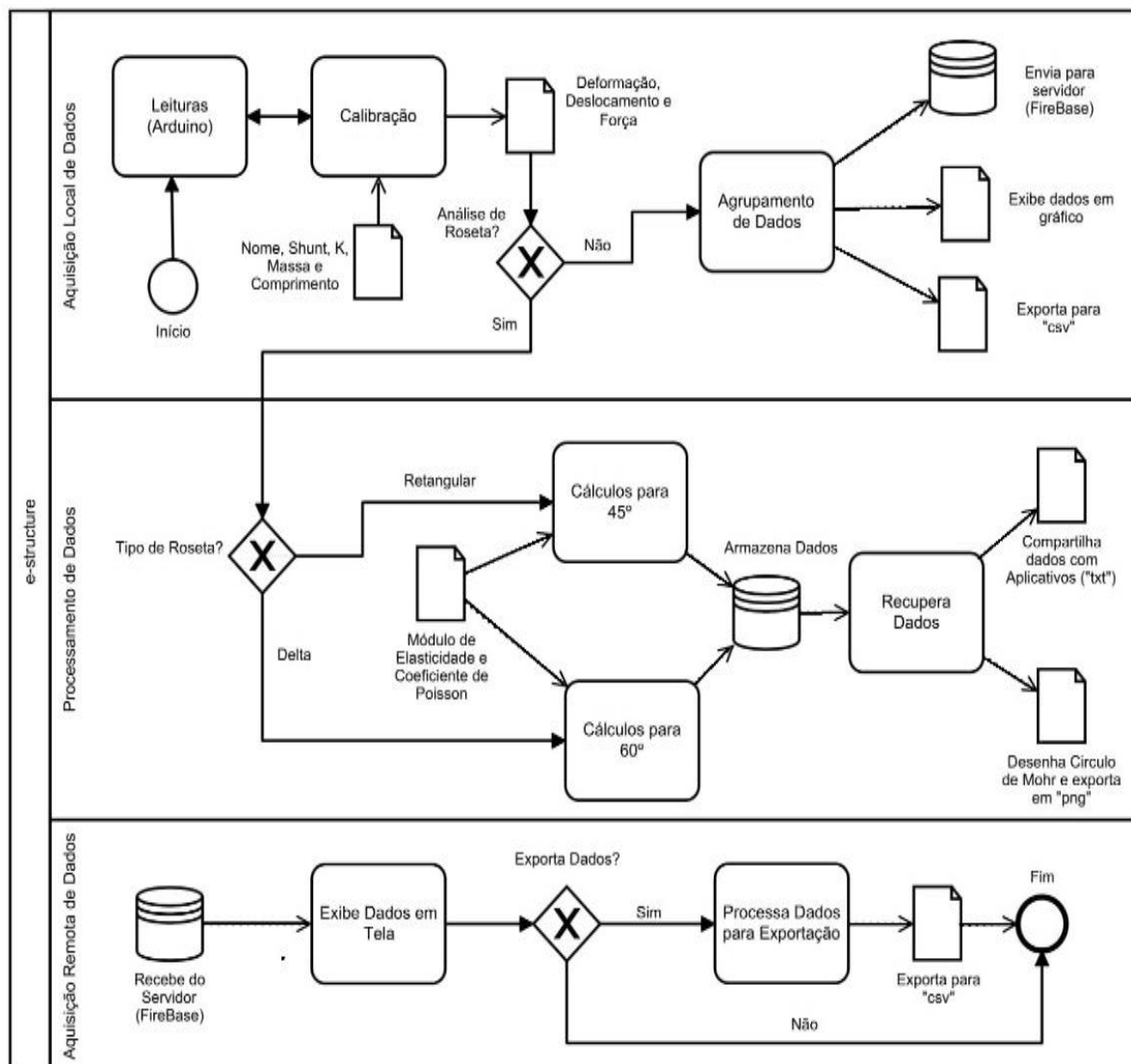
Já no ambiente *Blocks* (Figura 86), o programador insere os algoritmos em forma de blocos de diferentes cores, distribuídos nas seguintes categorias: controle; lógica; matemática; texto; listas; cores; variáveis e procedimentos. Esta programação em forma de blocos não requerendo do usuário conhecimento em uma linguagem específica, mas sim a estrutura de algoritmos.

Figura 86. Tela do ambiente *Blocks* do *App Inventor*

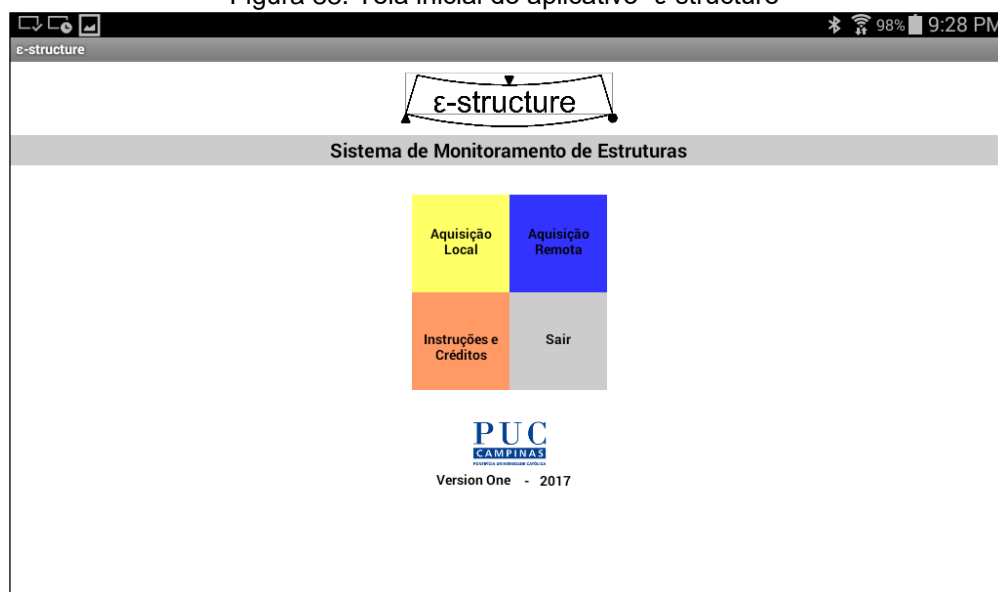
Fonte: <http://ai2.appinventor.mit.edu>

A programação com o *App Inventor* conta com recursos de mídia, relacionados a vídeos, imagens e sons, que vão desde a simples gravação de um vídeo até a conversão de áudio em texto. Também é possível acessar e controlar sensores dos dispositivos, tais como: acelerômetro; leitor de código de barra; giroscópio; GPS; NFC; bússola; sensor de proximidade; dentre outros.

O aplicativo desenvolvido para esta pesquisa, foi dividido em quatro telas: Inicial; Aquisição Local; Aquisição Remota e Análise de Deformações (rosetas), conforme fluxograma da Figura 87.

Figura 87. Fluxograma do aplicativo *mobile* do sistema “ ϵ -structure”

A tela Inicial (Figura 88) tem apenas a função de possibilitar a escolha de acesso às demais telas pelo usuário do sistema.

Figura 88. Tela inicial do aplicativo “ ϵ -structure”

Na tela “Aquisição Local” (Figura 89) fica a parte do aplicativo responsável pela comunicação com o Arduino, via conexão *Bluetooth*. Nesta tela estão elencados os 7 canais, assim distribuídos: Canal 1 a 4 leitura de $\frac{1}{4}$ de ponte; Canal 5 leitura de $\frac{1}{2}$ ponte; Canal 6 leitura de ponte completa (para célula de cargas); e Canal 7 leitura do sensor de deslocamento, do tipo potenciométrico. Nesta tela o usuário escolhe quais canais serão habilitados e insere as informações necessárias para calibração (realizada a partir da Equação 46 para os canais 1 a 5) dos sensores. Também é possível habilitar o filtro estatístico de Média Móvel, implementado conforme equações 51 e 52.

A calibração dos canais 1 a 5, é feita pelo método indireto com o uso do resistor *shunt*, enquanto que nos canais 6 e 7 a mesma é feita pelo método direto, ou seja, respectivamente com a aplicação de força (peso na célula de carga) e comprimento (curso do transdutor de deslocamento) conhecidos, conforme fluxograma da Figura 90.

Figura 89. Tela de Aquisição de Dados (local)

e-structure 97% 9:30 PM

ε-structure

Aquisição de Dados Local

Conectar Desconectar Bluetooth: Desconectado

Habilitar Canais 01 - 02 - 03 - 04 - 05 - 06 - 07

Filtro de Média Móvel intervalo Ativar

Leituras (1 a 5)

CH DR: Nome:	Rg (Ω):	K:	Rc (Ω):	εeq. (μs):	Deformação (μs):
01	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="68400"/>		
02	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="67900"/>		
03	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="68200"/>		
04	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="67800"/>		
05	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="68300"/>		

Leituras (6 e 7)

CH LR: Nome:	F. Conh.:	Força:
06	<input type="text"/>	<input type="text"/>

CH LR: Nome:	Curso:	Deslocamento:
07	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Calibração

Resultados Gravar

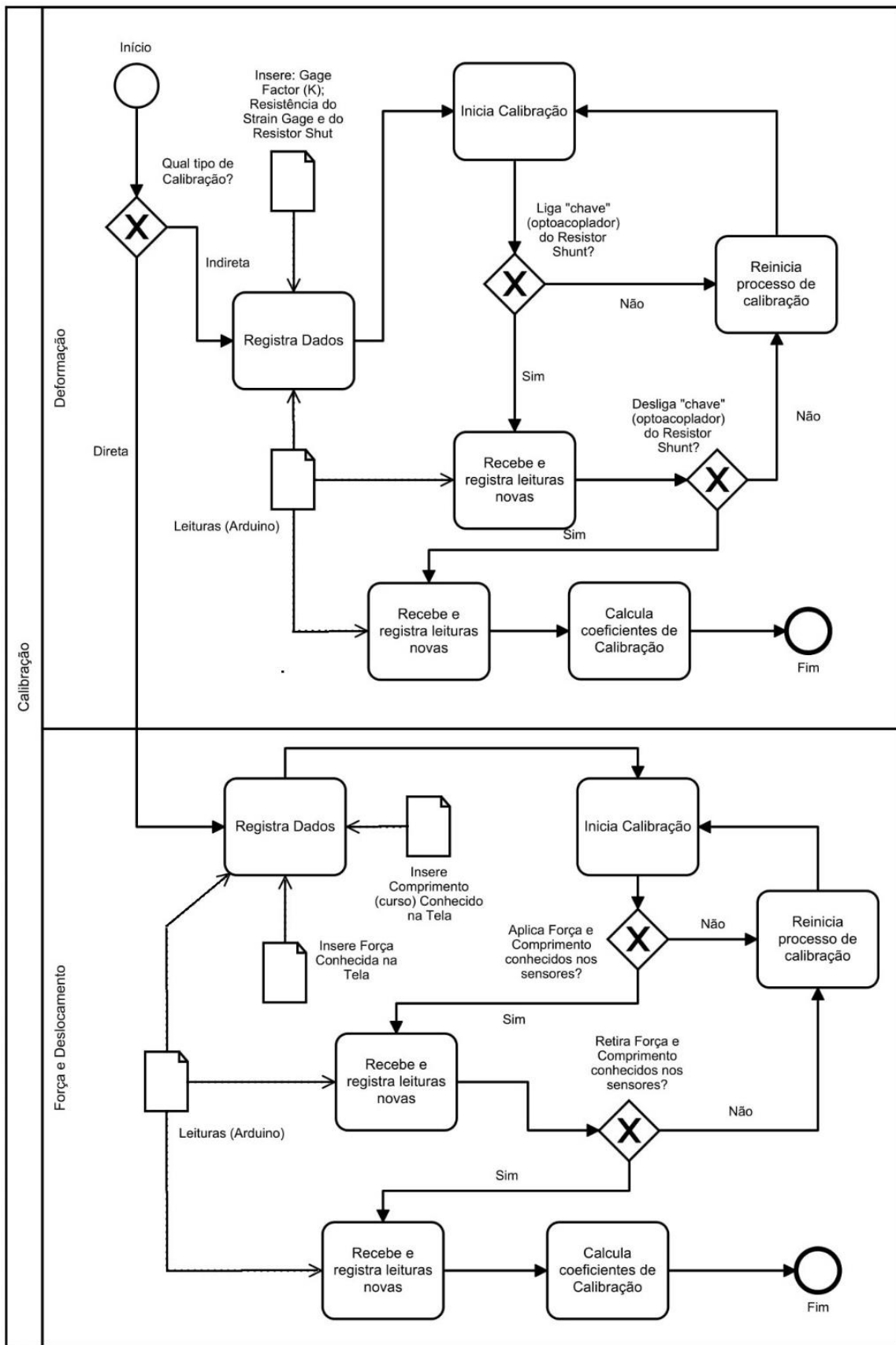
Remoto Ativar Chave:

Gráfico Ativar

Escala de Plotagem Ajuste de Tela

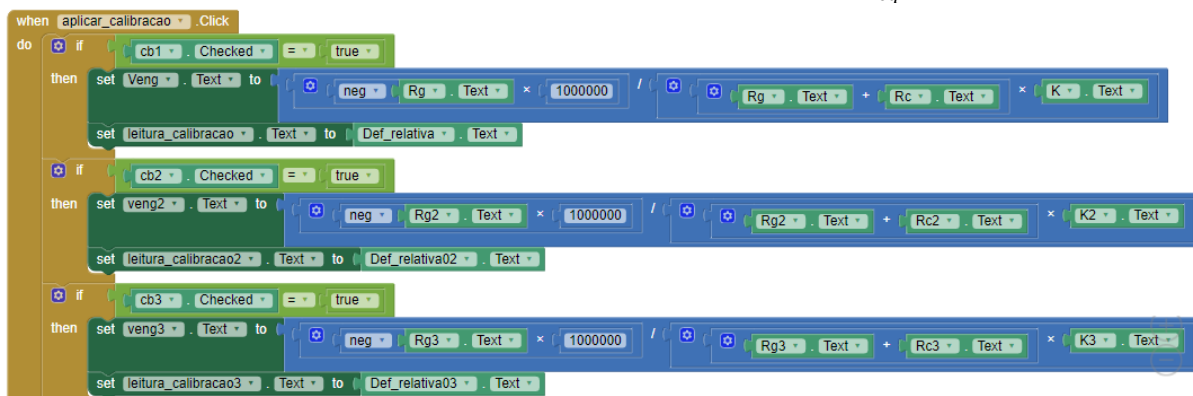
CH1 • - CH2 • - CH3 • - CH4 • - CH5 • - CH6 • - CH7 • - (Δ p/ negativos)

Figura 90. Fluxograma da calibração do sistema “ε-structure”



A Figura 91 mostra parte da programação com blocos, referente à calibração do equipamento.

Figura 91. Parte do algoritmo de blocos para calibração (cálculo de ε_{eq} dos Canais 1, 2 e 3)



Os dados coletados e exibidos em cada um dos canais, podem ser gravados e exportados em arquivos com extensão *csv* (*comma separated values*), para posterior utilização em planilhas eletrônicas, como por exemplo *MSEXcel®*. Podem ser transmitidos para o servidor *Firebase* (<https://firebase.google.com>) e do mesmo para outros aplicativos com conexão à *internet* (acessados pela tela “Aquisição Remota”). Tais dados também podem ser exibidos num *chart* com fundo preto em forma de gráfico de dispersão, de acordo com a preferência do usuário.

Como não foi incluído no aplicativo um campo para inserção e alteração do Fator de Ponte (*Bridge Factor*), cabe ao usuário final avaliar se o seu resultado necessita da aplicação do referido fator, em função da disposição dos extensômetros na Ponte de *Wheatstone* e da forma de aplicação na estrutura, conforme descrito na Revisão Bibliográfica. Entretanto, para o caso de medições com um extensômetro em $\frac{1}{4}$ de Ponte de *Wheatstone*, como no caso “a” da Figura 28 o Fator de Ponte não precisa ser aplicado ao valor de leitura fornecido pelo sistema.

No caso de leitura de extensômetros tipo rosetas, sejam elas retangulares ou delta, os dados das leituras de deformação específica dos Canais 1, 2 e 3 (três deformações de uma extensômetro tipo roseta), podem ser encaminhados automaticamente para a tela “Análise de Deformações”, onde, após a inserção do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, são determinados os valores de deformações e tensões a partir das equações 74 a 80 (PERRY; LISSNER, 1962), para o caso de roseta retangular. Entretanto tais formulas são aplicáveis somente para

materiais isotrópicos, ou seja, que dispõem dos mesmos Módulos de Elasticidade (E e G) e Coeficiente de Poisson (ν), para todas as direções (YOUNG; BUDYNAS, 2002).

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2} \quad (74)$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2} \quad (75)$$

$$\gamma_{max} = \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2} \quad (76)$$

$$\phi_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)} \quad (77)$$

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{max} + \nu\varepsilon_{min}) \quad (78)$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{min} + \nu\varepsilon_{max}) \quad (79)$$

$$\tau_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{max} \quad (80)$$

Onde:

ε_{max} = deformação específica máxima

ε_{min} = deformação específica mínima

γ_{max} = deformação angular máxima

ϕ_p = ângulo da deformação principal

σ_{max} = tensão normal máxima

σ_{min} = tensão normal mínima

τ_{max} = tensão tangencial máxima

Para roseta delta, as equações são 81 a 87 (PERRY; LISSNER, 1962).

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} + \sqrt{\left(\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (81)$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} - \sqrt{\left(\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (82)$$

$$\frac{\gamma_{max}}{2} = \sqrt{\left(\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (83)$$

$$\phi_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3}} \quad (84)$$

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{max} + \nu \varepsilon_{min}) \quad (85)$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{min} + \nu \varepsilon_{max}) \quad (86)$$

$$\tau_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{max} \quad (87)$$

Ainda nesta tela (Figura 92) e com base nos valores calculados, é possível desenhar o Círculo de *Mohr* de Deformações e conhecer a deformação em qualquer uma das direções com o ajuste do cursor em 360°.

Esta análise (cálculos e desenho) pode ser “salva” e armazenada no dispositivo, em forma de arquivo de texto (*txt*) em imagem (*png*), apenas clicando no botão correspondente.

Finalmente, a tela “Aquisição Remota” (Figura 93), pode ser utilizada quando dois ou mais Dispositivos Remotos (DR) possuírem o aplicativo instalado e estiverem conectadas à *internet*, conforme esquema apresentado na Figura 79. Nesta tela, o usuário recebe os dados das leituras dos 7 canais, sendo possível salvá-los em arquivos com extensão *csv*.

Além da visualização dos dados remotamente em aplicativos instalados em outros *smartphones*, os dados das leituras também podem ser acessados em tempo real por meio de um *browser* de um navegador *web*, conforme tela da Figura 94, onde no momento da aquisição apenas o Canal 7 estava recebendo leituras, estando os demais desabilitados. Também são exibidos na referida tela os dados de geolocalização do sistema, ou seja, as coordenadas geográficas de latitude e longitude.

