

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JONAS RAFAEL DUARTE CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS TÉRMICOS NAS DEFORMAÇÕES
EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS NO MONITORAMENTO DE PONTES**

Maceió
2018

JONAS RAFAEL DUARTE CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS TÉRMICOS NAS DEFORMAÇÕES
EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS NO MONITORAMENTO DE PONTES**

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

Orientador: Prof. Dr. Wayne Santos de Assis

Maceió
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

C376a Cavalcante, Jonas Rafael Duarte.
Avaliação da influência dos efeitos térmicos nas deformações em elementos estruturais no monitoramento de pontes / Jonas Rafael Duarte Cavalcante. - 2019.
84 f.: il. color., graf., tabs.

Orientador: Wayne Santos de Assis.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 81-84.

1. Pontes. 2. Controle de temperatura. 3. Wavelets (Matemática). 4. Extensômetros. I. Título.

CDU: 624.2/.8



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS TÉRMICOS NAS DEFORMAÇÕES EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

JONAS RAFAEL DUARTE CAVALCANTE

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 03 do mês de dezembro do ano de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis
Orientador – PPGEC/UFAL

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
(Avaliador Interno - CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
(Avaliador Externo – UNICAMP)



AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar a Deus, por iluminar sempre meu caminho e me dar força e coragem durante toda essa caminhada.

Aos meus pais, Lelo e Ivanise, pelo amor e incentivo e por jamais deixarem de acreditar em mim e nunca medirem esforços para me apoiar a chegar até aqui.

À minha irmã Jullyane, que além de toda fraternidade também me presenteou pondo um anjo em minha vida, minha sobrinha Julia.

À minha namorada Renata, por toda compreensão e por tornar minha vida cada dia mais feliz.

Agradeço aos meus familiares que sempre acreditaram muito no meu trabalho e me ajudaram no que foi preciso.

Ao meu orientador, professor Wayne Santos de Assis, por dedicar-se junto comigo na elaboração desta dissertação, cedendo seus conhecimentos e estando sempre presente e disponível para que este trabalho fosse concluído.

Ao Doutor Christian Kohler por toda ajuda e disponibilidade durante os intermináveis ensaios no LEMA.

A todo o corpo docente que compõe o Mestrado em Estruturas, pela convivência e por transmitir seus ensinamentos. Em especial aos professores Eduardo Toledo, Flávio Barboza e Severino Marques, que foram muito importantes em momentos significativos durante o curso. A todos os demais professores que de várias formas contribuíram com a minha formação profissional.

A toda equipe do Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais – LEM da Poli - USP, em especial aos professores Alberto Colombo e Túlio Bittencourt, por todo auxílio e disponibilidade durante o período de mobilidade acadêmica.

À CAPES pela bolsa fornecida durante o período necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Felipe Pedrosa, Ricardo Vital, Victor Falcão, Bruna Camerino e Isadora Nogueira, companheiros dos grandes desafios enfrentados nesse período.

A todos os colegas que, de alguma forma, contribuíram com sua companhia e ficaram felizes com as minhas conquistas.

Àqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho visa complementar e aprofundar conhecimentos relativos à avaliação da influência das ações térmico-ambientais nas deformações observadas em elementos estruturais. Um problema comum enfrentado no monitoramento estrutural desses elementos é a distinção entre os valores de deformação obtidos no elemento instrumentado devido a mudança de temperatura, dos valores de deformação provenientes de outras ações, inclusive pela pouca quantidade de material disponível que aborde o problema. Atualmente, com a tendência crescente da elaboração de projetos de obras de arte, em particular de passarelas, pontes e viadutos, cada vez mais arrojados, fazendo uso de estruturas com geometrias complexas, com necessidade de vencer vãos cada vez mais longos e sob condições climáticas que interferem diretamente no desempenho em serviço dos elementos estruturais, estudos da interferência térmica no comportamento da estrutura se fazem necessários, para a devida quantificação desses efeitos. Com esse intuito, realizou-se a identificação e distinção dos níveis de deformação em estruturas previamente instrumentadas e em regimes de carregamento particulares, tanto do ponto de vista mecânico quanto térmico. Foi realizado o tratamento dos dados de deformação através de técnicas de tratamento de sinais, bem como análise estatística. Os elementos estruturais abordados nesse trabalho compõem partes de pontes executadas tanto em concreto armado como em aço. Para validar a proposta, foram realizados ensaios em laboratório com um corpo de prova prismático submetido a carga mecânica constante e a variação térmica ambiente. Foi feito uso da transformada wavelet e da correlação estatística no tratamento dos dados, visando interpretar os níveis de deformação observados e eliminar ruídos inerentes ao processo. Os melhores resultados foram encontrados utilizando as *wavelets*-mães de Daubechies e estes foram satisfatórios, obtendo após a análise estatística através do teste de Wilcoxon Pareado, a validação da metodologia proposta. Através do resultado dos ensaios, pode-se afirmar que a parcela de deformação de origem térmica corresponde a aproximadamente 40% das deformações totais medidas.

Palavras-chave: *Análise Experimental, Variação de Temperatura, Wavelets, Extensometria.*

ABSTRACT

This work aims to complement and deepen knowledge regarding the evaluation of the influence of thermal and environmental actions on the deformations observed in structural elements. A common problem faced in the structural monitoring of these elements is the distinction between the values of deformation obtained in the instrumented element due to the change in temperature, the values of deformation from other actions, including the small amount of available material that addresses the problem. Nowadays, with the increasing tendency to elaborate works of art, in particular bridges, bridges and viaducts, more and more daring, making use of structures with complex geometries, with the need to conquer increasingly longer spans and under climatic conditions which interfere directly in the in-service performance of the structural elements, studies of the thermal interference in the behavior of the structure are necessary, for the proper quantification of these effects. For this purpose, the deformation levels were identified and distinguished in pre-instrumented structures and in particular loading regimes, both mechanically and thermally. The treatment of the data of deformation was carried out through techniques of signal treatment, as well as statistical analysis. The structural elements covered in this work compose parts of bridges executed in both reinforced concrete and steel. In order to validate the proposal, laboratory tests were carried out with a prismatic test specimen subjected to constant mechanical load and the ambient thermal variation. We used the wavelet transform and the statistical correlation in the data treatment, in order to interpret the observed deformation levels and eliminate inherent noise. The best results were found using the Daubechies motherwidths and these were satisfactory, obtaining after the statistical analysis through the Wilcoxon paired test, the validation of the proposed methodology. Through the results of the tests, it can be stated that the deformation portion of thermal origin corresponds to approximately 40% of the total deformations measured.

Keywords: *Experimental Analysis, Temperature Variation, Wavelets, Extensometry.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema básico de funcionamento do strain gage da resistência elétrica.....	22
Figura 2.2 – Geometria de extensômetros elétricos.....	25
Figura 2.3 – Ponte de Wheatstone (a) Diagrama do circuito. (b) Não linearidade da Ponte de Wheatstone.....	28
Figura 2.4 – Esquema da conexão em $\frac{1}{4}$ de ponte.....	30
Figura 2.5 – Esquema da conexão em três fios.....	31
Figura 2.6 – Esquema da conexão em $\frac{1}{2}$ ponte.....	32
Figura 2.7 – Sensores de corda vibrante: (a) fixados nas armaduras; (b) fixados no concreto.....	34
Figura 2.8 – Modelo esquemático de um sistema de aquisição típico.....	35
Figura 3.1 – Transformada de Fourier.....	36
Figura 3.2 – Transformada Rápida de Fourier.....	39
Figura 3.3 – Transformada <i>Wavelet</i>	39
Figura 3.4 – Análise do sinal no domínio do tempo, da frequência, STFT e transformadas de <i>wavelets</i>	40
Figura 3.5 – Aplicação da transformada de <i>wavelet</i> na análise de registros.....	41
Figura 3.6 – Interface da caixa de ferramentas para análise de <i>wavelets</i>	43
Figura 4.1 – Processos de transferência de calor para um tabuleiro de ponte.....	47
Figura 4.2 – Efeitos mecânicos do aumento de temperatura em uma viga biapoiada.....	48
Figura 5.1 – Corpos de Prova recém desmoldados.....	53
Figura 5.2 – Preparo da superfície do corpo de prova para colagem do extensômetro.....	54
Figura 5.3 – Posicionamento (a), gage posicionado (b), preparação para aplicação do adesivo (c), aplicação do adesivo (d), reposicionamento do gage (e), aplicação de pressão para aumentar a aderência (f), retirada da fita adesiva (g).....	55
Figura 5.4 – Aspecto final do sensor após a soldagem dos terminais.....	55
Figura 5.5 – Ilustração das vistas em perspectiva (a) lateral (b) do corpo de prova instrumentado com dimensões em centímetros.....	56
Figura 5.6 – Realização do ensaio de 4 pontos e o aparato utilizado.....	57
Figura 5.7 – Termo higrômetro utilizado para registro da temperatura.....	57
Figura 5.8 – Pontes sobre o Rio Jaguari: (a) vista geral; (b) localização.....	58
Figura 5.9 – Disposição dos extensômetros nas seções de interesse – Ponte do Rio Jaguari.....	59
Figura 5.10 – Posição dos extensômetros na Seção S1.....	59
Figura 5.11 – Posição dos extensômetros na Seção S3.....	60
Figura 5.12 – Ponte do Pinhão - Portugal.....	61
Figura 5.13 – Disposição das seções de interesse onde os extensômetros foram fixados – Ponte do Pinhão.....	61
Figura 5.14 – Disposição dos sensores de temperatura em planta.....	62
Figura 6.1 – Resultados dos perfis de deformação e variação térmica no primeiro ensaio.....	63
Figura 6.2 – Resultados dos perfis de deformação considerando somente a parcela térmica e variação térmica no primeiro ensaio.....	64
Figura 6.3 – Decomposição do registro das deformações em 12 níveis aplicando as <i>wavelets</i> de Daubechies (db10).....	65