Figura 92. Tela de Análise de Deformações e Círculo de Mohr

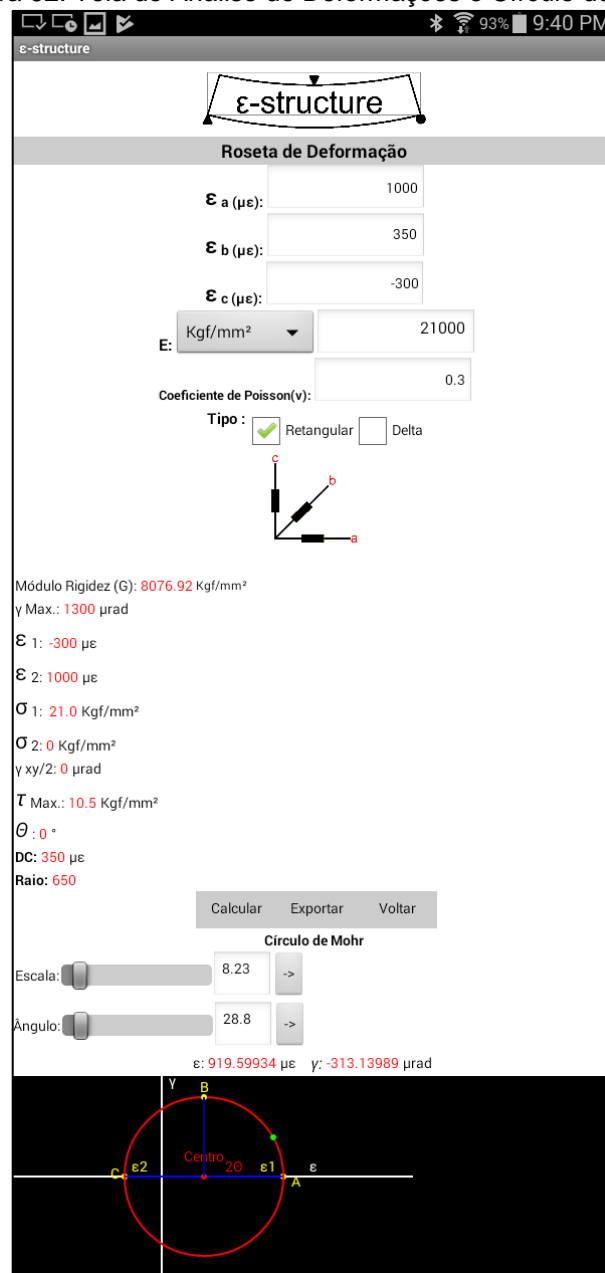


Figura 93. Tela de Aquisição de Dados (Remota)

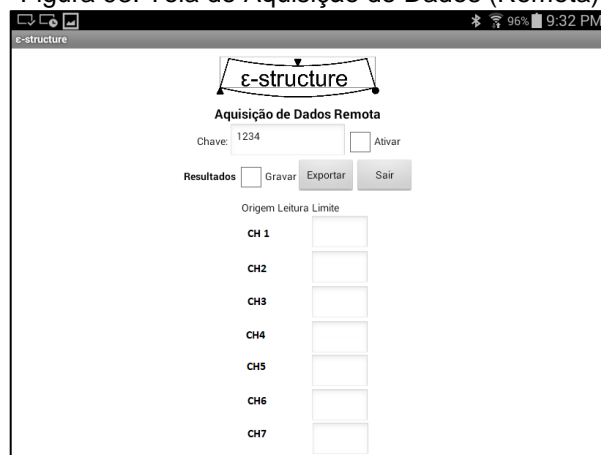


Figura 94. Visualização remota das leituras em navegador web

Leituras: "Canal 1 Desabilitado, Canal 2 Desabilitado, Canal 3 Desabilitado, Canal 4 Desabilitado, Canal 5 Desabilitado, Canal 6 Desabilitado, CH 7,,879,25.79865"

Tempo: "07/01/2018 07:44:54 PM"

Latitude: -22.88292728830129

Longitude: -47.05531859770417

Anotações:

Imprimir

Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana - all copyrights
2018

Concluído o desenvolvimento do sistema, os testes iniciais com o mesmo, compreenderam a aquisição de dados de deformação, deslocamento e força. No caso do monitoramento de deformações, uma lâmina de aço engastada (Figura 95), com medidas de 50,7mm x 4,78mm x 400,0mm (L x H x C), foi ensaiada sob flexão simples, com um extensômetro tipo roseta retangular (modelo KFG-5-120-D17-11), distado (D) a 290,0mm do ponto de aplicação da força. Tal lâmina, recebeu a denominação de Lâmina n.º 2. Foi realizada a aplicação de forças (F), nos valores de 26,95N, 40,67N e 101,43N.

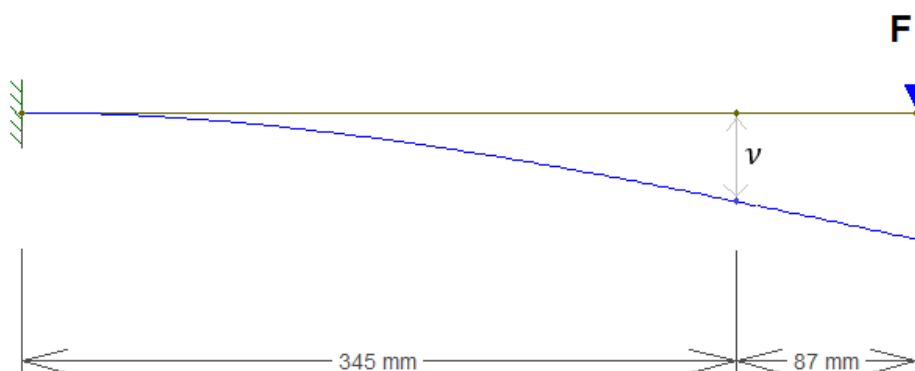
Figura 95. Lâmina n.º 2 com extensômetro (SG) tipo roseta



Para os testes de aquisição de dados de deslocamento e força, foi utilizada a Lâmina n.º 01, que também foi ensaiada sob flexão simples, sendo que o ponto de medição de deslocamento foi a aproximadamente 87,00mm do ponto de aplicação de força (F), conforme Figura 96.

Para medição do deslocamento, foi utilizado um transdutor da marca Gefran®, modelo PY-3-F-025-S01M e para medição de força uma célula de carga da marca Guang-CE®, modelo YZC-516C/1kN, com a aplicação de forças (F) nos valores de 6,28N, 11,38N, 16,68N, 21,78N, 27,08N e 32,96N.

Figura 96. Lâmina n.º 1 com ponto de medição do deslocamento (v)



Os ensaios de ambas as lâminas (n.º 1 e n.º 2), também foram repetidos com a aquisição de dados com um equipamento comercial de referência, neste caso um aquisitor modelo QuantumX-MX840A, para comparação dos resultados. Tais resultados também foram comparados aos valores de deformação específica (ε) e deslocamento (v), obtidos por meio das Equações 88 e 89.

$$v = \frac{Fx^2}{6EI} (3L - x) \quad (88)$$

Onde:

L = comprimento total da viga (345mm+87mm)

x = ponto de deslocamento (345mm)

$$\varepsilon = \frac{Fxy}{EI} \quad (89)$$

Onde:

x = distância entre extensômetro e ponto de aplicação da força (F) (290mm)

y = metade da altura da seção (2,39mm)

A análise comparativa entre os resultados experimentais e analíticos, se deu por meio da determinação do erro relativo percentual ($ER\%$), conforme Equação 90.

$$ER\% = \left(\frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right) 100 \quad (90)$$

Onde:

x_i = valor de referência
 \hat{x}_i = valor analisado

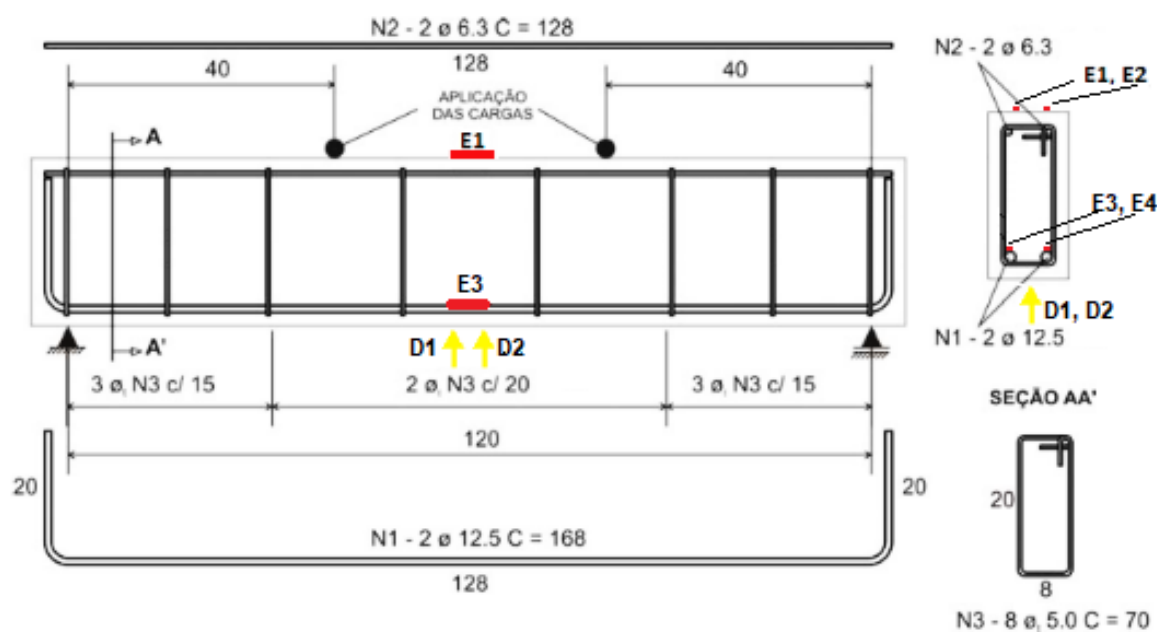
Da mesma forma que nos ensaios anteriores, todos os testes com o “ ε -structure”, não contaram com a utilização de nenhuma técnica para compensação das deformações eventualmente ocorridas em função da alteração de temperatura, visto que as medições foram de curta duração.

3.3 Monitoramento de Deformações e Deslocamentos em protótipo de viga de concreto armado

O sistema de monitoramento de estruturas, “ ε -structure”, foi testado em ensaios de flexão em vigas de concreto armado, com carregamento dinâmico (incremento contínuo de força), no pórtico de ensaios do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, da PUC – Campinas/SP, onde foram coletados dados de deformação específica e deslocamento (flecha).

As vigas foram confeccionadas nas dimensões de 12,5cm de largura, 23,5cm de altura e 132,0cm de comprimento, dimensões estas e armadura proposta por Barros (2009), conforme Figura 97, uma vez que tais vigas estavam sendo utilizadas em outro projeto (MARTINS, 2018) de pesquisa junto ao Laboratório em questão.

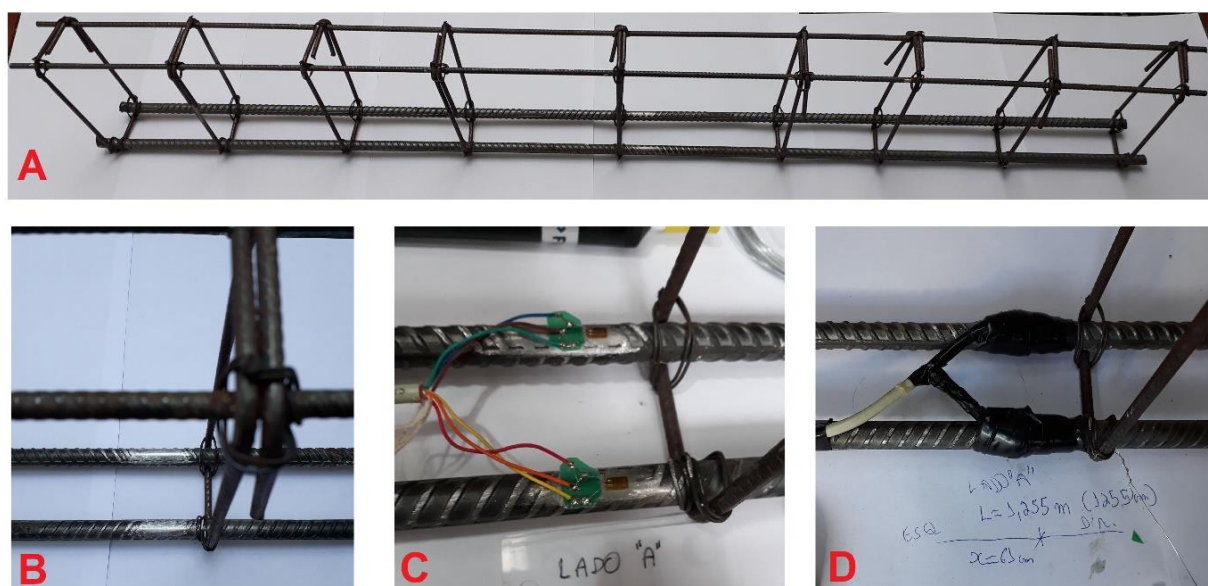
Figura 97. Viga com disposição dos extensômetros (E1, E2, E3 e E4) e transdutores de deslocamento (D1 e D2)



Fonte: adaptado de Barros (2009)

As amaduras longitudinais inferiores de cada uma das 11 vigas, foram instrumentadas com dois extensômetros tipo BX120-3AA ou PA-06-250BA-120-L, com resistência de 120Ω , sendo que a instalação em duplicidade (Figura 98) de ambos sensores (E3 e E4), foi feita para que a aquisição de dados fosse feita tanto pelo sistema proposto nesta pesquisa, quanto pelo aquisitor de dados comercial de referência, de forma simultânea. Entretanto, para que se pudesse ter uma referência, 5 vigas foram ensaiadas onde ambos sensores (E3 e E4) foram lidos simultaneamente pelo equipamento comercial de referência.

Figura 98. A) Armadura da viga; B) Preparo da superfície; C) Instalação dos extensômetros E3 e E4; D) Proteção dos extensômetros.



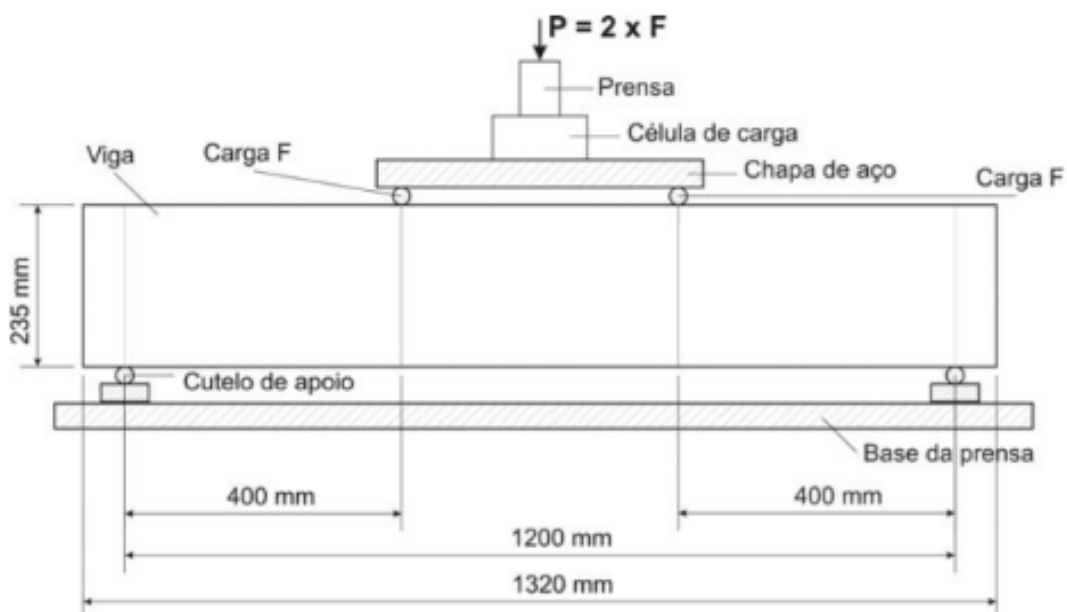
Outras duas vigas foram instrumentadas no centro longitudinal da face superior, com dois extensômetros uniaxiais para concreto (modelo BX120-50AA), conforme Figura 99.

Figura 99. A) Preparo da superfície; B) Colagem do extensômetro e terminal; C) Conexão dos cabos dos extensômetros E1 e E2



O ensaio de flexão foi realizado a quatro pontos, conforme Figura 100, sendo que a aplicação das cargas ocorreu até a fissuração ou ruptura da viga.

Figura 100. Esquema do ensaio de flexão à 4 pontos



Fonte: adaptado de Barros (2009)

A análise das leituras de deformação e deslocamento, se deu por comparação gráfica, ou seja, mediante sobreposição das leituras de ambos os equipamentos, bem como por meio da determinação da média dos erros relativos (*MER*), conforme Equação 91 nos trechos de aplicação de força e determinação do Coeficiente de Correlação de Pearson (*r*) em todo intervalo do gráfico, por meio de recurso do *MS Excel*®.

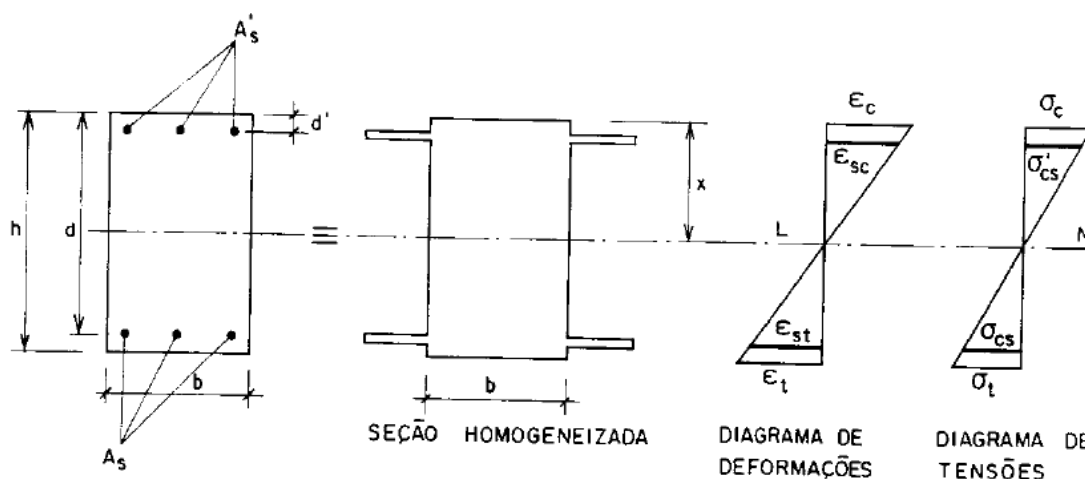
$$MER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i}\right)^2} \quad (91)$$

Onde:

N = quantidade de amostras

Além da comparação entre ambos equipamentos, os dados experimentais de deformação aqusitados, foram comparados aos valores determinados analiticamente. Tal determinação analítica da deformação específica do aço (ϵ_s) à tração e do concreto à compressão (ϵ_c), foram feitas pelas Equações 92 à 100 (PINHEIRO, 2007 e FERNANDES, 1996), respeitando-se a rigidez para o Estádio I e para o Estádio II, a partir do Momento de Fissuração (M_r), com homogeneização da seção transversal (Figura 101).

Figura 101. Seção homogeneização da seção retangular com armadura dupla



Fonte: Fernandes, 1996

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (92)$$

$$X_I = \frac{\frac{bh^2}{2} + \alpha_e(A_s d + A'_s d')}{bh + \alpha_e(A_s + A'_s)} \quad (93)$$

$$I_I = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - X_I \right)^2 + \alpha_e A'_s (X_I - d')^2 + \alpha_e A_s (d - X_I)^2 \quad (94)$$

$$X_{II}^2 + \frac{2\alpha_e}{b} (A_s + A'_s) X_{II} - \frac{2\alpha_e}{b} (A_s d + A'_s d') = 0 \quad (95)$$

$$I_{II} = \frac{bX_{II}^3}{12} + bX_{II} \left(\frac{X_{II}}{2} \right)^2 + \alpha_e A'_s (X_{II} - d')^2 + \alpha_e A_s (d - X_{II})^2 \quad (96)$$

$$\sigma_s = \alpha_e \frac{M}{I} (d - X) \quad (97)$$

$$\sigma_c = \frac{M}{I} X \quad (98)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (99)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (100)$$

Onde:

α_e = coeficiente de homogeneização da seção

E_s = Módulo de Elasticidade do Aço

E_c = Módulo de Elasticidade do Concreto

X_I = posição da linha neutra no Estádio I

I_I = Momento de Inércia no Estádio I

X_{II} = posição da linha neutra no Estádio II

I_{II} = Momento de Inércia no Estádio II

σ_c = tensão no concreto na seção homogeneizada, correspondente a fibra na posição de A_s

σ_s = tensão no aço (A_s) tracionado

ε_s = deformação específica no aço (A_s) tracionado

σ_c = tensão no concreto comprimido

ε_c = deformação específica no concreto comprimido

Para tanto, o momento de fissuração (M_r) foi determinado pela Equação 101, apresentada no item 17.3.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), para que se pudesse determinar a força relativa a este momento.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (101)$$

Onde:

α = é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, sendo 1,5 para seções retangulares.

f_{ct} = é a resistência à tração direta do concreto, com o quantil apropriado a cada verificação particular.

I_c = é o momento de inércia da seção bruta de concreto.

y_t = é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

Para esta determinação analítica da deformação, foi necessária a utilização de propriedades do concreto e do aço, empregado na confecção das vigas. O concreto endurecido, foi objeto de ensaios de acordo com as normas a seguir:

- Resistência a tração na compressão diametral: NBR 7222:2011;
- Resistência à compressão: NBR 5739:2007; e
- Módulo de Elasticidade: NBR 8522:2008.

Já para o aço, os parâmetros de Módulo de Elasticidade e resistência à tração, foram adotados com base nas especificações do fabricante.

A análise dos dados de deformação analítica, se deu por comparação gráfica, na forma de sobreposição das leituras de ambos equipamentos, com os valores analíticos de deformação no Estádio I e no Estádio II.

3.4 Monitoramento de Deformações em pilar de concreto armado

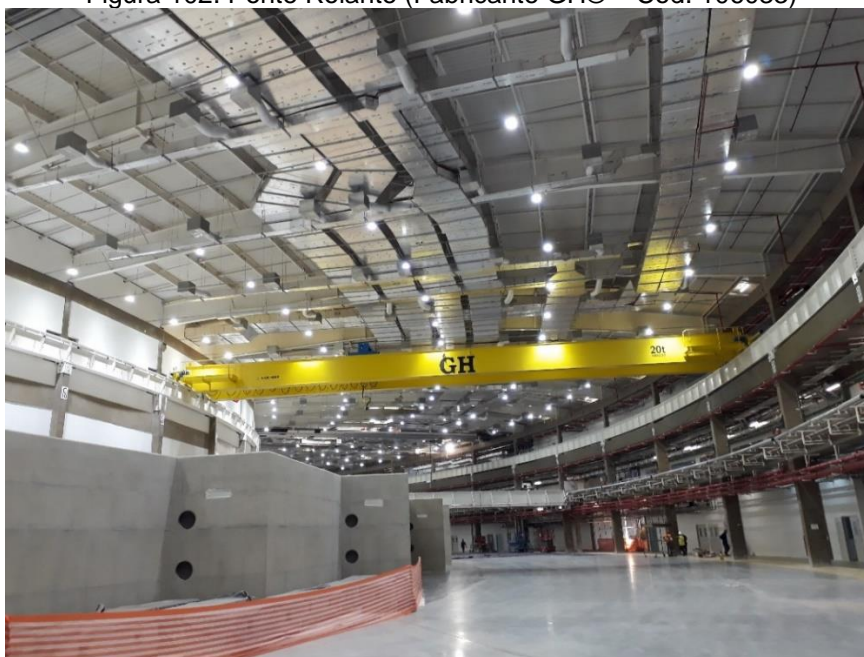
Encontra-se em fase final de obras, o Laboratório Sirius, do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), localizado no Polo de Alta Tecnologia II de Campinas/SP, que empregará um dos mais avançados sistemas de aceleração de elétrons do mundo.

O referido laboratório, conta com um túnel para o acelerador, que é constituído por paredes de concreto armado, com aproximadamente 1,0m de espessura, uma vez que dentro do túnel existe a linha do anel de armazenamento dos elétrons, para

utilização da Luz Síncrotron, que necessita de proteção a radiação e controle da temperatura.

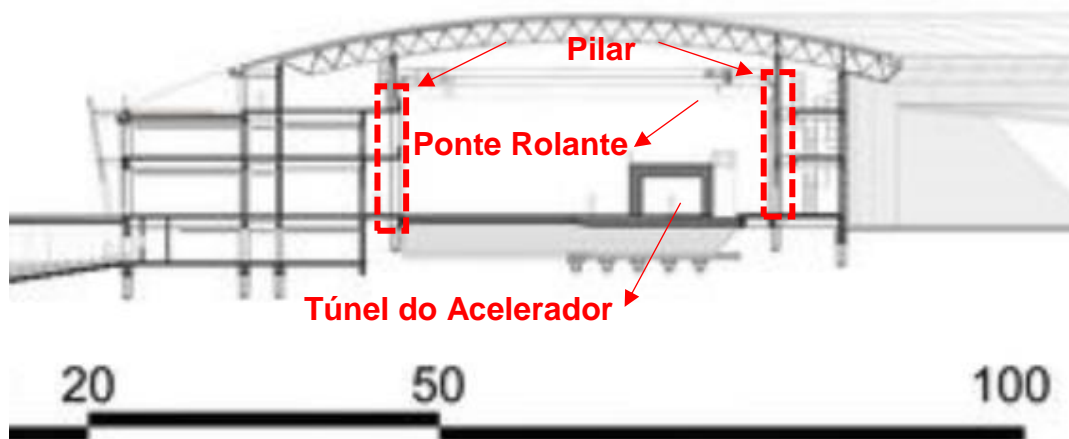
Sobre o túnel do acelerador, foi implantada uma ponte rolante (Figura 102) com capacidade para cargas de até 20tf, que se movimenta por toda extensão (por mais de 500,0m) do túnel, com um vão de aproximadamente 30,0m.

Figura 102. Ponte Rolante (Fabricante GH® – Cod. 106033)



As vigas da ponte são apoiadas sobre pilares de concreto armado (Figuras 103 e 104), onde se realizou o monitoramento de deformações específicas, no pilar denominado D3, com a instalação de extensômetros na armadura.

Figura 103. Corte do túnel, com indicação dos pilares e da ponte rolante



Fonte: adaptado de http://www.paulo-bruna.com.br/uploads/job_picture/file/167/gallery_SITE-CORTE_A.jpg

Figura 104. Vista de um dos pilares de sustentação da ponte rolante



Foram instalados 2 extensômetros uniaxiais (BX120-3AA) em uma barra de aço (Aço CA-50, ϕ 1½”) da armadura vertical do pilar D3 (Figura 105). O acesso a essa armadura, se deu mediante a remoção do concreto numa “janela” de acesso de aproximadamente 7,0cm largura por 20,0cm altura, para que fosse realizada a instalação dos sensores.

As medições de deformação específica, foram feitas a partir de posicionamentos pré-determinados (distante do pilar vs. sobre o pilar) da ponte rolante, de tal forma que houvesse uma rápida variação de cargas e conseqüentemente, a variação nas deformações.

Os dados experimentais de deformação específica, foram coletados tanto pelo “ ϵ -structure”, quanto pelo equipamento comercial de referência, para comparação entre ambos. Sendo que tal comparação foi feita de forma gráfica, com a sobreposição das leituras de ambos equipamentos.

Figura 105. A) “Janela” de acesso a armadura no topo do pilar; B) Preparo da superfície; C) Colagem do extensômetro e terminal; D) Instalação dos extensômetros; E) Proteção dos extensômetros



4. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir, mantêm a estrutura e sequência apresentada no capítulo anterior.

4.1 Testes com Amplificador de Sinais HX711

Inicialmente foram coletadas experimentalmente as deformações específicas, na Lâmina n.º 1, com o aquisitor de dados comercial de referência, conforme esquema de ensaio da Figura 106.

Figura 106. Ensaio de Lâmina n.º 1 sob flexão com QuantumX



Também foram determinadas analiticamente as deformações específicas, por meio das equações 68 a 72, conforme resultados analíticos e experimentais apresentados na Tabela 3.

Tanto aos valores experimentais, quanto os valores analíticos da Tabela 3, serviram de referência para as análises a seguir.

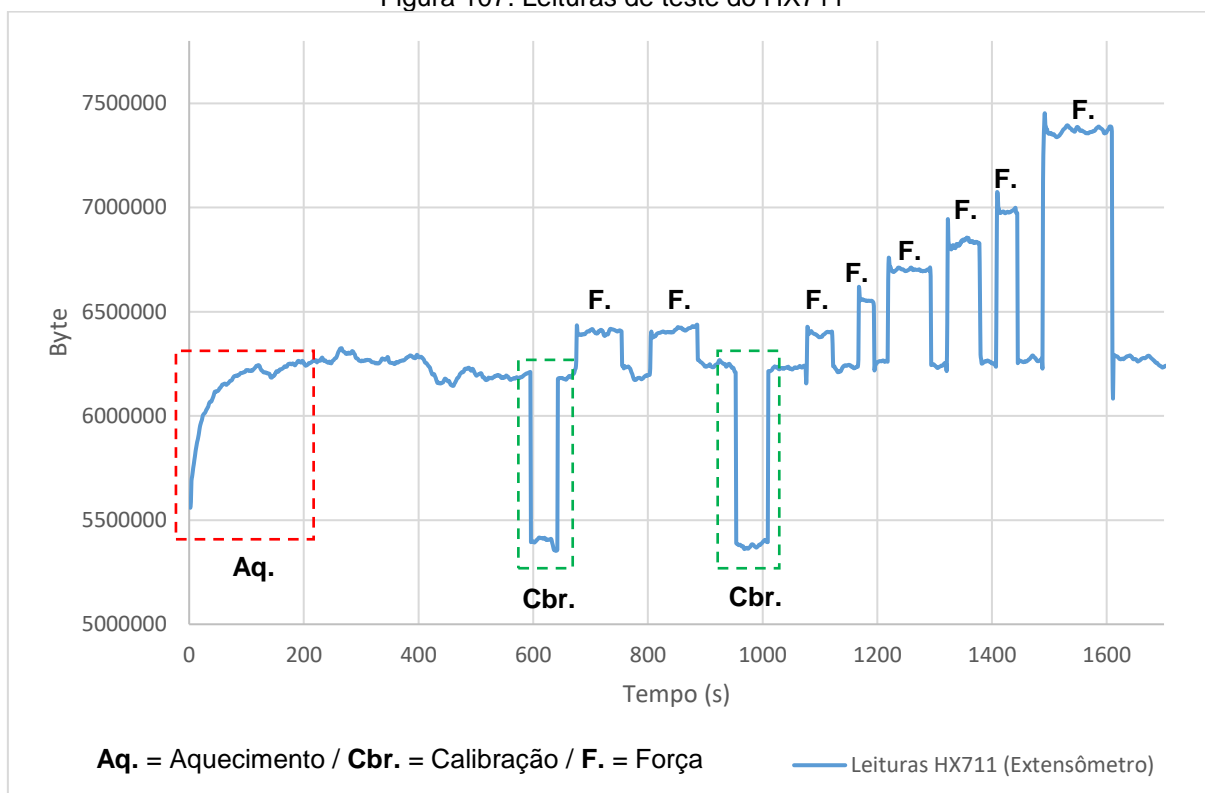
Tabela 3. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 - QuantumX

Força (N)	Deformação ($\mu\text{m/m}$)						Erro Relativo (%)
	Analítica	Experimental - QuantumX (HBM)					
		Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura Média	Desvio Padrão	
6,37	147,18	154	157	154	155,00	1,41	5,31
11,27	260,40	283	287	283	284,33	1,89	9,19
16,66	384,94	415	420	420	418,33	2,36	8,67
21,56	498,16	545	548	544	545,67	1,70	9,54
26,95	622,70	679	680	675	678,00	2,16	8,88
39,69	917,07	1.015	1.018	1.014	1.015,67	1,70	10,75

Nos testes iniciais com o módulo HX711, constatou-se que o sistema necessita de um tempo para “aquecimento” (Aq.), ou seja, estabilização das leituras, que para as leituras da Figura 107, este tempo inicial foi de aproximadamente 200 segundos. Foi observado que o tempo de “aquecimento”, variou em função da temperatura ambiente, durante os experimentos com o módulo em questão.

Nas leituras do gráfico da Figura 107, também são observados os momentos em que ocorre a calibração (Cbr.) por acionamento do resistor *shunt*, bem como a aplicação e retirada de forças (F.) da lâmina sob flexão.

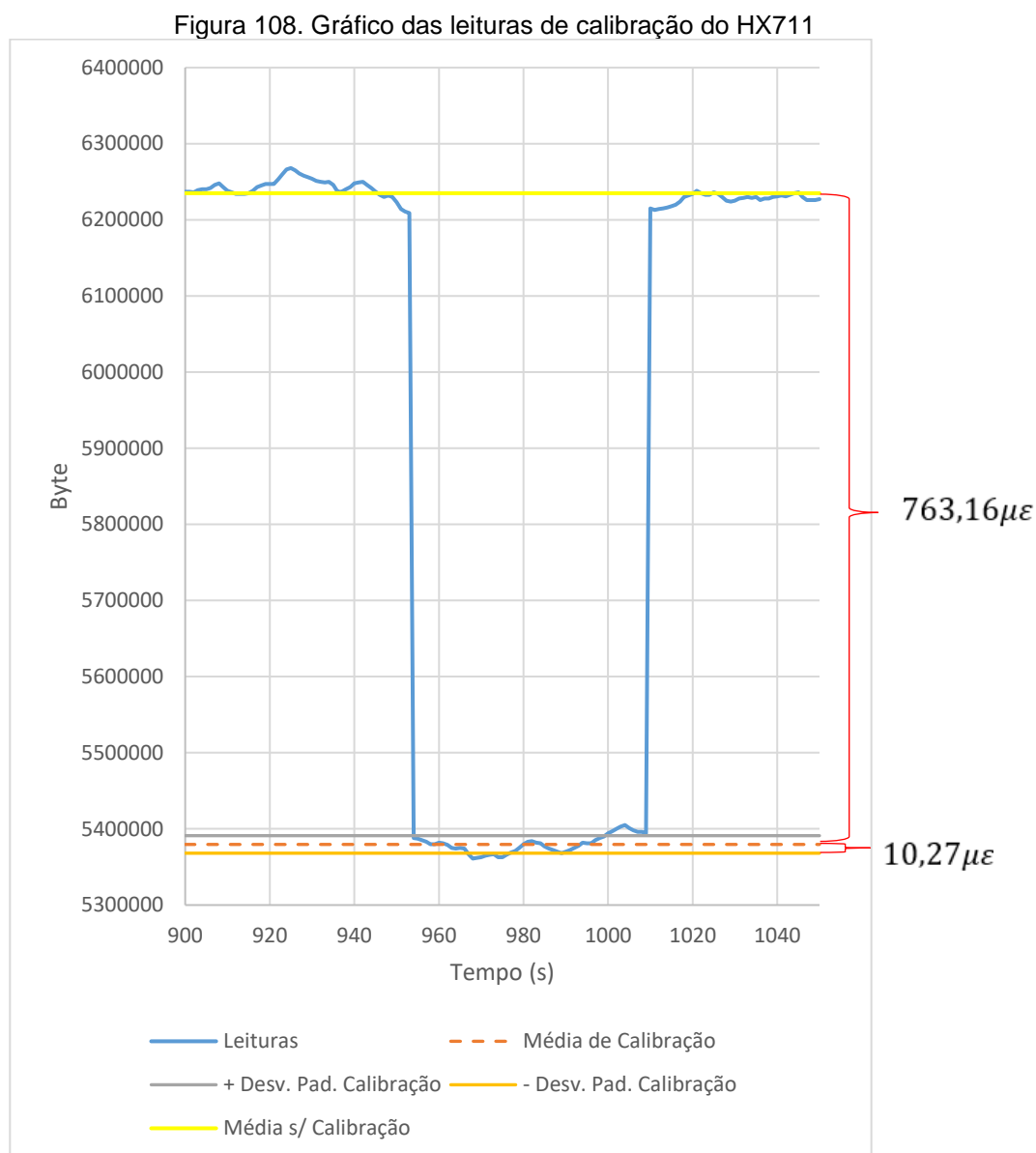
Figura 107. Leituras de teste do HX711



O sistema teve sua calibração calculada pela Equação 102, apresentada na Revisão Bibliográfica como Equação 47.

$$\varepsilon_{eq.} = \frac{1}{2} \left(\frac{78500}{120+78500} - 1 \right) 10^6 = -763,16 \mu m/m \quad (102)$$

Foi calculado Desvio Padrão de calibração, obtendo-se o desvio de +ou- $10,27 \mu m/m$ conforme Figura 108, que possivelmente corresponde ao ruído na ocasião da leitura.



O Fundo de Escala, para um resistor de calibração (*shunt*) de 78,5k Ω , num sistema de medição de extensômetro com 120 Ω para este módulo conversor AD de 24bits, é de 14.968,48 $\mu m/m$.

Foram realizadas três séries de carregamentos na Lâmina n.º 1, conectado ao circuito do módulo (Figura 109), obtendo-se os valores experimentais apresentados na Tabela 4.