Figura 6.4 – Sobreposição do registro das deformações com o coeficiente a_7	66
Figura 6.5 – Comparação entre gage - dummy e gage - <i>wavelet</i>	66
Figura 6.6 – Resultados dos perfis de deformação e variação térmica no segundo ensaio.....	67
Figura 6.7 – Resultados dos perfis de deformação considerando somente a parcela térmica e variação térmica no segundo ensaio	68
Figura 6.8 – Decomposição do registro das deformações em 12 níveis aplicando as <i>wavelets</i> de Daubechies (db10)	69
Figura 6.9 – Sobreposição do registro das deformações com o coeficiente a_7	70
Figura 6.10 – Comparação entre gage - dummy e gage - <i>wavelet</i>	70
Figura 6.11 – Deformações na seção transversal da seção S1 da ponte do rio Jaguari	71
Figura 6.12 – Evolução da temperatura ambiente durante o período de 1 semana..	72
Figura 6.13 – Decomposição do registro das deformações em 9 níveis aplicando as <i>wavelets</i> de Daubechies (db05)	73
Figura 6.14 - Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução	73
Figura 6.15 – Registro das deformações medidas na seção S1 com o efeito da temperatura removido.	74
Figura 6.16 – Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução	75
Figura 6.17 – Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução	75
Figura 6.18 – Comparação entre os dados das deformações com os de temperatura reconstruídos através de interpolação linear.....	76
Figura 6.19 – Registro das temperaturas no sensor T3 da Ponte do Pinhão	77
Figura 6.20 – Registro das deformações medidas na seção ES11 da ponte do Pinhão com o efeito da temperatura obtido por interpolação removido.	78

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2 – ESTADO DA ARTE

Tabela 2.1 – Propriedades de alguns tipos de extensômetros.....	27
Tabela 6.1 – Resultado teste estatístico Wilcoxon pareado – Primeiro ensaio.....	67
Tabela 6.2 – Resultado teste estatístico Wilcoxon pareado – Segundo Ensaio.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Corpo de prova

EN – Estrada Nacional

kgf – Quilograma força

km – Quilômetro

kN – Kilonewton

LEM – Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais

LEMA – Laboratório de Estruturas e Materiais

MATLAB – *Matrix Laboratory*

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SHM – *Structural Health Monitoring*

STC – *Self-Temperature Compensated*

STFT – *Short Time Fourier Transform*

TRRF - Tempo requerido de resistência ao fogo

TW – Transformada Wavelet

USB – *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS ROMANOS

a: Componentes de baixa-frequência (*wavelet*)

A: Área de seção transversal

c: Capacidade calorífica específica

°C: Graus Celsius

d: Componentes de alta-frequência (*wavelet*)

E: Energia de deformação

°F: Graus Fahrenheit

F : Força aplicada na corda

f : Frequência natural de vibração

f_0 : Frequência inicial

f_f : Frequência final

H_0 : Hipótese nula

H_1 : Hipótese alternativa

I_0 : Constante solar empírica

K: Fator de proporcionalidade

k: Condutividade térmica

k_v : Valor constante

L: Comprimento

L_c : Comprimento de referência da corda

N/V : Número de elétrons móveis por volume

Q : Quantidade de calor gerado dentro do corpo

R : Resistência Elétrica

S : Sessão de corte

S_A : Sensibilidade material

S_g : Sensibilidade do gage

S_L : Sensibilidade longitudinal

S_T : Sensibilidade transversal

T : Temperatura

V : Tensão elétrica

SÍMBOLOS GREGOS

α : Coeficiente de expansão térmica linear do material

β : Coeficiente de expansão térmica superficial do material

ε : Deformação no extensômetro

ε_f : Deformação final

ε_0 : Deformação inicial

$\varepsilon_{LL}(t)$: Deformação corrigida

$\varepsilon(t)$: Deformação total medida

$\varepsilon_{ap}(t)$: Aproximação do registro reconstruído

γ : Coeficiente de resistividade térmica do sensor

μ : Massa por unidade de comprimento

ρ : Densidade

ϕ : Função de escala

ψ : Função *wavelets*

x : Variável qualquer

\in : Pertencente

α : Absorvidade

ρ : Refletividade

τ : Transmissividade

Δ : Variação de alguma grandeza

Π : Constante de proporcionalidade

NÍVEIS DE ESCALA

μ : microescala (10^{-6})

m : mesoescala (10^{-3})

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Organização da dissertação.....	17
2 ESTADO DA ARTE	19
2.1 Sistema de monitoramento de integridade estrutural (SHM).....	19
2.2 Medição de deformações.....	21
2.2.1 – Teoria Básica.....	22
2.2.2 – Efeitos Térmicos.....	25
2.2.3 – Ponte de Wheatstone.....	27
2.2.4 – Conexões Elétricas.....	29
2.2.4.1 – Conexões a dois fios em $\frac{1}{4}$ de ponte.....	30
2.2.4.2 – Conectividade a três fios.....	31
2.2.4.3 – Conexões a dois fios em $\frac{1}{2}$ ponte.....	31
2.2.5 – Sensores de Corda Vibrante.....	32
2.2.6 – Sistema de Aquisição.....	34
3 WAVELETS	36
3.1 – Wavelets e Transformadas de Fourier.....	38
3.2 – Transformada Wavelet.....	40
3.3 – Análise em Multirresolução.....	41
3.4 – Aplicação no Matlab.....	42
4 TRANSMISSÃO DE CALOR	45
4.1 – Radiação Solar.....	51

5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	52
5.1	Etapa Experimental.....	52
5.1.1	– Moldes do Corpo de Prova	53
5.1.2	– Instrumentação dos Corpos de Prova	53
5.1.3	– Realização do ensaio	56
5.2	Aplicação de em Pontes.....	58
5.2.1	Ponte do Rio Jaguari (Desempenho em Serviço)	58
5.2.2	Ponte do Pinhão (Prova de Carga)	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
6.1	Ensaio Experimental	62
6.2	Ponte do Rio Jaguari.....	71
6.3	Ponte do Pinhão.....	76
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As estruturas civis, ao longo de sua existência, são constantemente submetidas a variações de temperatura que provocam, deformações nos seus elementos. Essas variações térmicas podem ser de origem natural, proporcionadas pelo ambiente no qual as estruturas estão inseridas, ou função da sua utilização, quando se trata por exemplo da estrutura de fornos, chaminés, etc.

Existem ainda os casos de ações térmicas, classificadas pela ABNT NBR 8681 (2003) como excepcionais, o que corresponde a ocorrência de um incêndio, e conforme estabelecido na ABNT NBR 14432 (2001), essa ação pode ser representada por um intervalo de tempo de exposição ao denominado incêndio-padrão. Esse intervalo de tempo, chamado tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), é definido nesta Norma a partir das características da construção e do seu uso.

A medição é um meio de quantificar dados inerentes ao comportamento da estrutura devido ações variadas, e essa forma de quantificar grandezas, desde sempre, tem acompanhado a atividade humana. Os povos primitivos foram adaptando as formas de medição às exigências ditadas pela sua experiência. Com o nascimento das civilizações, surgiram também as unidades de medida baseadas no corpo humano, a exemplo de: polegada, pé, braço, milha (*mille passus*), etc. Associado ao crescimento econômico e social e à explosão demográfica, foram surgindo novas necessidades (Campilho, 2000), como por exemplo o desenvolvimento das vias de comunicação, o aproveitamento dos recursos hídricos, a construção de barragens, a abertura de galerias e túneis e a construção de pontes e viadutos.

Atualmente, o monitoramento estrutural permite acompanhar o desempenho de elementos estruturais durante as fases de construção, utilização ou no acompanhamento de estados que antecedem situações de ruína, no caso de ensaios específicos. Com base na interpretação das medições realizadas é possível detectar danos estruturais e prever eventuais situações de colapso, aumentando deste modo a vida útil da estrutura (Felix, 2004 apud Pedro, 1994). Deste modo, a motivação para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitoramento é fomentada por fatores

diretamente vinculados com o comportamento e a segurança das estruturas, além de também levar em consideração o fator econômico.

Na utilização das técnicas de monitoramento estrutural de maneira constante, como no caso da medição de níveis de deformação decorrentes da variação térmica ao longo de um determinado período, depara-se com a dependência dos valores observados no domínio do tempo, caracterizando, assim, dados que representem séries temporais.

De acordo com Gurgel (2013), uma série temporal é uma classe de sinal colhida sequencialmente no tempo de maneira discreta. A ordem temporal dos coeficientes é de fundamental importância para o estudo da série. Ao se analisar uma série temporal, geralmente, se está interessado em investigar de maneira gráfica e, ou, numérica a ocorrência de eventos passados com o objetivo de prever eventos futuros, assim como correlacionar estes eventos com outros, podendo assim, identificar, descrever, explicar e até mesmo controlar processos envolvidos na geração deste sinal. Para o estudo de sinais temporais tem-se à disposição métodos paramétricos (determinísticos) e métodos não paramétricos, onde o número e a natureza dos parâmetros são flexíveis e não fixadas antecipadamente, como é o caso da transformada *Wavelet*.

1.1 Justificativa

Existe no mercado uma série de sensores/transdutores com função de medir a resposta de estruturas quando submetidas a situações de carregamentos aleatórios, sejam esses carregamentos oriundos da ação de cargas permanentes ou variáveis. Entretanto, um problema comum observado na literatura pelo uso desses sensores é o de conseguir realizar a distinção entre as deformações presentes em um elemento estrutural devido a uma variação de temperatura, das deformações que ocorrem devido a outros carregamentos existentes.

Os sinais nada mais são que funções de uma ou duas variáveis que irão conter informações sobre o comportamento ou natureza de algum fenômeno. Associado à geração, tanto quanto à recepção, de um sinal, será obtido um sistema correspondente capaz de produzir outro sinal ou um comportamento desejado. As

Wavelets apresentam um método inovador de descrição de sinais em tempo-escala (onde as escalas estão relacionadas com as frequências presentes no sinal). Diversos trabalhos recentes podem ser encontrados com aplicações *wavelets* em áreas variadas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o de complementar e aprofundar conhecimentos relativos à avaliação da influência das ações térmico-ambientais nas deformações observadas em elementos estruturais de pontes. Além disso, avaliar a significância das deformações provocadas por efeitos térmicos provocados pela variação sazonal e deformações provocadas por outras ações diretas e indiretas.

Com este trabalho, buscou-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- i. Isolar e quantificar o efeito térmico.
- ii. Quantificar os efeitos térmicos, do ponto de vista de deformações atuantes na estrutura.

1.3 Organização da dissertação

O texto da dissertação está dividido em sete capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No capítulo 2 é feita uma breve descrição de tópicos relevantes relacionados ao estado da arte da proposta desse trabalho. Dentro do capítulo 2 são abordados também temas de monitoramento estrutural e técnicas e sensores para a medição de deformações.

No capítulo 3 é abordada a temática das *wavelets* e a proposta de uso dessa ferramenta como auxiliar no tratamento de dados de deformações em estruturas com o objetivo de quantificar, através desse uso, a parcela correspondente ao efeito térmico. A proposta sugerida aborda a análise em multirresolução, que recompõe o sinal analisado a partir de coeficientes de baixa e alta frequências.

O capítulo 4 refere-se à transmissão de calor em suas três formas: Radiação, convecção e condução. Trata da análise da distribuição das tensões provenientes do

efeito térmico em estruturas de concreto, além de apresentar a equação para cálculo do fluxo de calor na seção transversal de elementos estruturais. Aborda também, de forma breve, os efeitos térmicos da radiação solar.

O capítulo 5 apresenta os procedimentos metodológicos para realização desse trabalho, detalhando as etapas experimentais em laboratório e o tratamento posterior dos dados, tanto através da utilização das *wavelets* com a análise em multirresolução quanto no emprego de técnicas estatísticas.

O capítulo 6 é composto pelos resultados encontrados e as observações feitas a partir deles. Esses resultados comprovam, em condições específicas, a proposta dessa dissertação e validam a metodologia sugerida.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas algumas considerações gerais sobre o trabalho desenvolvido, são realçadas as principais conclusões e são apontadas sugestões para futuros desenvolvimentos dentro dessa temática.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo faz-se uma introdução sobre sistemas de monitoramento de Integridade Estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*), o uso de extensômetros como transdutores de deformação mecânica associados a sistemas de aquisição de dados, introduzindo-se também técnicas utilizadas para o tratamento dos dados obtidos, a saber: *wavelets* e correlação estatística. São abordados ainda os fenômenos da transmissão de calor e seus efeitos nos elementos estruturais, e discute-se o princípio de operação e as principais características dos dispositivos e das técnicas utilizadas nesse trabalho, bem como algumas limitações práticas e as metodologias sugeridas para contorná-las.

2.1 Sistema de monitoramento de integridade estrutural (SHM)

Segundo Boller (2009), monitoramento de integridade estrutural é uma combinação de palavras que surgiu em torno do final dos anos 80 e tem conceito relacionado com o que habitualmente associa-se ao setor médico e de saúde clássico, possivelmente pela relação de controle (monitoramento) do paciente em diversas situações. Um trabalho desenvolvido por Figueiredo (2006) compara o funcionamento do SHM ao funcionamento do corpo humano, onde os atuadores seriam os músculos, os sensores e sistemas de aquisição seriam os órgãos sensoriais, os sistemas de transmissão seriam os nervos sensitivos, a unidade de comando e controle seria o cérebro e os sistemas de instrução seriam os nervos motores. Um sistema composto desses componentes é denominado sistema de monitoramento inteligente. No caso do monitoramento do comportamento das estruturas, a medição das grandezas de interesse é realizada utilizando recursos de elementos que fazem parte da estrutura.

Não há um consenso sobre a definição de monitoramento de integridade estrutural entre os autores dessa área de estudo. Uma definição possível, de acordo com Boller (2009) é a que afirma que monitoramento de integridade estrutural é a integração de dispositivos de detecção e possivelmente também de atuação para permitir que as condições de carga e dano de uma estrutura sejam registradas, analisadas, localizadas e previstas.

A vantagem de se utilizar técnicas de SHM é a possibilidade de se identificar o dano em seu estágio inicial, o que em situações críticas de segurança como, por exemplo, falhas em reatores nucleares, pode salvar um grande número de vidas, ou até mesmo em situações industriais em que as alterações no funcionamento de equipamentos podem causar diminuição da qualidade e/ou interrupção da produção.

Outra definição possível é que SHM é um processo de monitoramento ou leitura de variáveis físicas da estrutura ao longo do tempo, quando esta é submetida a um estado de carregamento constante ou incremental qualquer. Esse monitoramento é realizado em tempo real e ao longo deste tempo, a estrutura, de maneira geral, sofre deformações incrementais em consequência de incrementos de carga ou até de oscilações térmicas do ambiente. Neste processo, os transdutores elétricos são responsáveis por registrar os sinais das variações da grandeza de interesse sofridas pela estrutura. Além destes transdutores, existe o sistema de aquisição, dispositivo responsável pela recepção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registradas nos transdutores. Os sinais são transportados através de sistemas de transmissão até um computador central (Unidade de comando e controle) preparado através de um algoritmo computacional capaz de transformar o sinal gerado pelos transdutores em informações a respeito do comportamento estrutural em decorrência das ações a que a estrutura está submetida e exposição às condições ambientais.