Figura 109. Ensaio da Lâmina n.º 1 sob flexão com o amplificador HX711

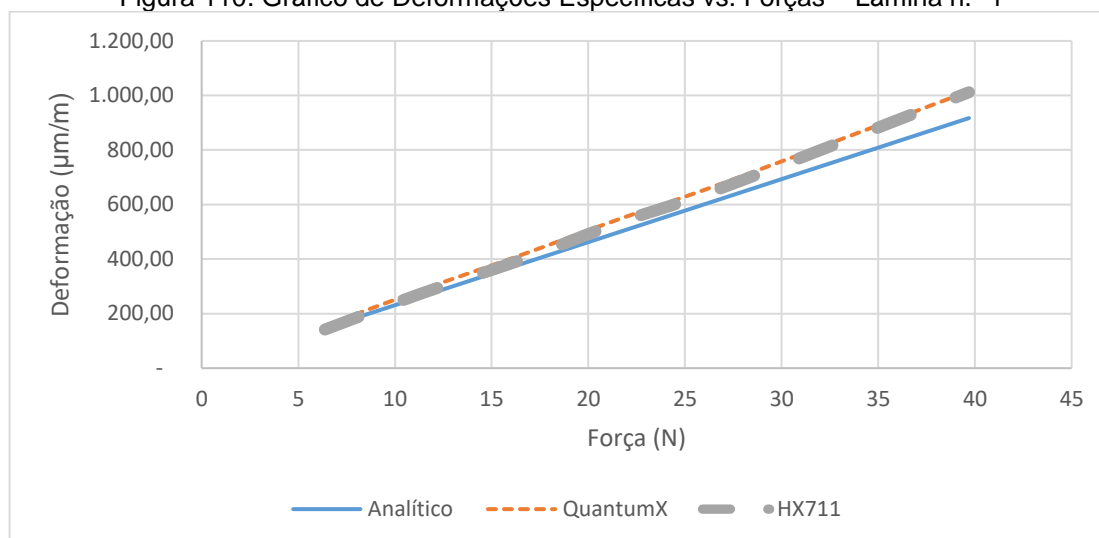


Tabela 4. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 - QuantumX vs. HX711

Força (N)	Analítica	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)						Erro	Erro
		Experimental						Relativo	Relativo
		QuantumX			Módulo HX711			Analítico	HX711
		Média	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio Padrão	vs. HX711 (%)	vs. Quantum X (%)
6,37	147,18	155,00	153,51	144,05	126,59	141,38	11,15	-3,94	-8,79
11,27	260,40	284,33	288,60	281,42	244,14	271,39	19,49	4,22	-4,55
16,66	384,94	418,33	412,28	410,20	379,77	400,75	14,86	4,11	-4,20
21,56	498,16	545,67	530,71	562,83	506,37	533,30	23,13	7,05	-2,27
26,95	622,70	678,00	666,67	686,85	632,96	662,16	22,23	6,34	-2,34
39,69	917,07	1.015,67	986,85	1.030,27	1.018,16	1.011,76	18,29	10,33	-0,38

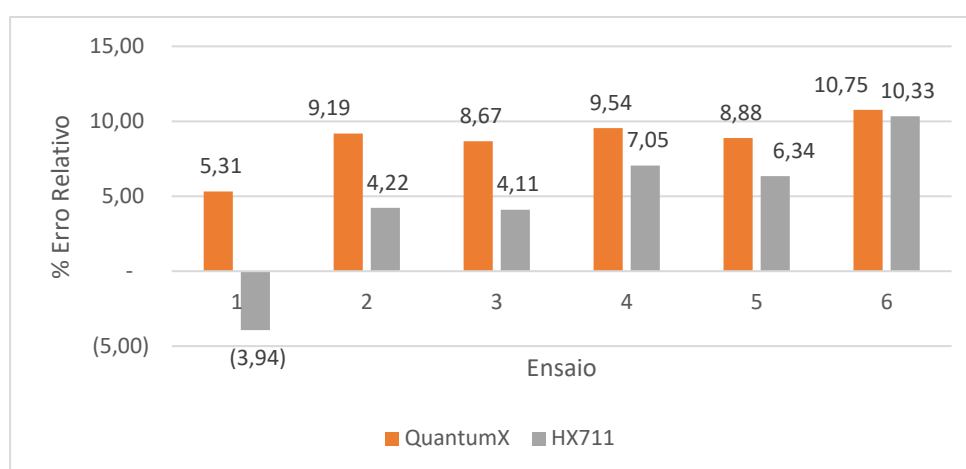
A partir dos valores médios de deformações experimentais e deformação analítica, foi feito o gráfico comparativo da Figura 110.

Figura 110. Gráfico de Deformações Específicas vs. Forças – Lâmina n.º 1



A variação percentual das deformações experimentais em relação a deformação analítica, são apresentadas no gráfico da Figura 111.

Figura 111. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 1



É presumível, que a decrescência do ER (%) entre equipamentos, tenha se dado inclusive pela pouca significância do desvio padrão (constatado em teste iniciais no valor de $\pm 10,27 \mu\text{m}/\text{m}$) na medida que ocorre o aumento da deformação aquiritada pelo sistema. Já o aumento crescente do ER (%) em relação ao valor analítico de deformações, pode estar associado ao fenômeno do desvio linear da Ponte de *Wheatstone*, descrito na Revisão Bibliográfica. Outra questão que auxilia no entendimento das diferenças obtidas entre ambos equipamentos, refere-se ao fato de que a Ponte de *Wheatstone* foi construída com resistores 1% de tolerância da

precisão, enquanto que em equipamentos comerciais, esta tolerância é inferior a 0,1%, o que os torna mais precisos, entretanto mais caros.

4.2 Testes com o protótipo do Sistema de Monitoramento “ ϵ -structure”

O primeiro ensaio foi realizado na Lâmina n.º 1 com extensômetro uniaxial (Figura 112) conectado ao “ ϵ -structure”, mediante três séries de carregamentos, obtendo-se os valores experimentais apresentados na Tabela 5.

Figura 112. Ensaio de lâmina sob flexão com o “ ϵ -structure”

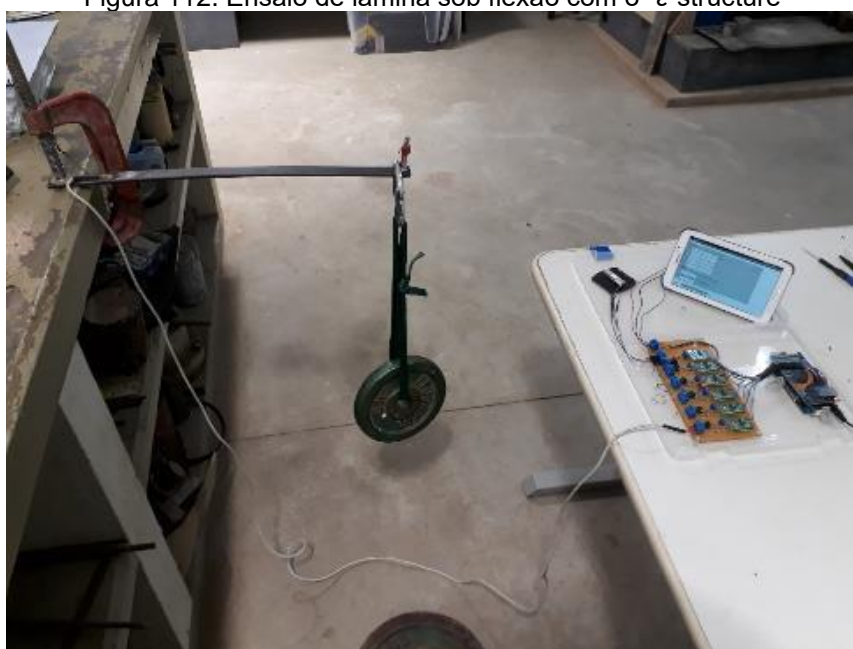
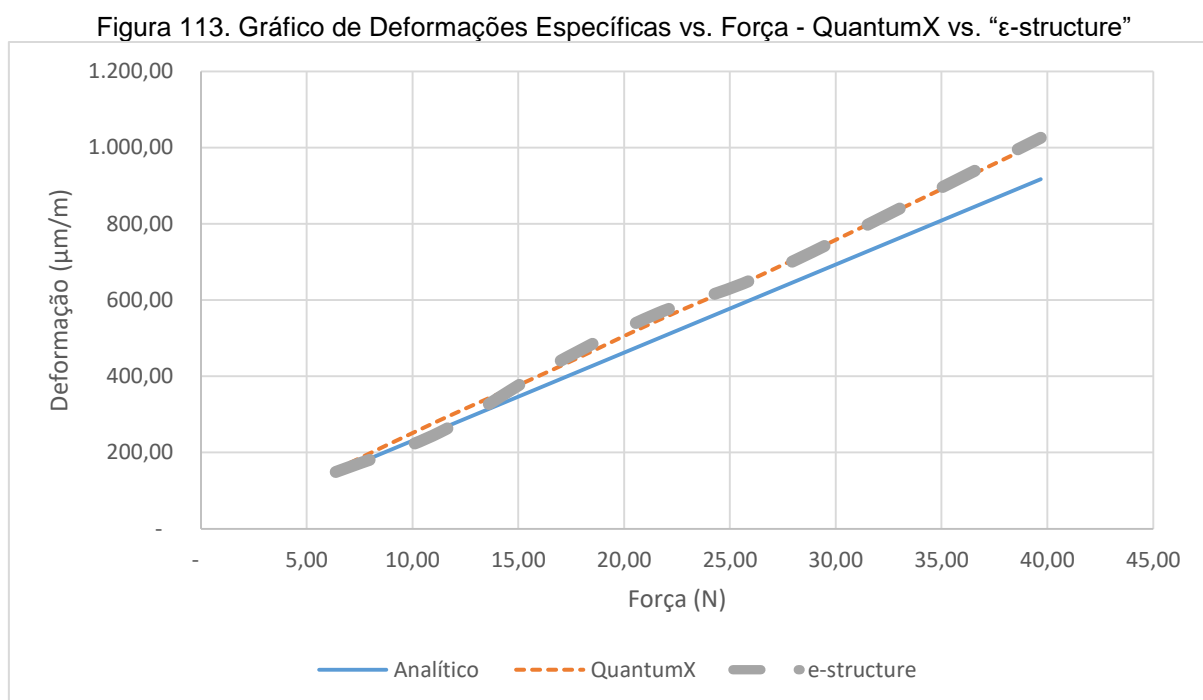


Tabela 5. Deformações Específicas na Lâmina n.º 1 – QuantumX vs. “ ϵ -structure”

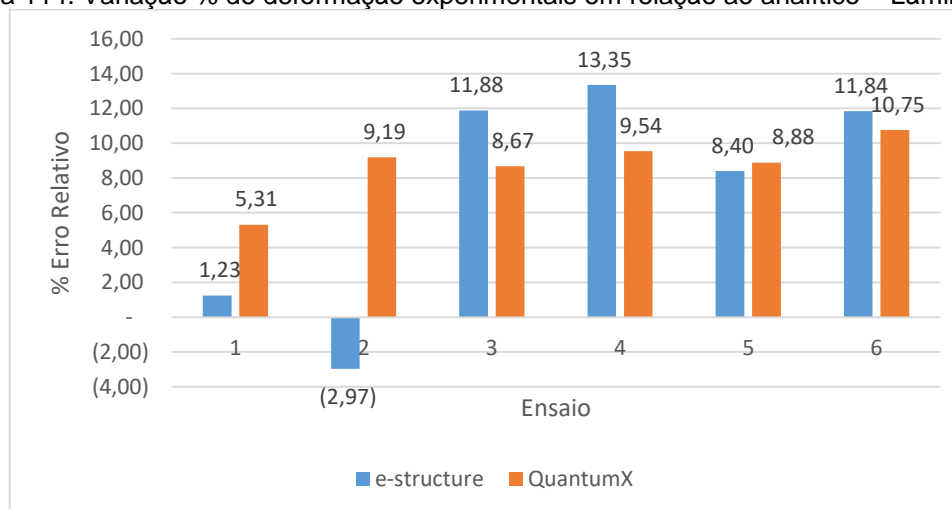
Força (N)	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)							Erro Relativo <i>Análítico</i> vs. ϵ - <i>structure</i> (%)	Erro Relativo ϵ - <i>structure</i> vs. <i>QuantumX</i> (%)
	Analítica	Experimental							
		QuantumX			ϵ -structure				
		Média	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio Padrão		
6,37	147,18	155,00	150	152	145	149,00	2,94	1,23	-3,87
11,27	260,40	284,33	225	288	245	252,67	26,28	-2,97	-11,14
16,66	384,94	418,33	430	432	430	430,67	0,94	11,88	2,95
21,56	498,16	545,67	574	550	570	564,67	10,50	13,35	3,48
26,95	622,70	678,00	670	690	665	675,00	10,80	8,40	-0,44
39,69	917,07	1.015,67	1.007	1.040	1.030	1.025,67	13,82	11,84	0,98

A partir dos valores médios de deformação experimental, foi feito o gráfico comparativo da Figura 113.



A variação percentual das deformações experimentais em relação à deformação analítica, são apresentadas no gráfico da Figura 114.

Figura 114. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 1



Estes resultados ficaram próximos dos obtidos por meio dos testes iniciais com o amplificador HX711, com erro relativo entre -3,94% a 10,33%.

O segundo ensaio foi realizado na Lâmina n.º 2 com extensômetro tipo roseta retangular (Figura 115), com uma série de carregamento, conectado aos canais 1, 2

3 do aquisitor de dados, obtendo-se então os valores experimentais apresentados na Tabela 6. Tais valores de deformações experimentais, referem-se à deformação principal, ou seja, foram calculados pelo aplicativo desenvolvido, com base nas três deformações do extensômetro tipo roseta, bem como com a consideração de um Módulo de Elasticidade de 210GPa e Coeficiente de Poisson 0,3.

Figura 115. Lâmina metálica com extensômetro tipo roseta

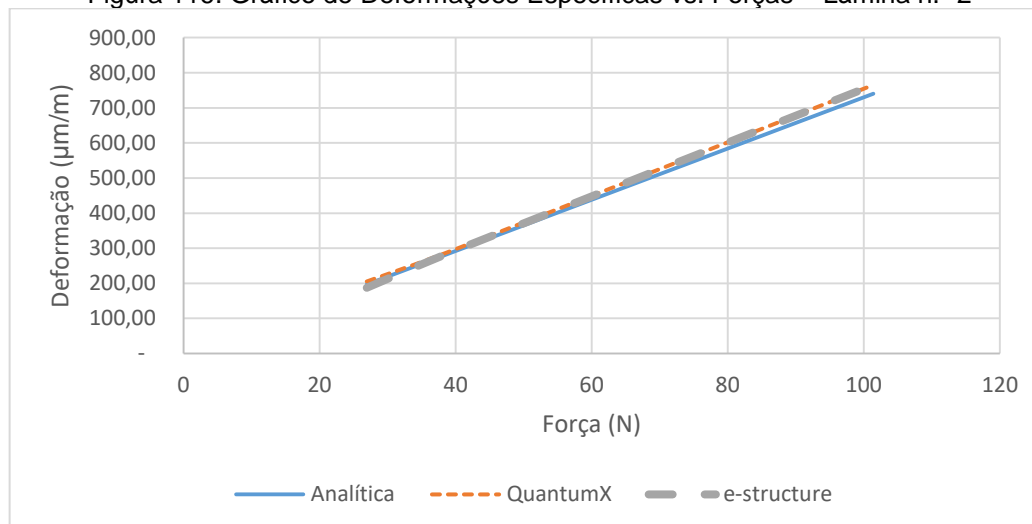


Tabela 6. Valores de Deformações Específicas e de Erros Relativos – Lâmina n.º 2

Ensaio	Força (N)	Analítica ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Deformação				Erro Relativo entre equipamentos (%)
			Experimental				
			QuantumX		e-structure		
			($\mu\text{m}/\text{m}$)	Erro (%)	($\mu\text{m}/\text{m}$)	Erro (%)	
1	26,95	196,70	205,12	- 4,28	187,20	4,83	8,74
2	40,67	296,83	302,26	-1,83	298,99	-0,73	1,08
3	101,43	740,30	765,36	-3,39	764,87	-3,32	0,06

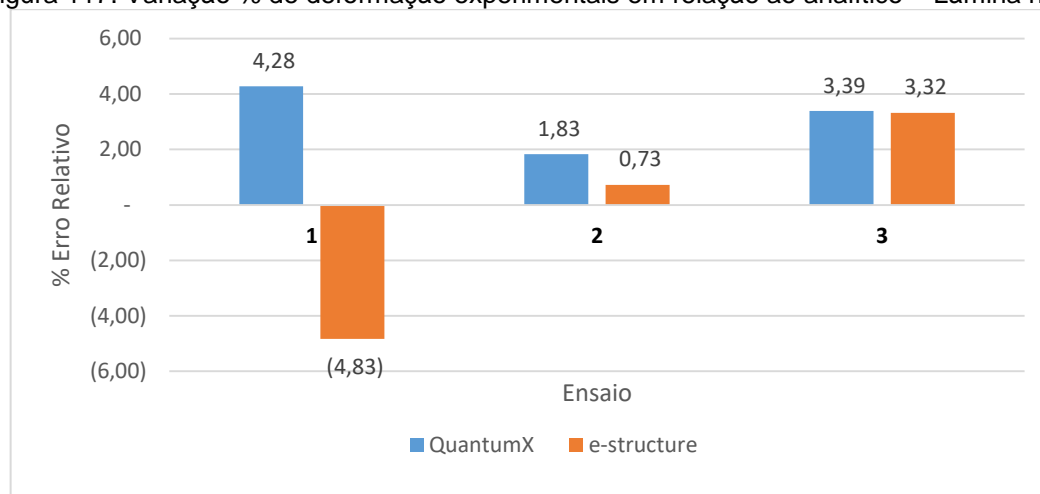
A partir dos valores desta tabela, foi feito o gráfico comparativo da Figura 116.

Figura 116. Gráfico de Deformações Específicas vs. Forças – Lâmina n.º 2



A variação percentual das deformações coletadas pelo “ ϵ -structure” e pelo QuantumX em relação a deformação analítica, são apresentadas no gráfico da Figura 117.

Figura 117. Variação % de deformação experimentais em relação ao analítico – Lâmina n.º 2



Acredita-se que os Erros Relativos (ER) das medições de deformação na Lâmina n.º 2 foram menores que os da Lâmina n.º 1, para ambos equipamentos utilizados na aquisição de dados, visto se tratar de extensômetro tipo roseta e de melhor qualidade.

Quanto a decrescência do ER (%) entre equipamentos e o aumento crescente do ER (%) em relação ao valor analítico de deformações, já foram objeto de justificativas no item 4.1 desta Dissertação.

Em relação ao ensaio de deslocamento da Lâmina n.º 1 (Figura 118), o “ ϵ -structure” apresentou um erro relativo médio de 28,96%, com um desvio padrão do erro médio de +/- 1,5% em relação aos valores analíticos. O aquisitor de referência, apresentou um erro relativo médio de 19,14%, entretanto o desvio padrão do erro médio foi de +/- 16,03%.