As deformações presentes numa estrutura têm as mais variadas fontes de origem, sendo uma delas a dilatação ou contração térmica. Essas deformações podem vir a provocar danos estruturais significativos. Para Ribeiro (2014), um dano pode ser considerado como qualquer forma de modificação na estrutura que provoque uma diminuição de seu desempenho ao longo do tempo. Podem-se considerar dois estados da estrutura, um onde ela é íntegra, sem nenhum dano, e outro onde é admissível perceber danos na estrutura.

2.2 Medição de deformações

Os sensores são de suma importância para o sistema de monitoramento estrutural. A sua sensibilidade pode comprometer a aplicação do sistema de monitoramento como um todo. Pode-se definir sensibilidade de um sensor como a menor variação da grandeza medida que cause uma alteração sensível do sinal de saída. De uma forma geral, um sensor é um dispositivo que converte energia de uma forma em outra. A energia de entrada para o sensor representa os fenômenos físicos a serem medidos. Esta entrada é nomeada como a mensurada e a saída como a medição. As formas mais comuns de energias de entrada incluem energia mecânica, térmica, elétrica, magnética, radiante e química. Na maioria das aplicações (ensaios laboratoriais ou aplicações em sistemas de monitoramento de estruturas) as variáveis físicas de interesse estão associadas a energia mecânica. Estas variáveis incluem grandezas físicas como acelerações lineares ou angulares, força, comprimento, velocidades lineares e angulares e pressão. A energia de saída de um sensor é geralmente elétrica (tensão, corrente, etc.) ou óptica. A energia de saída pode ser medida sob a forma de um sinal analógico, digital ou sob a forma de comprimento de onda de luz. Sensores cujo sinal de saída é analógico são os mais comuns. Este sinal é convertido para um formato digital pelo sistema de aquisição de dados para que um computador possa processar, analisar e armazenar as medições.

Sensores são elementos responsáveis pela captação de sinais e podem ser definidos como sendo peças de um sistema linear que transformam, recorrendo a funções de transferência, informação da resposta estrutural, tal como deformação e temperatura, numa informação elétrica de saída, tal como a variação da tensão elétrica ou corrente elétrica (Figueiredo, 2006). Para isso, os sensores contam com um apropriado sistema de controle central para a recepção desses sinais elétricos e para o adequado processamento e transformação em uma variável de interesse.

Um transdutor é um dispositivo eletromecânico que faz corresponder, segundo uma determinada lei ou função de transferência, uma grandeza de saída (sinal elétrico usualmente a forma de tensão, corrente ou resistência) a uma grandeza de entrada (como por exemplo temperaturas, deslocamentos, forças, velocidades, entre outros) (Campilho, 2000).

Existem diversos tipos de sensores. Em geral, eles são classificados de acordo com seus princípios de funcionamento ou com a grandeza que são responsáveis por aferir, sendo os extensômetros, caracterizados por realizar a medição da diferença de potencial a partir da aplicação de uma tensão elétrica no mesmo, com resistência elétrica previamente conhecida. Existem extensômetros recomendados para uso em materiais específicos, de acordo com a finalidade.

Os sensores de deformação são dispositivos utilizados para medir deformações impostas devido à atuação de carregamentos, variação de temperatura, entre outros. Existem sensores de deformação de resistência elétrica, de fibra ótica e de cordas vibrantes, sendo o primeiro descrito, o mais difundido. Os sensores de deformação de resistência elétrica mais utilizados são os extensômetros (*strain gages*).

2.2.1 – Teoria Básica

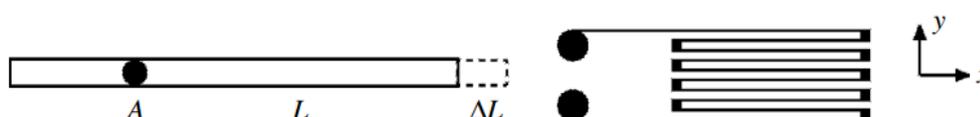
O extensômetro elétrico é um dispositivo utilizado para medir deformação a partir da variação da resistência elétrica. A resistência elétrica de um condutor de comprimento L , área de seção transversal A e resistividade R pode ser calculada pela expressão:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (1)$$

onde ρ é a constante de proporcionalidade, chamada de resistividade específica e é essencialmente inversamente proporcional ao número de elétrons móveis por unidade de volume (N/V).

A Figura 2.1 ilustra à esquerda um pedaço longo de fio condutor que muda a resistência sob tensão. e uma forma de calibração típica é utilizada nos extensômetros, representado à direita.

Figura 2.1 – Esquema básico de funcionamento do strain gage da resistência elétrica.



Fonte: Doyle, 2004.

Sendo: $\rho = K/(N/V)$, onde K é um fator de proporcionalidade, a resistência pode ser escrita como:

$$R = K \cdot \frac{V \cdot L}{N \cdot A} = K \cdot \frac{L^2}{N} \quad (2)$$

Supondo que o fio sofra uma variação de comprimento, haverá também uma mudança de resistência, e essa será dada por:

$$\Delta R = K \cdot \frac{1}{N} 2 \cdot L \cdot \Delta L - K \cdot \frac{L^2}{N^2} \cdot \Delta N \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta N}{N} \quad (3)$$

O número de elétrons móveis é geralmente proporcional à deformação, e conforme é sabido que $\varepsilon = \Delta L/L$, tem-se que:

$$\frac{\Delta N}{N} = \Pi \cdot \varepsilon \quad (4)$$

onde Π é uma constante de proporcionalidade. Essa formulação fornece:

$$\frac{\Delta R}{R} = [2 - \Pi] \cdot \varepsilon \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta R}{R} = S_A \cdot \varepsilon \quad (5)$$

onde S_A é chamada sensibilidade material. Assim, a variação de resistência da unidade pode ser relacionada à tensão imposta ao condutor.

Existem duas principais contribuições para a mudança de resistência elétrica (ou sensibilidade do material), nomeadamente, as alterações nas dimensões (2) e a mobilidade dos elétrons (Π).

Um sensor real, no entanto, não é um constituído de um comprimento reto de fio, mas está na forma de uma grade, como mostrado na Figura 2.1. A sensibilidade do extensômetro real não pode, portanto, ser a mesma que a sensibilidade do material.

Três sensibilidades podem ser definidas dependendo do tipo de campo de deformação:

- Longitudinal: Os extensômetros variam a resistência elétrica devido a deformação na direção efetiva, onde se verifica a relação dada pelo fator de sensibilidade. Essa direção efetiva coincide com a direção dos filamentos da grade de medição.

$$S_L = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} = 0; \text{ Deformação uniaxial} \quad (6)$$

- Transversal: Quando há uma deformação transversal a direção efetiva do extensômetro, muitas vezes existe uma variação na resistência elétrica. Nesse caso o extensômetro possui sensibilidade transversal.

$$S_T = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xx} = 0; \text{ Deformação uniaxial} \quad (7)$$

- Gage

$$S_g = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} = -\nu \varepsilon_{xx}; \text{ Tensão uniaxial} \quad (8)$$

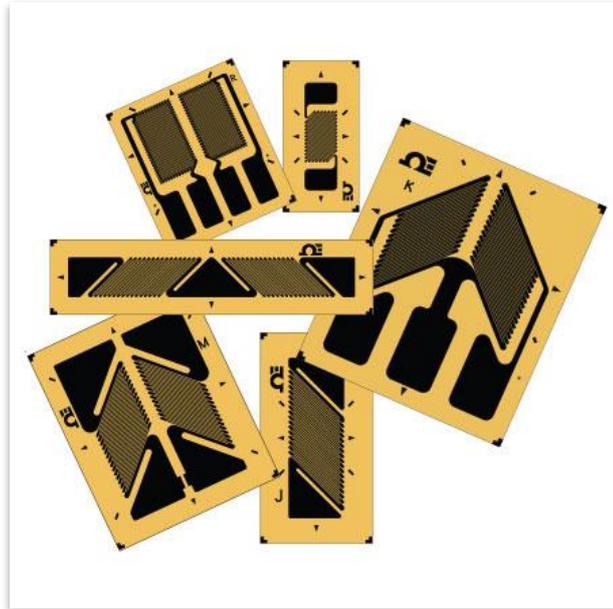
O fator de sensibilidade ou o *gage factor* é medido em um campo de tensão uniaxial e isso dá origem a um erro quando o extensômetro é utilizado em outra situação diferente da calibrada. Este é conhecido como erro de sensibilidade transversal. Em geral, esse erro não é muito grande e portanto, a variação de comprimento na direção do extensômetro (mesmo em campos de deformação multiaxiais) é assumida como sendo dada por (Doyle, 2004):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} / S_g \quad (9)$$

A definição do tipo de extensômetro a ser utilizado deve ser analisada caso a caso, levando em consideração o objetivo do ensaio, o tipo do carregamento aplicado, a geometria da peça, o número de canais disponíveis no sistema de aquisição e o tempo disponível de instalação.

Na Figura 2.2 são representadas algumas geometrias de extensômetros elétricos existentes no mercado e estes têm aplicações mais variadas, em função das condições do elemento a ser instrumentado.

Figura 2.2 – Geometria de extensômetros elétricos.



Fonte: OMEGA™, 2018.

2.2.2 – Efeitos Térmicos

Os valores de deformação medidos pelos extensômetros elétricos são afetados tanto pela variação de dimensões do elemento instrumentado como pela variação de temperatura do ambiente. O conhecimento dos efeitos da temperatura sobre o *strain gages* é de fundamental importância para que se evitem graves erros nas medições de deformações. Quando o ambiente térmico muda, tanto o sensor como o objeto instrumentado são afetados e isso deve ser levado em consideração ao derivar a expressão para a mudança de resistência, pois essas mudanças podem ser mal interpretadas como deformações reais no elemento instrumentado. A variação da resistência devido à dependência da resistividade do material do sensor com a temperatura acarreta no que pode-se intitular "deformação aparente induzida termicamente" que produz erro no valor da verdadeira deformação sofrida pelo elemento instrumentado.

Supondo, por exemplo, que a deformação induzida pela carga seja desprezível, então há três contribuições principais para a variação da relação $\Delta L/L$ quando a temperatura muda:

- O corpo de prova deforma-se causando variação de comprimento do sensor:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \alpha \cdot \Delta T \quad (10)$$

- O próprio sensor deforma-se:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \beta \cdot \Delta T \quad (11)$$

- Mudanças de resistividade do material do sensor:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \gamma \cdot \Delta T = S_g \cdot \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (12)$$

onde α e β são coeficientes de expansão térmica do corpo de prova e do sensor, respectivamente, e γ é o coeficiente de resistividade térmica do sensor. A deformação total aparente é dada por:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \left[(\alpha - \beta) + \frac{\gamma}{S_g} \right] \cdot \Delta T \quad (13)$$

Esta relação não é necessariamente linear porque os próprios coeficientes podem variar em função da temperatura. Assim, a deformação aparente depende não só da natureza do sensor mas também do material ao qual está ligado. Os valores dos coeficientes para alguns extensômetros feitos materiais mais relevantes são dados na Tabela 2.1.

Os fabricantes ajustam os coeficientes β e γ para um α particular para produzir o que são chamados extensômetros autocompensados, isto é, extensômetros que medem baixos níveis de deformação aparente quando submetidos à variação térmica. No entanto, estas medições têm geralmente uma gama muito estreita de aplicação em relação à temperatura e ao material instrumentado (Doyle, 2004). Os fabricantes fornecem também, para cada extensômetro, as expressões que permitem corrigir este efeito da temperatura. Para a sua utilização é necessário medir, junto de cada extensômetro, a temperatura a que este está sujeito, e proceder a correção numérica dos valores indicados pela ponte de medida. De acordo com os parâmetros enunciados, que afetam a deformação aparente, estas expressões dependem do

material utilizado na fabricação do extensômetro e do material que constitui o modelo ao qual está aplicado. Estas expressões levam em conta ainda, entre outros fatores, a sensibilidade transversal do extensômetro. (Felix, 2004).

Tabela 2.1 – Propriedades de alguns tipos de extensômetros

Material	S_A	β	γ	$[\mu\epsilon/^\circ F]$
Constantan	2.1	8	50	
Isoelástico	3.6	2	125	
Nicromo	2.1	9	250	
P-Silicone	110	0.3	-	

Fonte: Adaptado de Doyle, 2004.

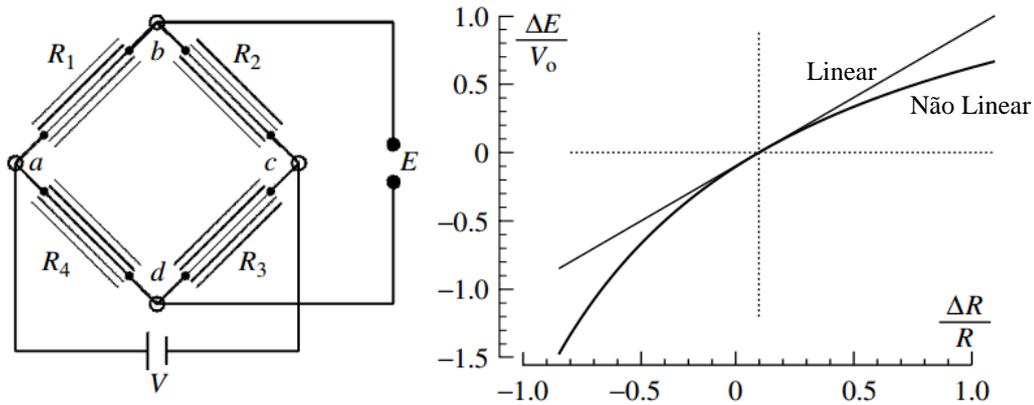
Para minimizar o problema da deformação aparente termicamente induzida existem os extensômetros com autocompensação de temperatura (STC – *self-temperature compensated*). Com os extensômetros STC, o coeficiente de temperatura da resistividade dos elementos resistivos do extensômetro é ajustado para o coeficiente de expansão térmica do material que constitui o objeto a ser medido. Quando o extensômetro elétrico é colado no material com coeficiente ajustado, a deformação aparente induzida termicamente é reduzida para valores tão baixos quanto $+1,8 \mu\epsilon/^\circ C$.

Os extensômetros auto-compensados para o efeito da temperatura apresentam baixa sensibilidade à variação térmica, desde que aplicados a um material com coeficiente de dilatação térmica idêntico àquele para o qual foram projetados. Um extensômetro auto-compensado para o efeito da temperatura, concebido para ser aplicado num material com coeficiente de dilatação térmica α_{ext} quando instalado num modelo livre de se deformar com coeficiente de dilatação térmica α_m e sujeito a uma variação de temperatura ΔT medirá uma variação de comprimento $(\alpha_m - \alpha_{ext})\Delta T$. Quando $\alpha_m = \alpha_{ext}$ a variação de comprimento medida será nula; mas sendo $\alpha_m \neq \alpha_{ext}$ a variação de comprimento medida é meramente aparente, devendo ser objeto de adequada interpretação (Felix, 2004).

2.2.3 – Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone (Figura 2.3) foi o primeiro circuito projetado para medir variação de resistência e é muito preciso porque é baseado em um princípio nulo.

Figura 2.3 – Ponte de Wheatstone (a) Diagrama do circuito. (b) Não linearidade da Ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado de Doyle, 2004.