Foi verificado que com o aumento da força aplicada, o erro relativo entre ambos equipamentos diminuía, conforme valores constantes da Tabela 7, sendo que os valores de deslocamento lidos pelo “ ϵ -structure”, sempre ficaram maiores que os valores analíticos de referência. Já nas leituras do aquisitor de referência, os valores oscilaram entre maiores e menores que o valor de referência, conforme gráfico da Figura 119.

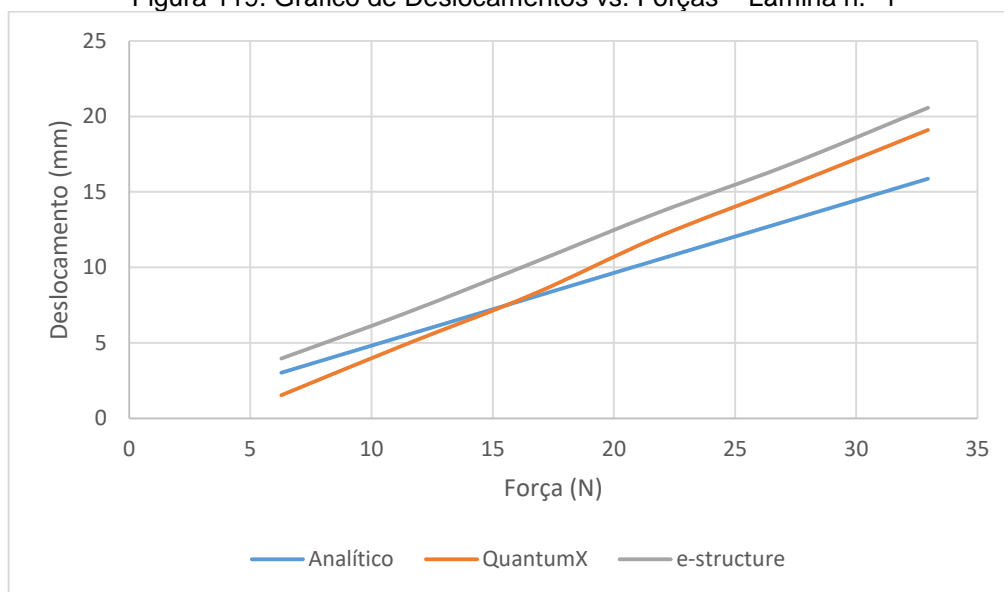
Figura 118. Ensaio de deslocamento e medição de força na Lâmina n.º 1



Tabela 7. Valores de Deslocamento e Erros Relativos - Lâmina n.º 1

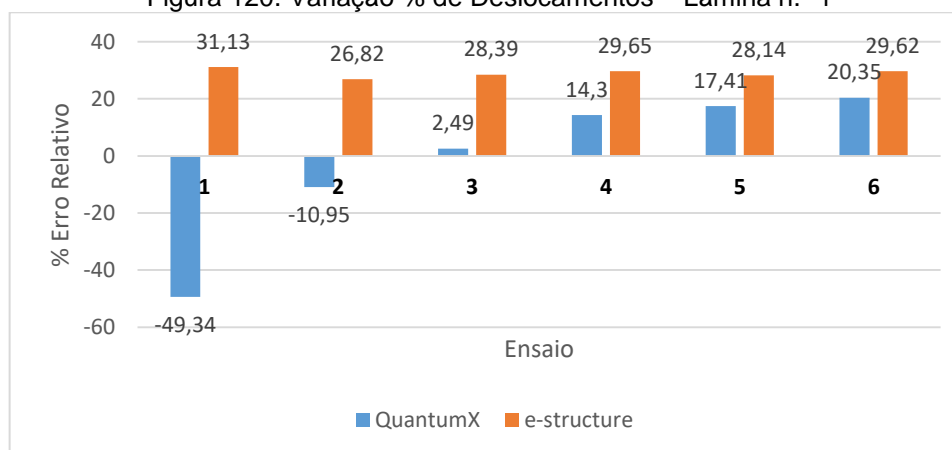
Ensaio	Deslocamentos								Erro Relativo entre equipamentos (%)
	Força (N)	Analítico (mm)	Experimental						
			QuantumX			e-structure			
		(mm)	Desvio Padrão	Erro (%)	(mm)	Desvio Padrão	Erro (%)		
1	6,28	3,02	1,53	0,70	-49,34	3,96	0,01	31,13	158,82
2	11,38	5,48	4,88	0,79	-10,95	6,95	0,19	26,82	42,42
3	16,68	8,03	8,23	0,52	2,49	10,31	0,21	28,39	25,27
4	21,78	10,49	11,99	0,62	14,3	13,6	0,19	29,65	13,43
5	27,08	13,04	15,31	0,70	17,41	16,71	0,21	28,14	9,14
6	32,96	15,87	19,1	0,98	20,35	20,57	0,09	29,62	7,7

Figura 119. Gráfico de Deslocamentos vs. Forças – Lâmina n.º 1



No gráfico da Figura 120, são apresentados os percentuais de variação dos deslocamentos em relação ao analítico.

Figura 120. Variação % de Deslocamentos – Lâmina n.º 1



Quanto à medição de forças, as variações entre os valores experimentais e o valor conhecido, foram pequenas, conforme percentuais apresentados na Tabela 8, o que já era esperado, uma vez que o módulo HX711 tem como principal aplicação, a utilização de célula de carga. Já os baixos valores de ER (%) encontrados entre equipamentos, podem estar associados ao fato de que a utilização de célula de carga, não necessita de resistores, uma vez que a Ponte de *Wheatstone* é formada completamente por extensômetros, ou seja, o equipamento comercial de referência,

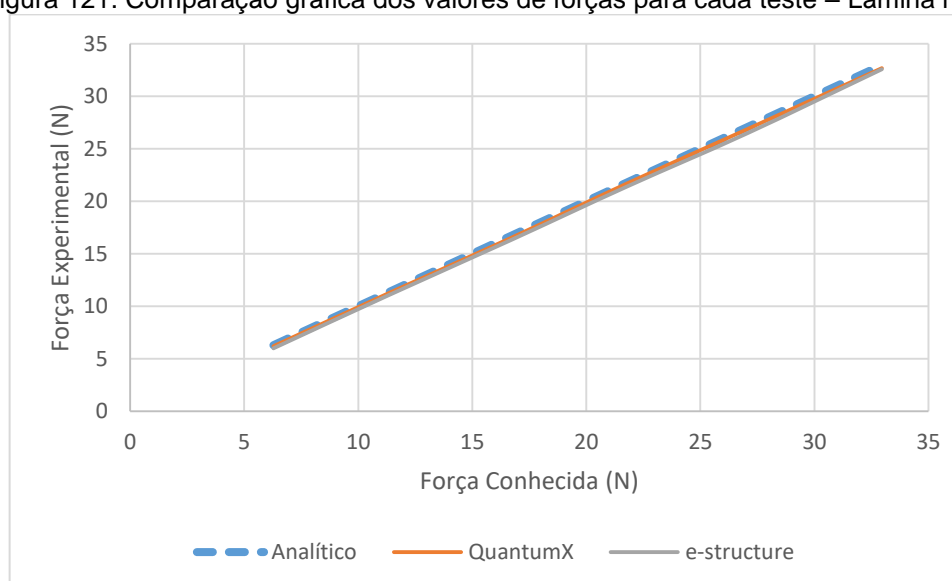
não utilizou seus resistores internos de alta precisão para completar o circuito da Ponte de *Wheatstone*.

No gráfico da Figura 121, são apresentados os valores de forças experimentais em relação àquelas previamente conhecidas.

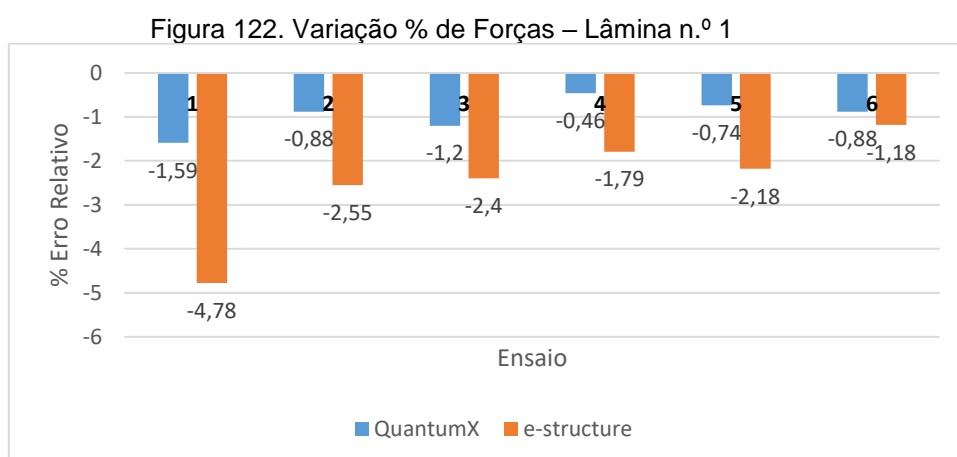
Tabela 8. Valores de Forças e Erros Relativos - Lâmina n.º 1

Ensaio	Força Conhecida (N)	Força Experimental						Erro Relativo entre equipamentos (%)
		QuantumX			e-structure			
		(N)	Erro (%)	Desvio Padrão	(N)	Erro (%)	Desvio Padrão	
1	6,28	6,18	-1,59	0,00	5,98	-4,78	0,01	-3,24
2	11,38	11,28	-0,88	0,01	11,09	-2,55	0,00	-1,68
3	16,68	16,48	-1,20	0,01	16,28	-2,4	0,01	-1,21
4	21,78	21,68	-0,46	0,00	21,39	-1,79	0,01	-1,34
5	27,08	26,88	-0,74	0,00	26,49	-2,18	0,02	-1,45
6	32,96	32,67	-0,88	0,00	32,57	-1,18	0,00	-0,31

Figura 121. Comparação gráfica dos valores de forças para cada teste – Lâmina n.º 1



Conforme se observa no gráfico da Figura 122, o erro relativo não chegou a atingir 5% no “ ϵ -structure” e 2% no aquisitor de referência, em relação aos valores conhecidos, com uma tendência de redução do erro quando ocorre o aumento da força, no caso do “ ϵ -structure”.

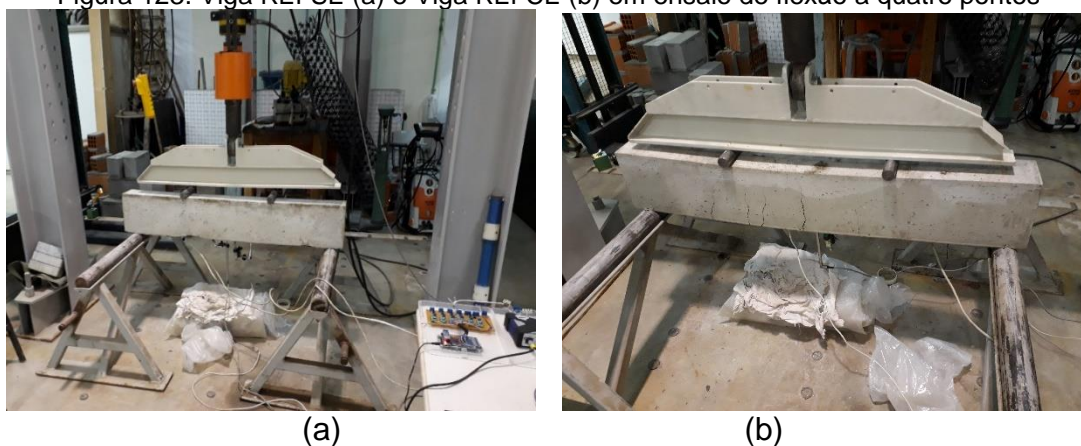


Por fim, considerando-se as referências contidas na Tabela 1, verificou-se que na comparação das leituras de deformação entre equipamentos ou com a referência analítica, obteve-se resultado próximo ao encontrado por outros pesquisadores. Contudo, os resultados de leituras de deslocamentos, apresentaram, em alguns casos, erros relativos superiores ao da literatura técnico-científica, quando as medições eram inferiores a 5,0mm, o que pode estar associado a diferenças significativas entre equipamentos, como por exemplo a conversão do AD do Arduino de 10bits e a do QuantumX de 24bits, o que não ocorreu nas medições de deformação, em que o módulo HX711 foi utilizado (que dispõem de um conversor AD de 24bits).

4.3 Ensaio de monitoramento da viga de concreto armado

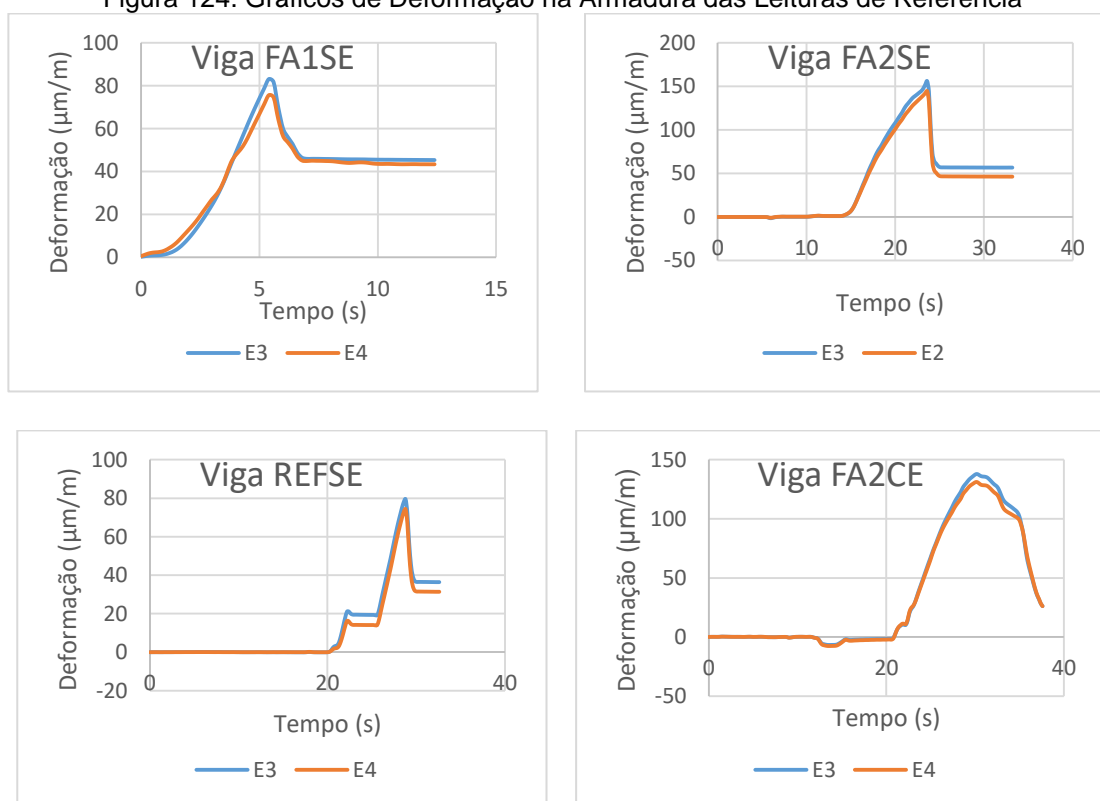
O monitoramento do ensaio de flexão da viga de concreto armado (Figura 123), foi iniciado com a aquisição de dados simultânea de dois extensômetros (posições E3 e E4 – instrumentação na armadura), pelo equipamento comercial de referência, no ensaio de cinco vigas, visando obter-se um padrão de dados de deformação entre ambos extensômetros, que em teoria apresentariam as mesmas leituras, por estarem localizados em pontos da viga que possuíam a mesma deformação entre si quando da aplicação das cargas.

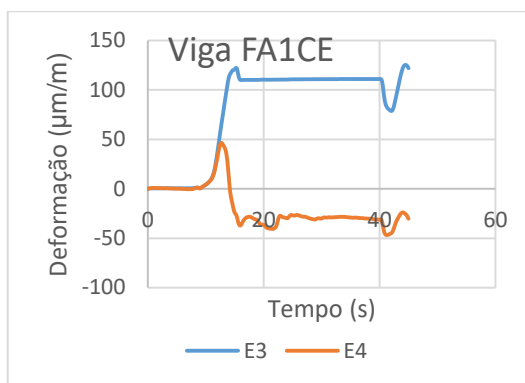
Figura 123. Viga REFSE (a) e Viga REFCE (b) em ensaio de flexão a quatro pontos



Esta comparação para fins de referência, resultou nos gráficos da Figura 124, numa frequência de 1,0Hz, cujos valores do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e média do erro relativo (MER) são apresentados na Tabela 9.

Figura 124. Gráficos de Deformação na Armadura das Leituras de Referência





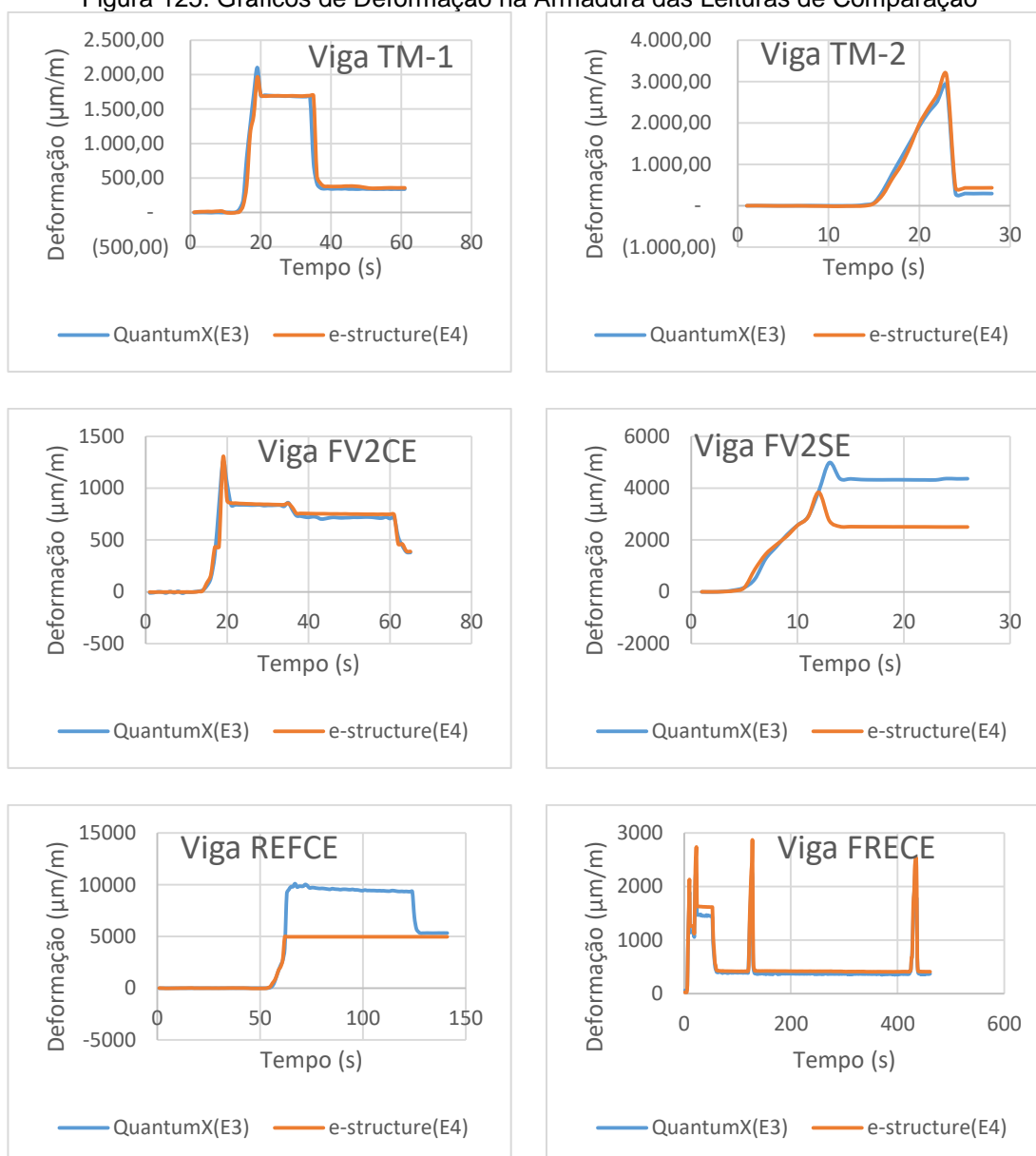
O ensaio da viga FA1CE, provavelmente foi prejudicado por algum erro do sistema, ou interferência externa, uma vez que ambos os sensores deveriam apresentar valores próximos de deformação, contudo em determinado momento um dos sensores apresentou deformações por compressão e não por tração da armadura, como era de se esperar. Já as demais vigas apresentaram um Coeficiente de Pearson de 0,988 ou superior, o que indica forte correlação. Porém, as leituras das deformações das vigas FA1SE e REFSE apresentaram a média do erro relativo um pouco superior a 20%.