A partir daí, a tensão nos pontos b e d pode ser quantificada através das relações:

$$V_{ab} = I_{abc} \cdot R_1 = \frac{V \cdot R_1}{(R_1 + R_2)}, \quad V_{ad} = I_{adc} \cdot R_4 = \frac{V R_4}{(R_3 + R_4)} \quad (14)$$

Dessa forma, a queda de tensão ao longo de bd é:

$$E = V_{ab} - V_{ad} = V \cdot \left[\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \right] \quad (15)$$

Supondo que as resistências no circuito da ponte mudam na ordem $\Delta R_1, \Delta R_2$, etc., então, a tensão de saída é:

$$E + \Delta E = V \cdot \left[\frac{1 + \varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_1 + r_{12}\varepsilon_2)} - \frac{1 + \varepsilon_4}{(1 + \varepsilon_3 + r_{34}\varepsilon_4)} \right], \quad \varepsilon_i \equiv \frac{\Delta R_i}{R_i} \quad e \quad r_{ij} \equiv \frac{\Delta R_j}{R_j} \quad (16)$$

Do ponto de vista da medição, o interesse é de aferir a deformação (ε) a partir da medida de E e $E + \Delta E$. Pela equação 16 percebe-se que se caso $E = 0$ (Situação de equilíbrio), chega-se a:

$$\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \quad \text{ou} \quad r_{12} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} = r_{34} = r \quad (17)$$

Reorganizando, chega-se a:

$$\Delta E = V \cdot \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\delta_1}{1 + \delta_1/(1+r)} \right] = V \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_g/R_g}{1 + \Delta R_g/R_g/(1+r)} \right] \quad (18)$$

A

Figura 2.3 mostra o caso quando $r = 1$ e $V_0 \equiv V \cdot r/(1+r)^2$. Ignorando os termos não lineares, obtém-se:

$$\Delta E = \frac{V \cdot r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right], \quad r = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \quad (19)$$

A Equação 19 é a chamada equação básica da ponte de Wheatstone. É notório que ΔE é a única saída do circuito equilibrado, isso é, a mudança na tensão é medida diretamente. É importante notar que a tensão medida é $E + \Delta E$, em geral, mas quando a ponte é inicialmente calibrada então E é zero e a mudança ΔE é medida diretamente. Também é observado que algumas das mudanças de resistência são positivas, enquanto outras são negativas. A ocorrência desse fato é usada como uma vantagem nas técnicas de compensação de temperatura.

Suponha que R_1 é a única resistência ativa, isto é, é o sensor de interesse, então $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ e:

$$\Delta E = \frac{V \cdot r}{(1+r)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (20)$$

Consequentemente, o valor da deformação pode ser obtido através de:

$$\Delta E = \frac{V \cdot r}{(1+r)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (21)$$

Assim, a tensão é facilmente determinada medindo a saída de tensão do circuito.

2.2.4 – Conexões Elétricas

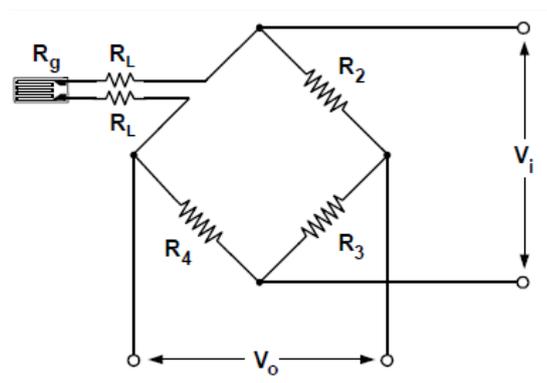
Em um circuito de ponte de Wheatstone sempre haverá quatro braços em sua configuração, porém, no processo de medição existem três diferentes tipos de disposição de extensômetros no circuito da ponte, e a nomenclatura para estes tipos de disposição muitas vezes pode levar o usuário menos experiente a ter falsa ideia do

conjunto do circuito, pois suas nomenclaturas usuais são: um quarto de ponte, meia ponte e ponte completa.

2.2.4.1 – Conexões a dois fios em ¼ de ponte

A montagem de um único extensômetro na configuração de ¼ de ponte só deve ser utilizada para medições em temperaturas estáveis, por conta do efeito da temperatura sobre a resistência da fiação, conforme representado na Figura 2.4, na qual um único extensômetro é instalado a uma grande distância do circuito da ponte e do sistema eletrônico de registro de dados. Se o comprimento da fiação for grande três efeitos nocivos ocorrem: atenuação do sinal, perda da capacidade balanceamento da ponte e perda da compensação de temperatura.

Figura 2.4 – Esquema da conexão em ¼ de ponte



Fonte: Andolfato et al.,2004.

Para calcular a atenuação de sinal, sendo R_L a resistência da fiação e R_G a resistência do extensômetro, escreve-se:

$$R_1 = R_G + 2 \cdot R_L \quad (22)$$

Observando que a variação relativa da resistência R_1 pode ser calculada como:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_G}{R_G + 2R_L} = \frac{\Delta R_G/R_G}{1 + 2R_L/R_G} \quad (23)$$

A Equação 23 pode ser expressa em termos da perda de sinal L_S :

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_G}{R_G} \cdot (1 - L_S) \quad (24)$$

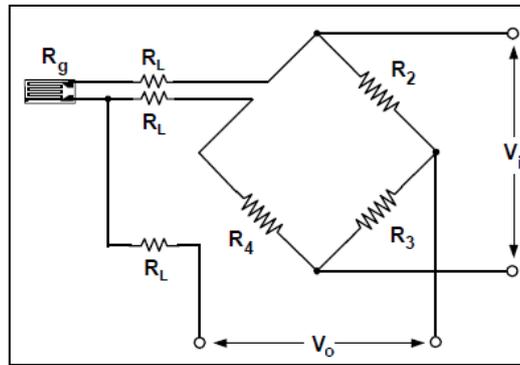
A partir das Equações 23 e 24 pode-se escrever a expressão para o cálculo de L_S para o sistema de dois fios:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_G}{R_G} \cdot (1 - L_S) \quad (25)$$

2.2.4.2 – Conectividade a três fios

No sistema de três fios (Figura 2.5), as resistências de fiação R_L são associados a dois braços adjacentes da ponte, de modo que os efeitos de temperatura sobre a resistência da fiação são cancelados. A resistência do terceiro fio está ligada em série com a fonte de alimentação, reduzindo a tensão efetiva de excitação da ponte.

Figura 2.5 – Esquema da conexão em três fios

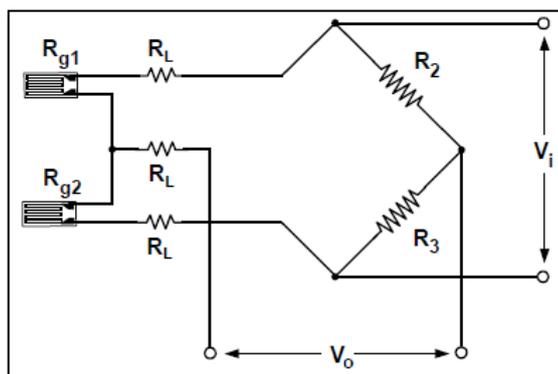


Fonte: Andolfato et al.,2004.

2.2.4.3 – Conexões a dois fios em $\frac{1}{2}$ ponte

No esquema de meia ponte, geralmente o segundo extensômetro (*dummy*) é instalado sem colar na superfície do material sob ensaio, para que ele faça a compensação de temperatura ou de qualquer outro fator que interfira no sinal de saída da ponte, conforme representado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Esquema da conexão em ½ ponte



Fonte: Andolfato et al.,2004.

2.2.5 – Sensores de Corda Vibrante

Outro tipo de sensor de deformação largamente utilizado em diversas aplicações, tais como em monitoração de barragens e pontes, ou como componente na construção de células de carga ou transdutores de deslocamentos, é o sensor de corda vibrante. O princípio de funcionamento dos sensores de corda vibrante é fundamentado na relação entre a frequência de vibração de uma corda tensionada, de frequência natural conhecida, e a tensão à qual essa corda está submetida. A frequência natural f é fornecida pela equação 26, abaixo indicada:

$$f = \frac{1}{2 \cdot L_c} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (26)$$

onde:

L_c – É o comprimento de referência da corda;

F – É a força aplicada na corda;

μ – É a massa por unidade de comprimento.

No interior de um sensor de corda vibrante típico, além de uma corda de aço, há uma bobina instalada próximo à corda, a qual gera um campo eletromagnético que é utilizado para iniciar a oscilação da corda, cuja referência é determinada pela tensão a que se encontra sujeita. Logo em seguida, a frequência de vibração da corda é capturada, devendo ser posteriormente disponibilizada por um meio de sistema de aquisição de dados (Assis, 2007).