Tabela 9. Coeficiente de C de Pearson (r) e MER dos ensaios com o mesmo equipamento

Viga	r	MER	
		%	Intervalo (s)
FA1-SE	0,998	21,44	1 a 8
FA2-SE	0,998	7,80	14 a 25
REF-SE	0,998	20,30	21 a 30
FA2-CE	1,000	4,30	21 a 35
FA1-CE	-0,697	41,94	10 a 15

Das outras seis vigas que tiveram os extensômetros (E3 e E4) lidos respectivamente pelo QuantumX e pelo “ ϵ -structure”, das quais os gráficos são apresentados na Figura 125, numa frequência de 1,0Hz, cujos valores do Coeficiente de Pearson e média do erro relativo constam da Tabela 10, quatro delas apresentaram Coeficiente de Pearson e média do erro relativo plenamente compatíveis com os ensaios de referência feitos somente com o aquisitor QuantumX.

Figura 125. Gráficos de Deformação na Armadura das Leituras de Comparação



O ensaio da viga REF-CE foi prejudicado, vez que não foi devidamente realizado o ajuste inicial do Fundo de Escala de leituras do “ ϵ -structure”, o que limitou as leituras de deformação à aproximadamente $5.000\mu\text{m}/\text{m}$.

Tabela 10. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER das Leituras de Comparação

Viga	r	MER	
		%	Intervalo (s)
TM-1	0,977	15,39	14 a 41
TM-2	0,995	15,80	15 a 24
FV2-CE	0,985	6,94	14 a 65
FV2-SE	0,900	31,79	4 a 25
REF-CE	0,951	45,26	55 a 128
FRE-CE	0,995	11,66	6 a 461

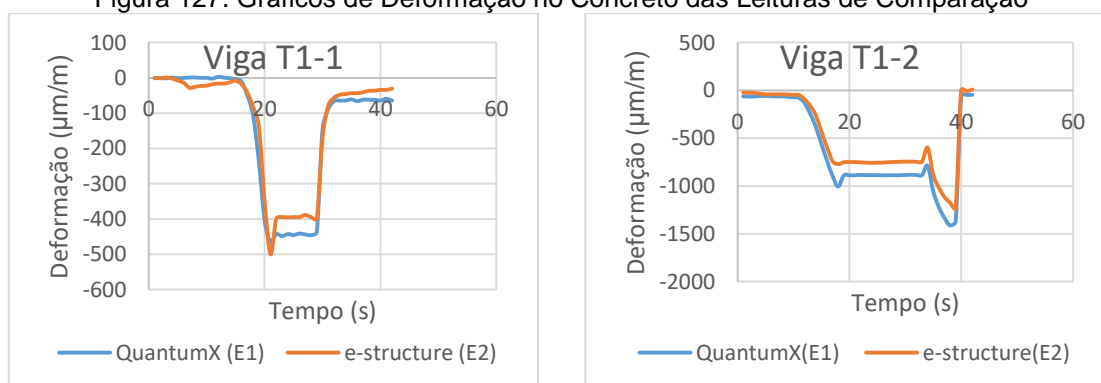
Outros três ensaios de monitoramento de deformações foram realizados (Figura 126), com a instrumentação direta da superfície do concreto da viga com os extensômetros E1 e E2. Tais leituras são apresentadas nos gráficos da Figura 127, numa frequência de 1,0Hz, bem como Coeficiente de Pearson e média do erro relativo junto a Tabela 11.

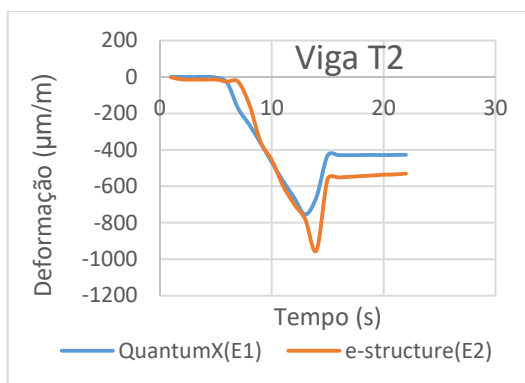
Figura 126. Ensaio de flexão à 4 pontos da viga T1



Como no ensaio da viga T1 a mesma não foi levada a fissuração ou ruptura, ou seja, permaneceu íntegra, um segundo ensaio foi realizado com a mesma, que a levou a ruptura.

Figura 127. Gráficos de Deformação no Concreto das Leituras de Comparação



Tabela 11. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER - Leituras de Comparação

Viga	r	MER	
		%	Intervalo (s)
T1-1	0,980	14,35	17 a 31
T1-2	0,996	18,21	12 a 39
T2	0,926	24,21	6 a 16

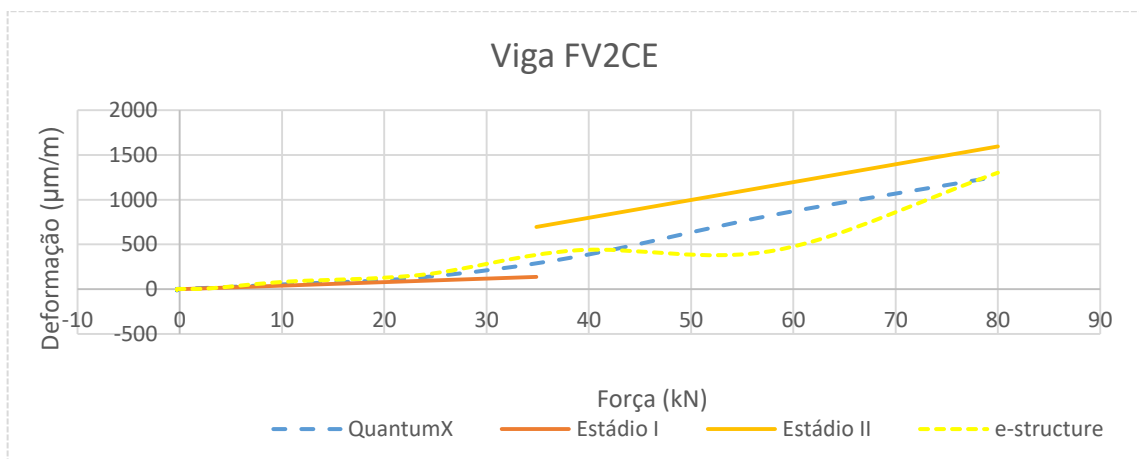
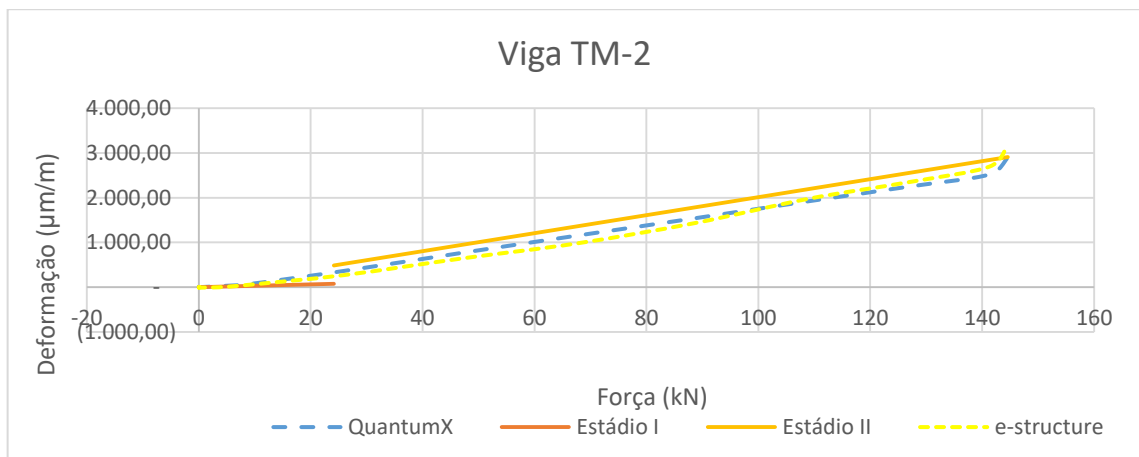
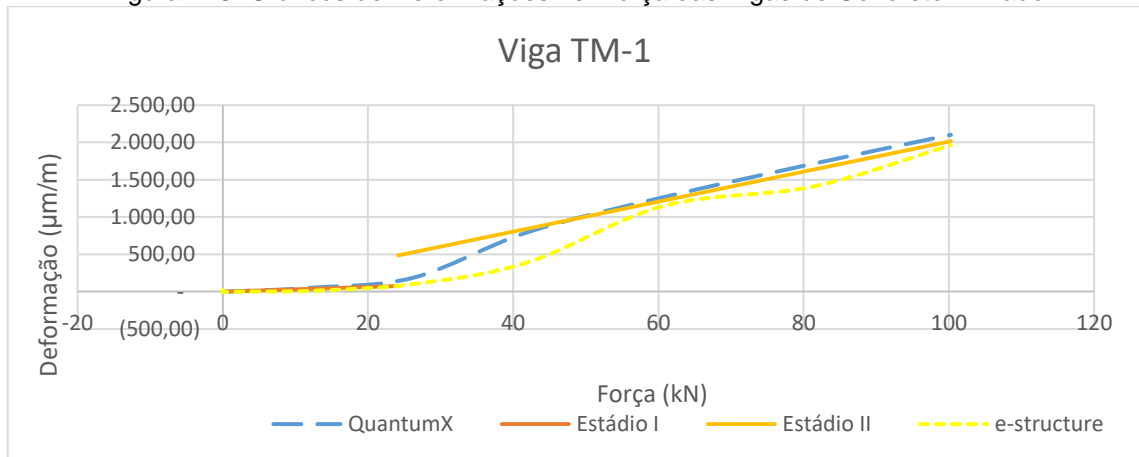
Dos oito ensaios de deformação (desconsiderando-se o resultado da viga REFCE), constatou-se que apenas dois casos ultrapassaram a média do erro relativo (MER) de 21,44% e apenas três casos ficaram inferior ao Coeficiente de Pearson (r) de 0,998, ambos obtidos nos ensaios de referência (somente com um equipamento) apresentados na Tabela 9.

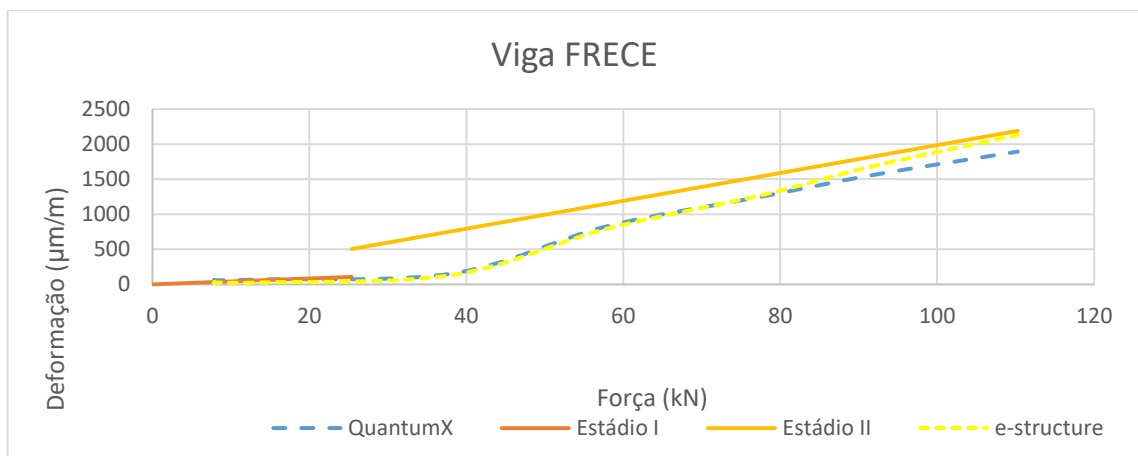
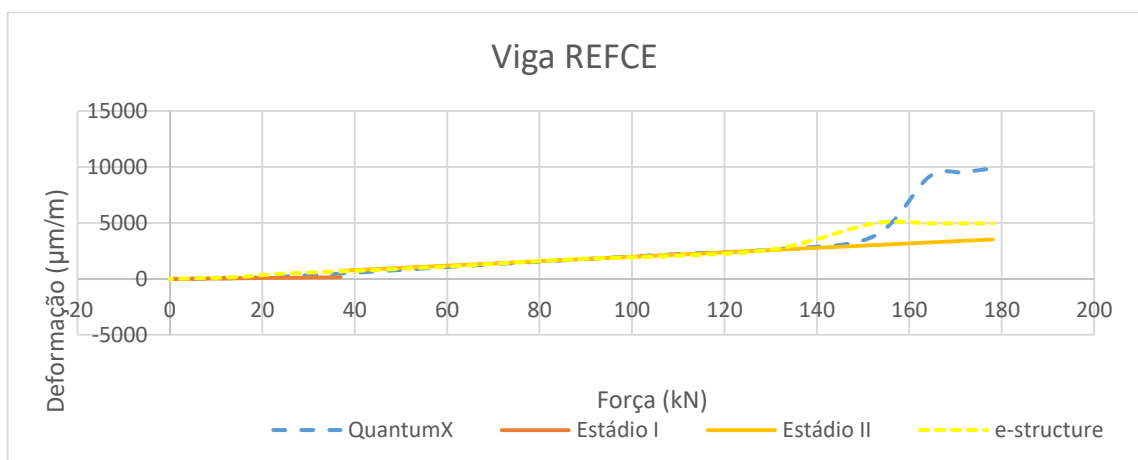
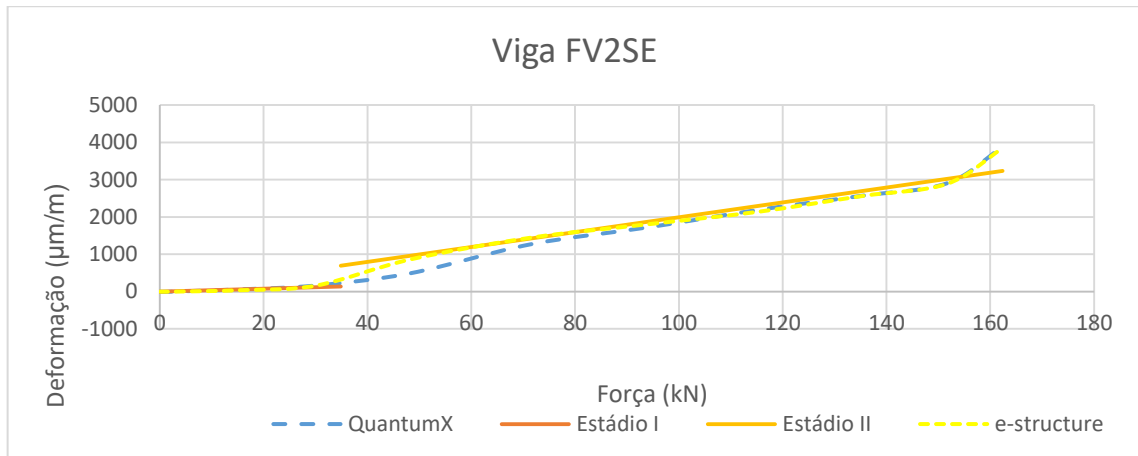
Em relação ao comparativo entre as deformações experimentais e analíticas ocorridas durante os Estádios I e II, as mesmas são apresentadas nos gráficos da Figura 128. As deformações determinadas analiticamente, levaram em consideração as propriedades dos concretos confeccionados para construção das vigas, conforme Tabela 12, mediante ensaios especificados no capítulo anterior.

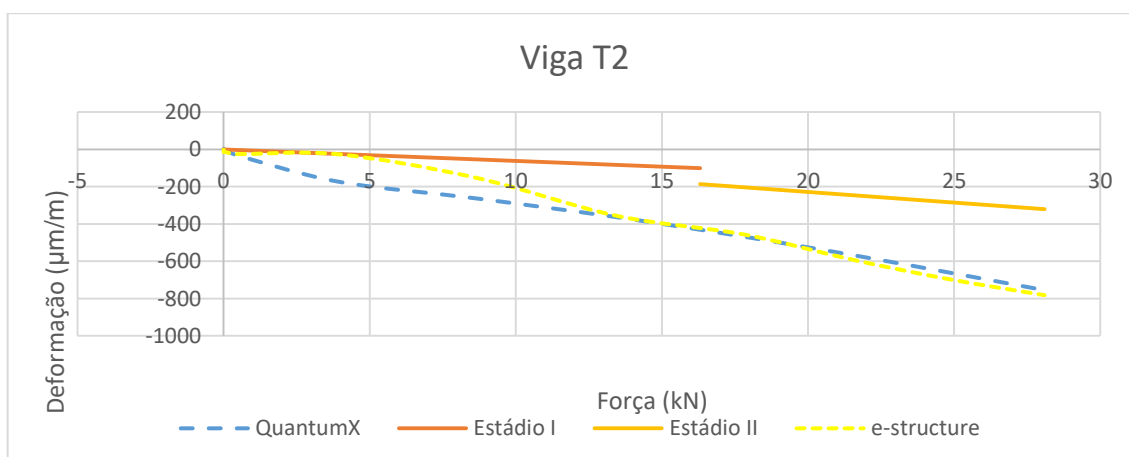
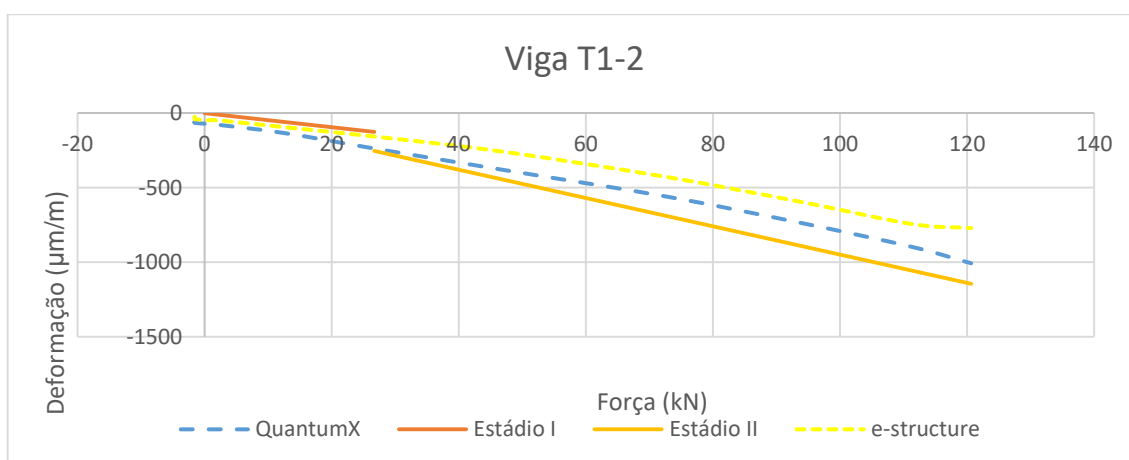
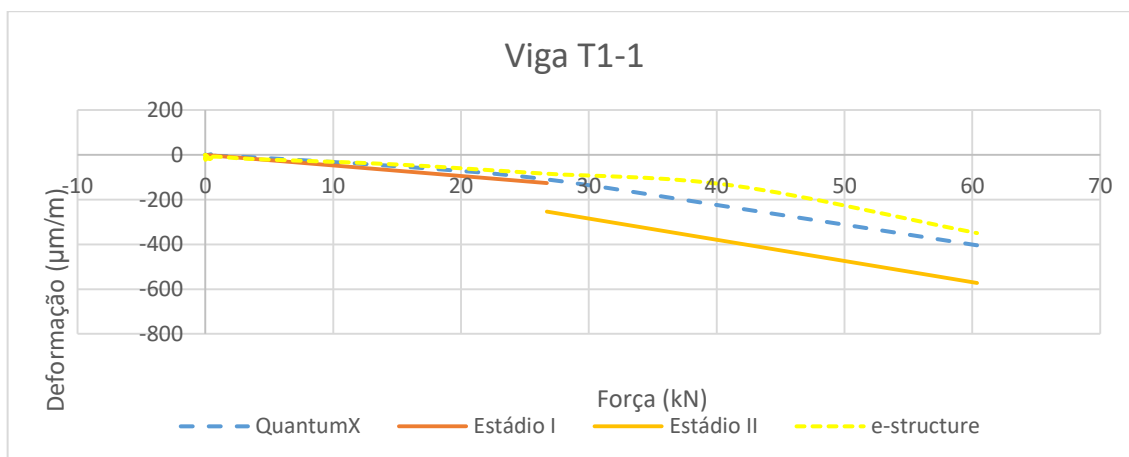
Tabela 12. Propriedades dos concretos das vigas

Viga	Fck (MPa)	Ftd (MPa)	Ec (MPa)
TM-1	34,27	3,11	33.710
TM-2	34,27	3,11	33.710
FV2CE	45,03	4,49	25.910
FV2SE	45,03	4,49	25.910
REFCE	43,08	4,76	23.960
FRECE	38,03	3,27	24.040
T1-1	30,54	3,44	34.630
T1-2	30,54	3,44	34.630
T2	23,29	2,10	25.950

Figura 128. Gráficos de Deformações vs. Força das Vigas de Concreto Armado



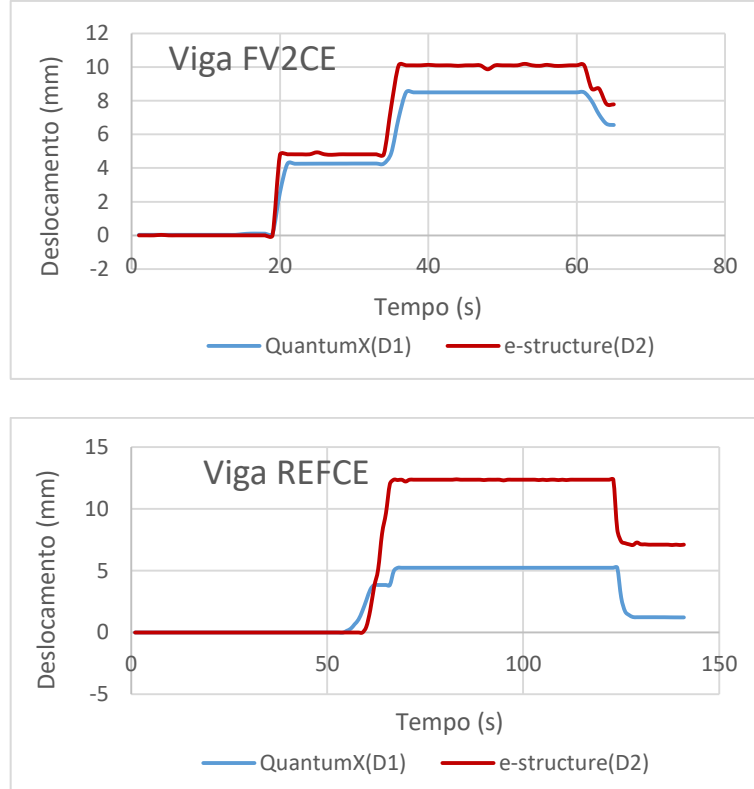




Na maior parte dos gráficos da Figura 128, foi possível constatar correspondência entre as leituras experimentais e os valores analíticos, inclusive com a transição do Estádio I para o Estádio II.

Quanto aos ensaios de deslocamentos, foram ensaiadas cinco vigas, sendo que os resultados gráficos das leituras, numa frequência de 1,0Hz, das vigas denominadas FV2CE e REFCE são apresentados nos gráficos da Figura 129.

Figura 129. Gráficos de Deslocamento das Leituras de Comparação

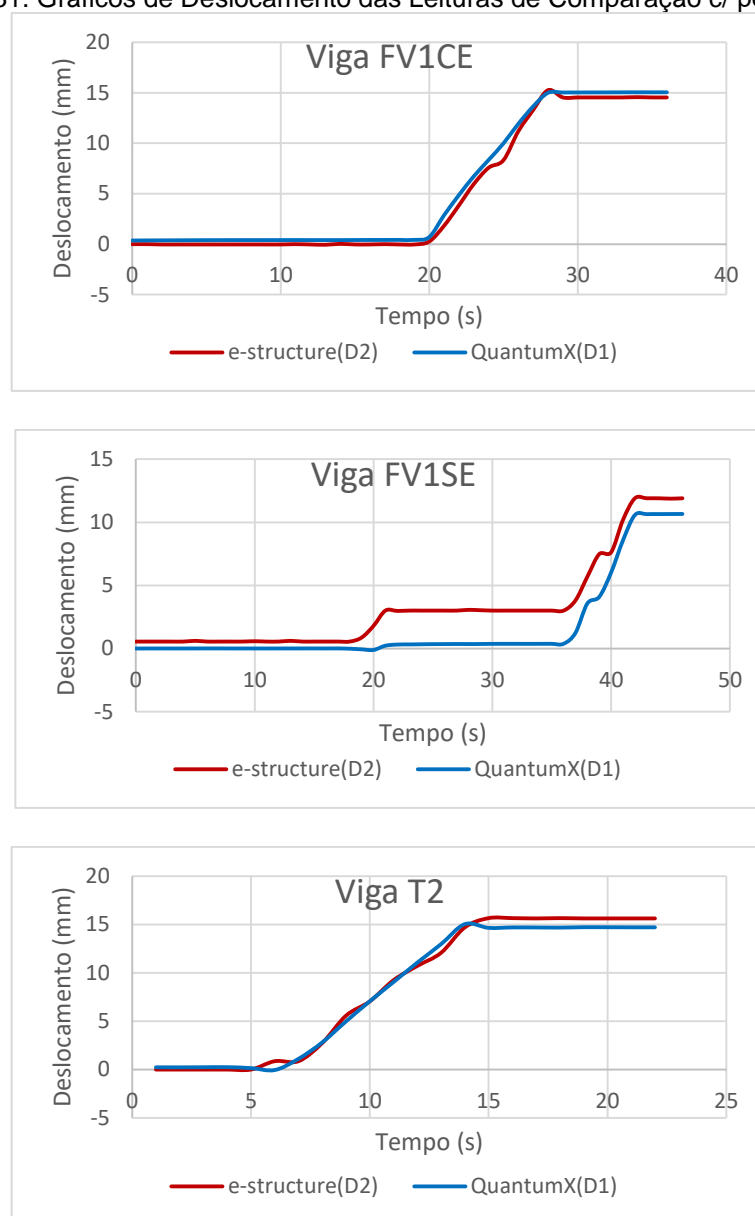


Entretanto o resultado do ensaio da viga REFCE não se mostrou satisfatório. A partir desta situação, foi feita a instalação de um perfil tipo "L", para contato dos transdutores de deslocamento instalados em tripé fixo, conforme Figura 130, sendo os gráficos de leituras apresentados na Figura 131.

Figura 130. Perfil metálico instalado na lateral das vigas e transdutores instalados em tripé



Figura 131. Gráficos de Deslocamento das Leituras de Comparação c/ perfil tipo “L”



Os resultados relativos ao Coeficiente de Pearson e média do erro relativo são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e MER

Viga	r	MER	
		%	Intervalo (s)
FV2CE	0,995	19,80	19 a 65
REFCE	0,952	143,10	60 a 128
FV1CE	0,999	11,45	21 a 37
FV1SE	0,963	155,34	36 a 47
T2	0,997	6,38	7 a 22

Das cinco vigas que tiveram os dados de deslocamento monitorados, três apresentaram resultados compatíveis com o encontrado na Revisão Bibliográfica, ou seja, com média do erro relativo de até 27,07%.

Em geral, tantos os Erros Relativos (%) encontrados nos comparativos de deformação, quanto os de deslocamentos, tiveram suas justificativas apontadas nos itens 4.1 e 4.2 desta Dissertação.

4.4 Ensaio de monitoramento do pilar de concreto armado

Foi realizado ensaio dinâmico, com a movimentação da ponte rolante, por quatro vezes sobre o pilar D3 (Figura 132), com a aquisição simultânea das leituras dos dois extensômetros, mediante ambos sistemas (QuantumX e “ ϵ -structure”), sendo que em ambos os casos, foi possível constatar os quatro principais momentos em que ocorre a maior deformação da armadura por compressão do pilar, em função da posição da ponte rolante sobre o mesmo.

Figura 132 – Ponte Rolante sobre Pilar D3 durante ensaio

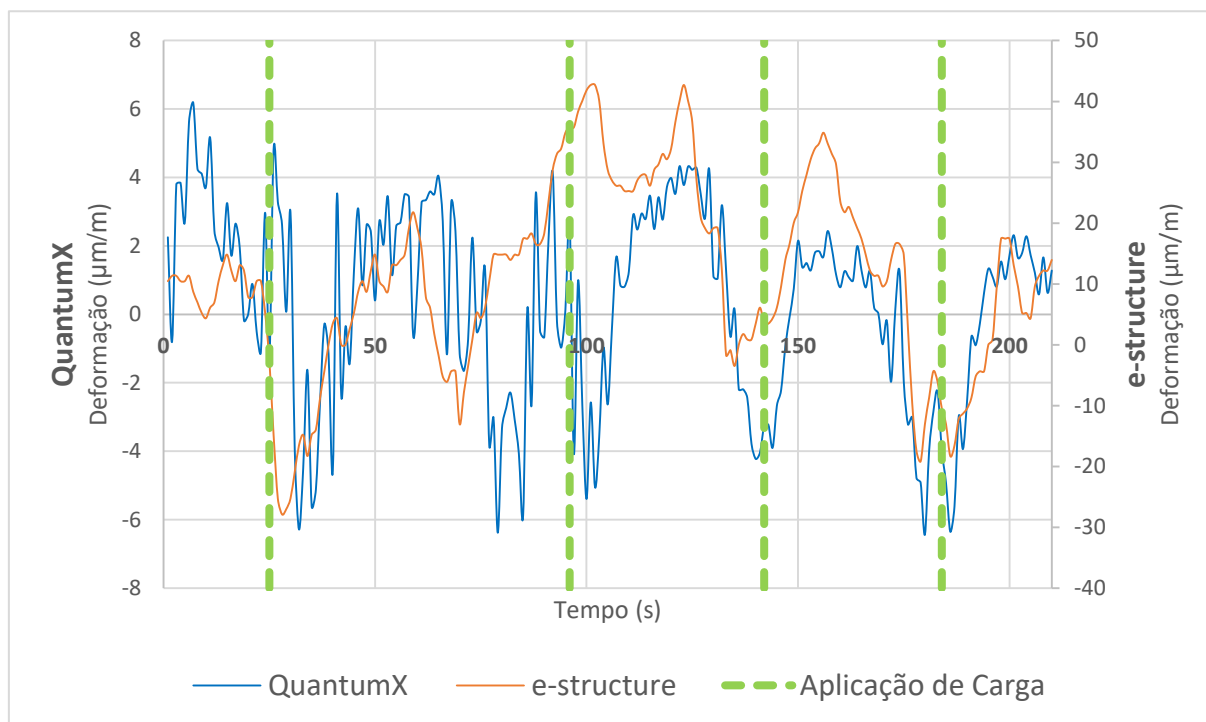


Todavia, verificou-se que os valores de deformação adquiridos pelo sistema de referência foram extremamente baixos, ou seja, de $-4,22\mu m/m$ a $-6,44\mu m/m$, os quais são inferiores ao desvio padrão constatado no teste de calibragem do módulo HX711, durante esta pesquisa, que foi de $\pm 10,27\mu m/m$. Estas pequenas deformações, provavelmente se devem ao fato do pilar ter recebido apenas parte do peso próprio da ponte rolante, sem carregamento (içamento) na mesma durante ensaio.

No caso do sistema “ ϵ -structure”, a deformação da armadura, quando dos instantes de aplicação de carga da ponte sobre o pilar, ficou entre $-3,49\mu\text{m}/\text{m}$ a $27,89\mu\text{m}/\text{m}$, ou seja, maiores que do sistema de referência.

Por meio de sobreposição dos gráficos das leituras de deformação (Figura 133), com ajuste da escala do eixo “y” (inserção de duas escalas para o mesmo eixo – direita e esquerda) das deformações coletadas pelos dois sistemas, constatou-se que em pelo menos em três dos quatro momentos de aplicação da carga da ponte rolante, as deformações ocorreram em períodos compatíveis entre os dois sistemas, ainda que as intensidades das leituras de deformação tenham apresentado diferença significativa entre si.

Figura 133. Sobreposição das leituras, com ajuste de escala do eixo “y”



O ajuste de escala do eixo “y” entre os sistemas de aquisição, corresponde a uma relação de aproximadamente cinco vezes menor entre a leitura de intensidade das deformações aquisitadas pelos dois sistemas.

5. CONCLUSÃO

Em ensaios de curta duração, o módulo amplificador e conversor HX711, combinado com o *hardware* da plataforma Arduino, se mostraram altamente eficientes à proposta de monitoramento de integridade estrutural de baixo custo, mediante aquisição, controle e transmissão de dados, especialmente aqueles relativos às deformações e forças.

O aplicativo *mobile* desenvolvido especificamente para o sistema de monitoramento proposto, por meio da plataforma *MIT App Inventor*, possibilitou a implementação de recursos necessários ao sistema, como por exemplo, os procedimentos de calibração indireta, exibição gráfica de resultados, bem como a transmissão em tempo real via *internet*, sem que se fosse necessário utilizar recursos computacionais complexos e de difícil programação e utilização.

Quanto às leituras de deformações das vigas de concreto armado ensaiadas a flexão, as variações das mesmas entre os equipamentos utilizados ficaram dentro do esperado, visto inclusive se tratar do uso de extensômetros em dois pontos distintos de uma mesma viga de concreto, pontos estes que na prática não necessariamente possuem a mesma deformação. Tanto as leituras de deformação quanto as leituras de deslocamento, apresentaram um ótimo sincronismo temporal entre os equipamentos, ou seja, sem atrasos em relação à resposta estrutural.

Já no caso das leituras de deformações da armadura de um dos pilares de sustentação da estrutura da ponte rolante, foi observado que o sistema proposto não conseguiu adquirir as deformações na mesma intensidade que as coletadas pelo equipamento de referência, entretanto, constatou-se que houve resposta do sistema, compatível com os momentos em que houve o posicionamento da ponte rolante sobre o pilar analisado.

5.1 Pesquisas Futuras

O sistema proposto necessita de outros estudos não abrangidos nesta pesquisa, tais como avaliação da influência causada pela variação de temperatura em medições de médio e longo prazo, bem como avaliação da transmissão de dados na comunicação sem fio via *Bluetooth*, especialmente quanto à transmissão de pacotes de dados.

Por fim, acredita-se que melhores resultados possam ser obtidos mediante aprimoramento do *hardware* proposto, ou seja, no caso de medições de deformação, por exemplo, com a utilização de resistores de maior precisão e baixa variabilidade quando da variação de temperatura, bem como com a utilização de fontes de alimentação de energia com menor oscilação. Já no caso da medição de deslocamentos, a utilização de um conversor analógico-digital (AD) superior à do Arduino que possui uma taxa de conversão AD de 10 *bits*, enquanto que o equipamento comercial de referência opera a uma taxa de 24 *bits*, pode também colaborar com a melhoria dos resultados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, E. A. **Extensometria óptica por Moiré geométrico digital para análise de tensões no plano**. [s.l.] Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

ALMEIDA, L. C. **Identificação de Parâmetros Estruturais com Emprego De Análise Inversa**. [s.l.] Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

ANDERSON, C. et al. **Effect of Rim Width and Tire Size on Casing Strain in Bicycle Tires**. Union University, Jackson, , 2016. Disponível em: <http://www.flocycling.com/FLO_Cycling_Union_University_Casing_Tension_Study.pdf>

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. DE. **Extensometria Básica**. Apostila. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, , 2004.

ANDRADE, R. G. M. DE. **Monitoramento de Curta Duração de uma Ponte Curva**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ANDRADE, R. G. M. DE; TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N. Comparativo e calibração de modelos numéricos a partir de dados de monitoramento de uma ponte rodoviária curva de concreto armado. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 1, p. 121–138, 2013.

APÓSTOLO, D. E. F. M. **Soluções de Comunicação para Controle e Monitorização de Motores**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2015.