Já que a mudança na frequência de vibração depende da variação de um dos três parâmetros (L_c , F ou μ), e que, no caso dos sensores de deformação, os parâmetros L_c e μ são constantes, qualquer alteração da frequência de vibração estará correlacionada com uma modificação na força aplicada na corda, que por sua vez, implica em uma variação na deformação do sensor ($\Delta\varepsilon$), a qual é dada pela equação 27.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_0 = k_v \cdot (f_f^2 - f_0^2) \quad (27)$$

onde:

ε_f – é a deformação final;

ε_0 – é a deformação inicial;

k_v – é um valor constante, que varia de acordo com as características mecânicas e geométricas da corda utilizada pelo sensor;

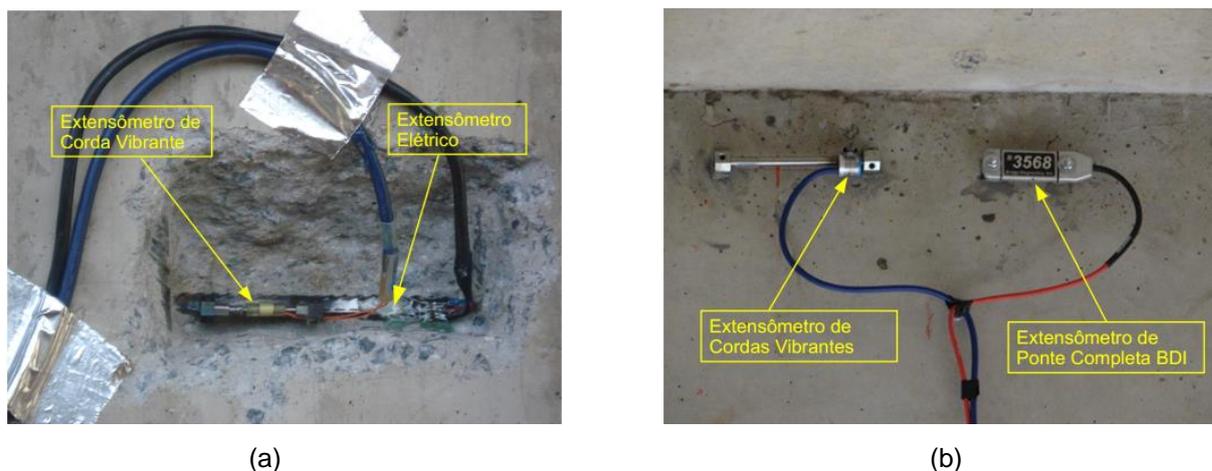
f_f – é a frequência final;

f_0 – é a frequência inicial;

Os sensores de corda vibrante apresentam excelente resolução, da ordem de 1×10^{-6} m/m, além de possuírem elevada durabilidade, ótima estabilidade, boa resistência a umidade e larga faixa de medição (até 3000×10^{-6} m/m), constituindo-se na melhor solução para o monitoramento de deformações no interior de elementos estruturais de concreto, principalmente para medições a longo prazo. Em relação à influência da variação da temperatura nas medições, gradientes de até 10°C interferem muito pouco nos resultados (Felix, 2004), embora as versões mais modernas já disponham de um sensor de temperatura embutido, sendo também fornecido um gráfico para realização das compensações necessárias de forma adequada.

As figuras a seguir apresentam a utilização dos sensores de corda vibrante tanto na medição de deformações na armadura de aço da peça de concreto armado (fixado nas armaduras) quanto na superfície externa do elemento.

Figura 2.7 – Sensores de corda vibrante: (a) fixados nas armaduras; (b) fixados no concreto.



Fonte: Bittencourt, T. N. et al., 2015.

2.2.6 – Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição de dados é o dispositivo responsável pela recepção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registradas nos sensores, que está dividido em sistema analógico e sistema digital, cuja transição entre os dois sistemas é realizada pelo conversor analógico-digital (A/D) ou digital-analógico (D/A) (Figueiredo, 2006).

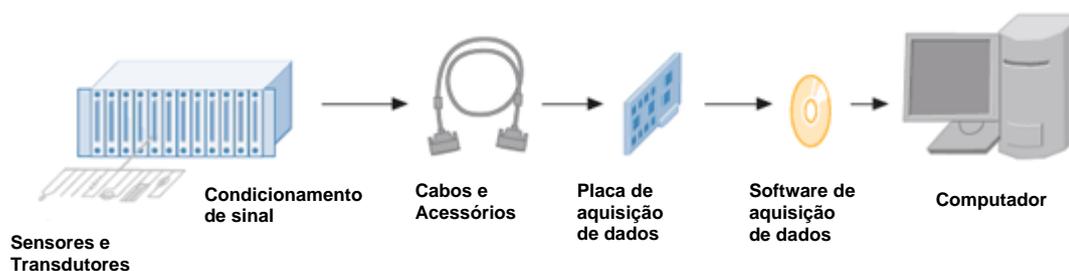
O sistema analógico é composto basicamente pelo condicionador de sinal e pelo amplificador. O condicionador de sinal transforma o sinal vindo dos sensores de modo a adaptá-lo a interpretação de outros equipamentos de medição. Já o amplificador, é utilizado para aumentar a precisão do sinal antes de ser realizada sua conversão em sinal digital (sendo esta realizada pelo conversor). Ele amplifica o nível do sinal provindo do sensor. Após a digitalização do sinal, são realizadas as etapas de processamento, armazenamento e transmissão do sinal para o computador central.

No contexto deste trabalho, aquisição é a captura de informações reais de um objeto em relação as suas respostas de solicitação externa, de forma a gerar dados e transmiti-los a um computador. As informações associadas às grandezas geradas através dos sinais da rede de sensores, geralmente são analógicos, e no sistema de aquisição de dados é feita a conversão para sinais digitais, que são tratados matematicamente por meio de um software, resultando na visualização do comportamento estrutural do objeto em questão. Um sistema de aquisição de dados é composto por um condicionador de sinais, conversor analógico-digital (conversor

A/D) e programa de aquisição de dados. Os sinais após as medições devem chegar ao computador por meio de um subsistema de comunicação, que pode ser feita através de cabos seriais RS ou USB. A transferência das informações também pode ser feita sem a necessidade de cabos, via conexão Wi-Fi, por comunicação Ethernet. Os resultados obtidos devem permitir ao experimentador uma análise do comportamento da estrutura monitorada, proporcionando uma observação quanto aos níveis de solicitação em que a mesma está submetida, e a resposta que a estrutura transmite quando carregada externamente (ASSIS, 2007; MEDEIROS E ROSA, 2008).

A sequência esquemática do processo de medição, aquisição e processamento do sinal está representado no esquema apresentado na Figura 2.8

Figura 2.8 – Modelo esquemático de um sistema de aquisição típico



Fonte: Adaptado de NATIONAL INSTRUMENTS (2018).

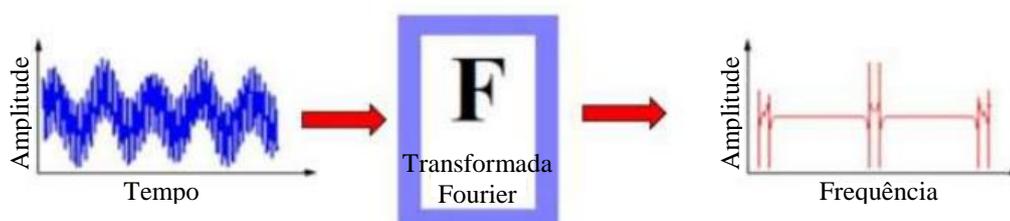
3 WAVELETS

Wavelet é uma função capaz de decompor e descrever ou representar outra função (ou uma série de dados) originalmente descrita no domínio do tempo (ou outras várias variáveis independentes, como o espaço), de forma a tornar possível analisar esta outra função em diferentes escalas de frequência e de tempo. A decomposição de uma função com o uso de *wavelets* é conhecida como transformada *wavelet* e possui a capacidade de decompor as funções tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, as funções *wavelet* são ferramentas poderosas de processamento de sinais, muito aplicadas na compressão de dados e eliminação de ruído, propriedades necessárias para a correta interpretação dos dados.

A palavra *wavelet* tem como origem a palavra francesa “Ondalette”, que significa onda pequena. Também é conhecida como “Onda”. As *wavelets* foram mencionadas pela primeira vez no apêndice da tese de Haar (1910). As *wavelets* de Haar ficaram no anonimato por vários anos, até que nos anos 30, vários grupos trabalhando independentemente, pesquisaram a representação de funções usando uma base e variando com a escala. Naquela ocasião, usando como base as *wavelets* de Haar, Paul Levy investigou o movimento Browniano. Ele mostrou que as funções com a base de Haar eram melhores do que as funções com a base de Fourier para estudar os pequenos e complicados detalhes do movimento Browniano. (Soares, 2009).