ARDUINO. **Products**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Products>>. Acesso em: 22 out. 2017.

ARDUINO. **What is Arduino?** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

ASSAN, A. E. **Resistência dos Materiais. Volume 1**. 1ª ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2010.

ASSIS, W. S. DE. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil**. [s.l.] Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**

- **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ATAÍDE, R. W. R. **Projeto e Implementação de um Nodo Sensor para Aquisição de Sinais de Extensômetros em Redes de Sensores Sem Fio Aplicado ao Monitoramento de Deformações em Estruturas**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

BALBINOT, A. **Instrumentação e Fundamentos de Medida - Volume 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas - Volume 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BARALDI, S. **Estensimetri**. Apostila, Istituto Tecnico Industriale Statale "Odone Belluzzi", Bologna, , 2010. Disponível em: <https://ampio.belluzzifioravanti.it/file.php/351/progetto_scelte_5b1/Estensimetri-relazioni.pdf>

BARONTINI, A. et al. An overview on nature-inspired optimization algorithms for Structural Health Monitoring of historical buildings. **Procedia Engineering**, v. 199, p. 3320–3325, 2017.

BARRETO, C. A. D. **Desenvolvimento de um Sistema de Nivelamento Hidrostático Ultra-sônico Móvel Relatório**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2015.

BARROS, A. R. D. B. **Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensável Reforçado com Fibras de Aço**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Pearson Makron, 1995.

BREMER, K. et al. Fibre Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Building Structures. **Procedia Technology**, v. 26, p. 524–529, 2016.

CASCIATI, S.; VECE, M. Real-time monitoring system for local storage and data transmission by remote control. **Advances in Engineering Software**, v. 112, p. 46–53, 2017.

CAVACO, M. A. M. **Metrologia - Parte II**. Apostila. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, , 2002.

CHANDRASEKARAN, S.; CHITHAMBARAM, T.; KHADER, S. A. Structural Health Monitoring of Offshore Structures Using Wireless Sensor Networking under Operational and Environmental Variability. **International Journal of Environmental**

and **Ecological Engineering**, v. 10, n. 1, p. 33–39, 2016.

COMISU, C.-C. et al. **Structural health monitoring of bridges**. Roma: Elsevier B.V., 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.472>>

CRAIDE, S. **Estudos alertavam sobre necessidade de manutenção de viaduto que caiu no DF**. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-02/estudos-alertavam-necessidade-de-manutencao-de-viaduto-que-caiu-no-df>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

DEPARI, A. et al. Development and evaluation of a WSN for real-time structural health monitoring and testing. **Procedia Engineering**, v. 87, p. 680–683, 2014.

DINIS, F. J. V. D. **Sistema de instrumentação de baixo custo compatível com o LabVIEW**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira, Funchal, 2010.

DIPOVA, N. Design of Low Cost and Innovative Data Acquisition in Soil Mechanics Testing Using Open Source Hardware. **The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics**, v. 1, p. 104–110, 10 dez. 2017.

FEDERICI, F. et al. Design of wireless sensor nodes for structural health monitoring applications. **Procedia Engineering**, v. 87, p. 1298–1301, 2014.

FERNANDES, S. A. **Análise das Deformações do Concreto e do Comportamento de Vigas Submetidas à Flexão Simples**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

FERREIRA, T. T.; AZZONI, C. R. Arranjos institucionais e investimento em infraestrutura no Brasil. **Revista do BNDES**, n. 35, p. 37–85, 2011.

FRANKOVSKÝ, P.; OSTERTAG, O.; OSTERTAGOVÁ, E. Automation of experiments in photoelasticity. **Procedia Engineering**, v. 48, p. 153–157, 2012.

GALANTE, A. C.; GARCIA, R. F. **Sistema de Aquisição de Dados de Sensores de Baixo Custo Baseado no Arduíno**. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- ConBAP 2014. **Anais...**São Pedro: 2014. Disponível em: <<http://www.sbea.org.br/conbap/2014/trabalhos/R0073-1.PDF>>

GASCO, F. et al. Wireless strain measurement for structural testing and health monitoring of carbon fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 42, n. 9, p. 1263–1274, 2011.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. **Mecânica dos Materiais**. 7^a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

GOMES, R. A. **Desenvolvimento e Validação de Metodologia para Automação da Calibração de Multímetros Digitais**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GORBUNOV, A. et al. Development of Human Balance Capability Testing Prototype. **Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference**, v. 3, p. 62, 2017.

GUADAGNINI, P. H.; SARAIVA, F.; ELISABETH, V. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. **Lat. Am. J. Phys. Educ.**, v. 5, p. 753–762, 2011.

GULAL, E. Structural deformations analysis by means of Kalman-filtering. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 1, p. 98–113, mar. 2013.

HAJDUKIEWICZ, M. et al. Real-time monitoring framework to investigate the environmental and structural performance of buildings. **Building and Environment**, v. 86, p. 1–16, 2015.

HERRASTI, Z. et al. **Wireless Sensor Nodes for Acceleration, Strain and Temperature Measurements**. 30th Eurosensors Conference. **Anais...Budapest: Elsevier**, 2016Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.484>>

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

IDOETA, I. V.; CAPUANO, F. G. **Elementos de Eletrônica Digital**. 40ª ed. São Paulo: Érica, 2008.

KALANGE, S. H. et al. Smart Retailing Using IOT. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 11, p. 263–268, 2017.

KENEDI, P. P.; ALVARÃES, C. P. **A low cost load cell approach**. ENEBI 2015 – Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica. **Anais...Uberlândia: 2017**

KIT, M. L. **Study of Linear Tribological Wear**. Mechanical System Design Conference, 1st May 2016. **Anais...Pekan, Malaysia: 2016**Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/299430237_STUDY_OF_LINEAR_TRIBOLOGICAL_WEAR_TESTER>

KLIKOWICZ, P.; SALAMAK, M.; POPRAWA, G. Structural Health Monitoring of Urban Structures. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 958–962, 2016.

KÖPPE, E.; BARTHOLMAI, M. Wireless sensor network with temperature compensated measuring technology for long-term structural health monitoring of buildings and infrastructures. **Procedia Engineering**, v. 25, p. 1032–1036, 2011.

KROMANIS, R.; KRIPAKARAN, P. Advanced Engineering Informatics Data-driven approaches for measurement interpretation : analysing integrated thermal and vehicular response in bridge structural health monitoring. **Advanced Engineering Informatics**, v. 34, p. 46–59, 2017.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **Relatorio-SB-DO-1963-Vol-1 dspace.pdf**. Lisboa: [s.n.]. Disponível em: <http://repositorio.lnec.pt:8080/bitstream/123456789/1007505/1/Relatorio-SB-DO-1963-Vol-1_dspace.pdf>.

LAIBLE, M. **Electrical Measurement of Mechanical Quantities**. Seminar Papers. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Darmstadt, , 2000.

LIANG, D.; YUAN, S. Structural health monitoring system based on multi-agent coordination and fusion for large structure. **Advances in Engineering Software**, v. 86, p. 1–12, 2015.

LORENZI, A. **Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto**. 11º Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas. **Anais...São Leopoldo**: 2015

LORENZONI, F. et al. Uncertainty quantification in structural health monitoring: Applications on cultural heritage buildings. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 66–67, p. 268–281, 2016.

MACIEL, R. DA S.; VELOSO, L. A. C. M. Utilização de Sensores à Base de Fibra Óptica visando o Monitoramento de Grandes Estruturas na Engenharia Civil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, n. 4, p. 105–114, 2013.

MAGALHÃES JÚNIOR, P. A. A.; MAGALHÃES, C. A.; MAGALHÃES, A. L. M. A. Computational methods of phase shifting to stress measurement with photoelasticity using plane polariscope. **Optik**, v. 130, p. 213–226, 2017.

MARAN, A. P. et al. Análise da espessura do cobrimento de armadura em lajes com diferentes distanciamentos entre espaçadores e pontos de amarração. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, 2015.

MARTINS, J. V. R. **Análise do Comportamento Mecânico de Concretos Reforçados com Fibras e Adição de Resíduo de Fresado Asfáltico**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec Editora, 2011.

MEDEIROS, P. V. M. DE. **Políticas de Infraestrutura de Transportes no**

Brasil: Investimentos, Multimodalidade e Configuração Regional no Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT). [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

MELO, L. R. T. **Monitoração de Modelos Físicos Reduzidos para Investigação do Comportamento de Estruturas em Escala Real.** [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NASREEN, S.; ROKUNUZZAMAN, M.; BISWAS, S. **Assessment of Surface Roughness Using LVDT: A Convenient and Inexpensive Way of Measuring Surface Irregularities.** International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2017 (ICMIME2017). **Anais...**Rajshahi: 2017

NGUYEN, V. H. et al. Static load testing with temperature compensation for structural health monitoring of bridges. **Engineering Structures**, v. 127, p. 700–718, 2016.

NI, Y. Q. et al. **Condition assessment of bridge deck truss using in-service monitoring data of strain.** Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. **Anais...**Philadelphia: 2010Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856721411&partnerID=40&md5=a9b2f5397b8580f8621257040de87f04%5Cnhttp://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/b10430>>

NUNES, F. H. F. **Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Rede de Sensores.** [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

OH, B. K. et al. Evolutionary learning based sustainable strain sensing model for structural health monitoring of high-rise buildings. **Applied Soft Computing**, v. 58, p. 576–585, 2017.

OWEN, J. S.; PEARSON, S. R. **The Use of Dynamic Data for the Structural Health Monitoring of Bridges.** 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom. **Anais...**Nottingham: 2004

PAULINO, H. L. **Curso: Aplicação de Strain Gages Rosetas na Análise Experimental de Tensões e Células de Carga e Transdutores de Pressão e Torque.** Apostila. Strain Gage Assessoria em Extensometria Ltda., Campinas, , 2011.

PEREIRA, A. M.; SANTOS, A. C. F.; AMORIM, H. S. Estatística de

contagem com a plataforma Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 4, dez. 2016.

PEREIRA, A.; PUGA, F. P. **Infraestrutura no Brasil : ajustando o foco**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Rio de Janeiro, , 2016. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9914>>

PEROSA, E. A. **Desenvolvimento de um Programa Computacional Visando o Aprimoramento do Uso da Técnica da Fotoelasticidade**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PERRY, C. C.; LISSNER, H. R. **The Strain Gage Primer**. Second ed. New York: McGraw-Hil Book Company, 1962.

PERTENCE JUNIOR, A.; PERTENCE, A. EXTENSÔMETROS EM ENGENHARIA CIVIL: TEORIA E APLICAÇÕES. **Construindo**, v. 2, n. 1, p. 24–26, 2010.

PETROCINO, E. A. **Monitoramento de Integridade Estrutural e de Sistemas Utilizando Dispositivos de Baixo Custo**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto de Projeto de Edifícios**. Apostila. Universidade de São Paulo, São Carlos, , 2007.

PINTO, C. S.; DEGASPERI, F. T. **Desenvolvimento de uma interface para aquisição de dados experimentais utilizando o microcontrolador Arduino UNO**. X Workshop de Pós-Graduação e Pesquisa do Centro Paula Souza. **Anais...**São Paulo: 2015Disponível em: <http://www.cps.sp.gov.br/pos-graduacao/workshop-de-pos-graduacao-e-pesquisa/010-workshop-2015/workshop/trabalhos/Sistemas_Produtivos/Desenv_Tecn_Sist_Prod/Desenv_de_Interface_aquis_dados_experimentais.pdf>

PRAVIA, Z. M. C.; BRAIDO, J. D. Medição de características de vibração de pontes de concreto usando telefonia móvel. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, p. 721–743, 2015.

REGINATO, L. A. et al. **Monitoramento de estruturas de concreto armado através de ensaios ultrassônicos**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2016. **Anais...**Belém: 2016Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/301661041_Monitoramento_de_estruturas_de_concreto_armado_atraves_de_ensaios_ultrassonicos>

RIBEIRO, F. **Sensor inteligente em fibra ótica para localização de deformações em estruturas planas.** [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RILEY, W. F.; STURGES, L. D.; MORRIS, D. H. **Mecânica dos Materiais.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

SADD, M. H. **Elasticity: theory, applications, and numerics.** Oxford: Academic Press, 2004.

SAMPAIO, C. D. C. **Comparação entre a modelagem numérica e experimental da deformação por fluência em vigas de concreto armado.** [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SANTOS, A. G. F. DA S. et al. **Levantamento das Manifestações Patológicas de uma Ponte de Concreto Armado junto as suas Possíveis Técnicas de Recuperação Santos.** Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. **Anais...Recife: 2017**Disponível em: <<http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR/article/view/621>>

SANTOS, L. O. **Monitoramento e ensaio de pontes.** VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. **Anais...Rio de Janeiro: 2014**Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos/trab_110.pdf>

SCHULER, C. **Eletrônica I.** 7ª ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.

SHALINI, R. et al. **Hmv load speculator.** International Conference On Innovative Trends In Engineering And Technology. **Anais...Chennai: 2017**Disponível em: <<http://www.icitet.com/Vol1/ICITET17005.pdf>>

SILVA, A.; VARANIS, M.; MERELES, A. G. **A consistent experimental approach for strain measurement: Two case studies.** XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...Florianópolis: 2017**Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CILAMCE2017-0718>>

SILVA, W. J. S. DA; ASSIS, W. S. DE. **Monitoração Estrutural e Instrumentação Virtual Aplicados ao Ensino Experimental de Engenharia Civil.** XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. **Anais...Belém: 2012**

SILVA, R. S. Y. R. C. **Monitoramento e Identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet.** [s.l.] Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SILVEIRA, S. **Desenvolvimento de um Kit Experimental com Arduino para o Ensino de Física Moderna no Ensino Médio**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

SINGER, J.; ARBOCZ, J.; WELLER, T. Mechanical Strain Gages. In: **Buckling Experiments, Shells, Built-up Structures, Composites and Additional Topics**. New York: John Wiley & Sons, INC., 1998. p. 1672–1673.

SOUSA, N. M. et al. **Estudo de Caso: Avaliação Patológica da Ponte Rodoviária da Rua José Borba Filho, Monteiro - PB**. Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. **Anais...**Recife: 2017Disponível em: <<http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR/article/view/597>>

TEIXEIRA, B. O. S.; TÔRRES, L. A. B.; AGUIRRE, L. A. Filtragem de kalman com restrições para sistemas não-lineares: revisão e novos resultados. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 21, n. 2, p. 127–146, abr. 2010.

TIMOSHENKO, S. P. **History of Strength of Materials**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1953.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais - Volume 1**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1976.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. . **Teoria da Elasticidade**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

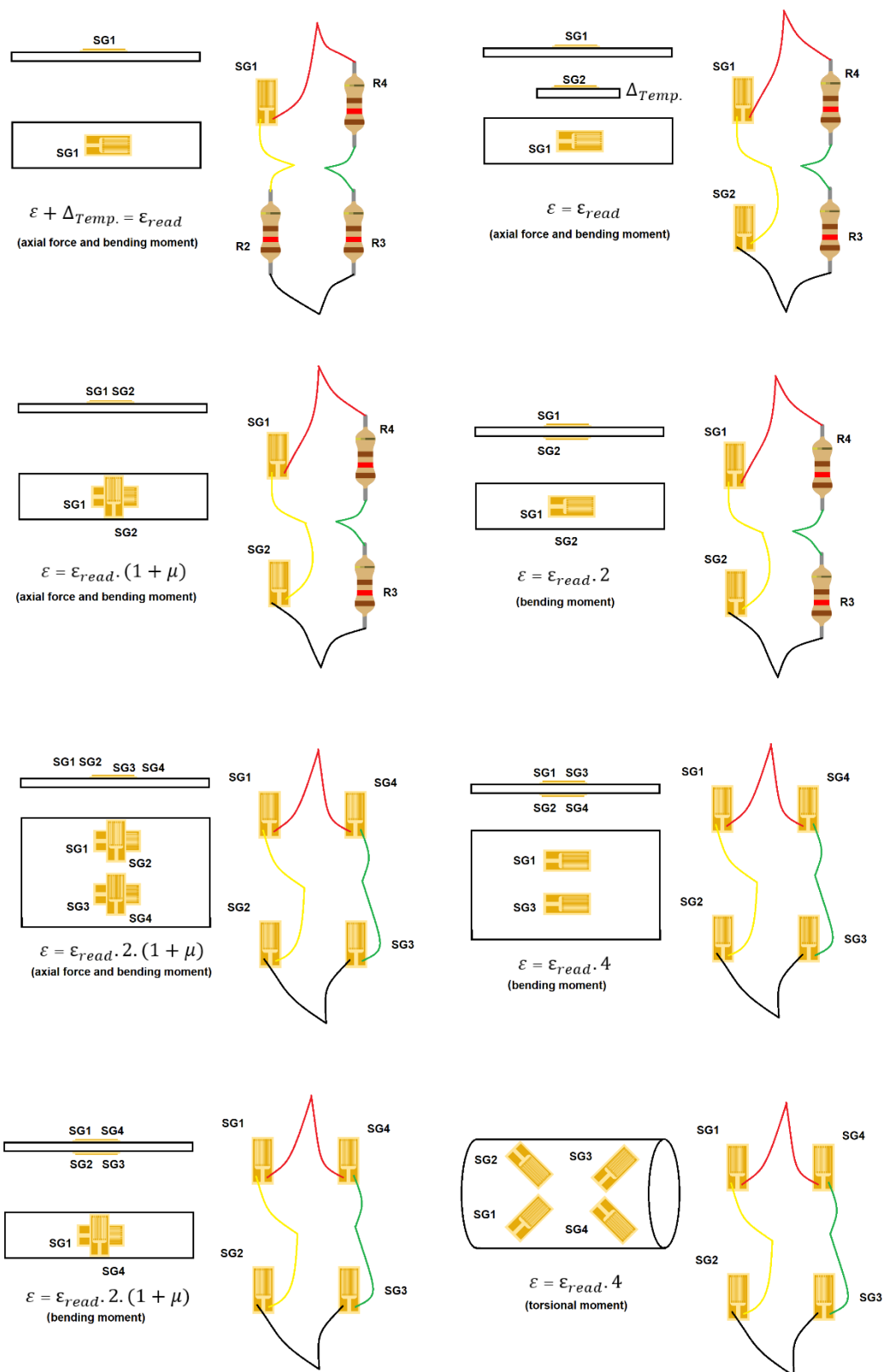
VALENTE, R.; CANCIAN, N. **Viaduto de principal via de Brasília desaba; não há relato de vítimas**. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/02/trecho-de-principal-via-expressa-de-brasilia-desaba.shtml>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

VELOSO, J. A. DE C. N. L. A. C. M. Monitoramento de pontes em concreto armado da estrada de ferro Carajás - Brasil. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural Monitoramento**, v. 13, n. 1, p. 7–25, 2016.

WORDEN, K.; CROSS, E. J. On switching response surface models, with applications to the structural health monitoring of bridges. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 139–156, 2017.

YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. Seventh ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

7. APÊNDICE A – Exemplos de diferentes configurações de Ponte de Wheatstone, com às respectivas equações de cálculo de deformação (ϵ).



(Baseado em Laible, 2000)