Uma parte importante da dinâmica estrutural é a identificação de certas propriedades como as frequências e os modos de vibração. Neste contexto, sinais medidos são dependentes da variável tempo (ou espaço), e muitas vezes são transferidas para outro domínio (frequência) (Figura 3.1), assim o método mais comumente utilizado na análise destes sinais é a transformada de Fourier (Volkmar, 2002).

Figura 3.1 – Transformada de Fourier



Fonte: Adaptado de Misiti et al., 2002 apud Palechor, 2013.

A representação de funções a partir da combinação de diferentes funções ortogonais existe desde o início do século XIX, quando Fourier descobriu que poderia representar sinais periódicos a partir da soma de senos e cossenos (Presezniak, 2007 apud Barbosa, 2001). A limitação desse método é a representação de funções descontínuas ou não periódicas, onde é necessário um grande número de coeficientes para que seja feita uma boa aproximação ou até mesmo, pode-se verificar que é impossível realizar sua representação por série de Fourier, sendo necessária a utilização da Transformada de Fourier.

Ao longo dos anos, têm-se procurado outras funções ortogonais capazes de formar uma base a partir da qual seja possível realizar a representação dessas funções. Nesse universo, as funções *wavelets* têm se mostrado de grande eficácia. Os sistemas *wavelets* possuem a característica de serem locais tanto no tempo quanto na frequência, ou seja, é uma onda definida em um intervalo de tempo restrito, por isso a facilidade de representar funções não periódicas, como a função pulso, por exemplo.

Um sistema *wavelet* é composto por funções de escala e funções *wavelets* simbolizadas por ϕ e ψ , ortogonais entre si, respectivamente, sendo estas contínuas ou discretas. Ambas funções são locais, definidas em um espaço compacto, chamado de suporte da função. Assim, para se representar a função $f(x)$, para qualquer valor de x real, é necessário que as funções de escala e as *wavelets* percorram todo o domínio da mesma, nesse caso, definido pelos números reais.

As *wavelets* contínuas são responsáveis pela Transformada *Wavelet* Contínua, realizada em um sinal contínuo com energia infinita. Devido à impossibilidade de implementação computacional desse tipo de análise, utiliza-se então o sistema *wavelet* discreto para realizar essa transformação em qualquer tipo de sinal. Existem diversos sistemas *wavelet*, podendo-se destacar entre os contínuos os sistemas do Chapéu Mexicano, Hermitiano, Chapéu Hermitiano, Chapéu Mexicano Complexo, Morlet, Morlet Modificado, entre outros. Dentre os sistemas discretos, podemos citar como mais utilizados os sistemas de Coiflet, Daubechies, Cohen-Daubechies-Feauveau, Haar e Summlet (Wavelet, 2017)

As funções que compõem o sistema *wavelet* discreto são geralmente bastante irregulares por causa das propriedades que lhe são impostas durante sua obtenção, sendo que estas propriedades variam de acordo com sua utilização. Por esse motivo, não existe uma função explícita para as funções de escala e para as *wavelets* primárias, pois essas são obtidas geralmente através de expressões recursivas, utilizando procedimentos numéricos. Este procedimento serve principalmente para garantir a ortogonalidade do sistema *wavelet*.

3.1 – Wavelets e Transformadas de Fourier

As funções senos e cossenos, utilizadas na transformada de Fourier, possuem a característica de serem locais no domínio da frequência, mas globais no domínio do tempo, ou seja, uma onda contínua no tempo possui apenas uma frequência, enquanto que as *wavelets*, além de locais na frequência, são definidas em um curto intervalo de tempo, sendo, portanto, locais também no tempo.

A principal diferença entre a transformada *Wavelet* e a transformada de Fourier está nas diferentes capacidades de representar sinais. Enquanto a transformada de Fourier procura por conteúdo de frequências em um sinal, a transformada *Wavelet* procura por detalhes e seus diferentes tamanhos (funções definidas em um intervalo restrito de diferentes tamanhos). Em geral, estes detalhes estão relacionados com a frequência do sinal, de modo que pequenos detalhes (definidos em um intervalo de tempo pequeno) representam partes do sinal com frequência elevada. Dessa forma, se tem uma relação inversa entre o tamanho do detalhe e a frequência do sinal.

Uma forma de utilizar a transformada de Fourier para analisar a ocorrência temporal de diferentes frequências é utilizar uma Transformada por Janelas de Fourier ou Short Time Fourier Transform (STFT). Nesse caso, transformada de Fourier é aplicada a segmentos do sinal com um determinado intervalo de tempo, podendo-se também observar uma diferença na cobertura do plano (domínio) tempo-frequência. A STFT divide o plano (domínio) tempo-frequência em porções de dimensões regulares e constantes, analisando as frequências altas com as mesmas resoluções que se analisam as frequências baixas.

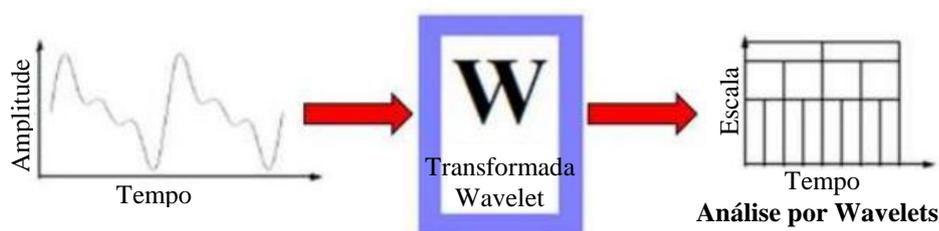
Figura 3.2 – Transformada Rápida de Fourier



Fonte: Adaptado de Misiti et al., 2002 apud Palechor, 2013.

A transformada *Wavelet* (TW), por outro lado, permite uma cobertura do plano tempo-frequência com uma resolução temporal nas faixas de baixas frequências diferente da resolução em altas frequências. Alguns autores consideram essa como a principal diferença entre a STFT e a transformada *Wavelet*.

Para Dimande (2010), a análise de Fourier apresenta uma grande desvantagem em relação às *wavelets*, que é o fato de que na transformação para o domínio da frequência, a informação do domínio do tempo é perdida. Quando analisamos uma transformada de Fourier de um determinado registro, não é possível dizer quando um determinado evento ocorreu. Se as propriedades do registro não variarem significativamente ao longo do tempo, ou seja, se o sinal for estacionário, essa desvantagem não é significativa. No entanto, grande parte dos eventos contém inúmeras características transitórias ou não-estacionárias. Estas características podem ser, inclusive a parcela de informação de interesse do problema, e a transformada de Fourier não é apropriada à sua detecção.

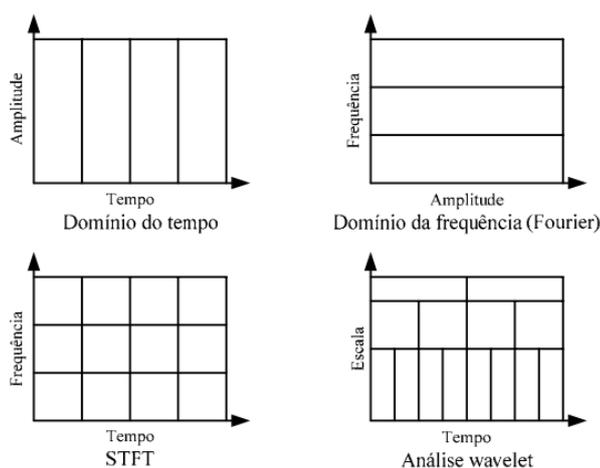
Figura 3.3 – Transformada *Wavelet*

Fonte: Adaptado de Misiti et al., 2002 apud Palechor, 2013.

A transformada *wavelet* constitui uma técnica moderna de tratamento de dados que contorna as limitações encontradas na STFT. Esta proporciona uma representação, num mesmo gráfico, dos registros que associa várias resoluções no domínio da

frequência e no domínio do tempo. A variação da resolução no domínio da frequência é conseguida através de um fator de escala presente na definição da função *wavelet* (Dimande, 2010 apud Penha, 1999). A Figura 3.4 resume alguns dos domínios de análise de registos: no domínio do tempo, no domínio da frequência, STFT e transformadas de *wavelets*.

Figura 3.4 – Análise do sinal no domínio do tempo, da frequência, STFT e transformadas de *wavelets*

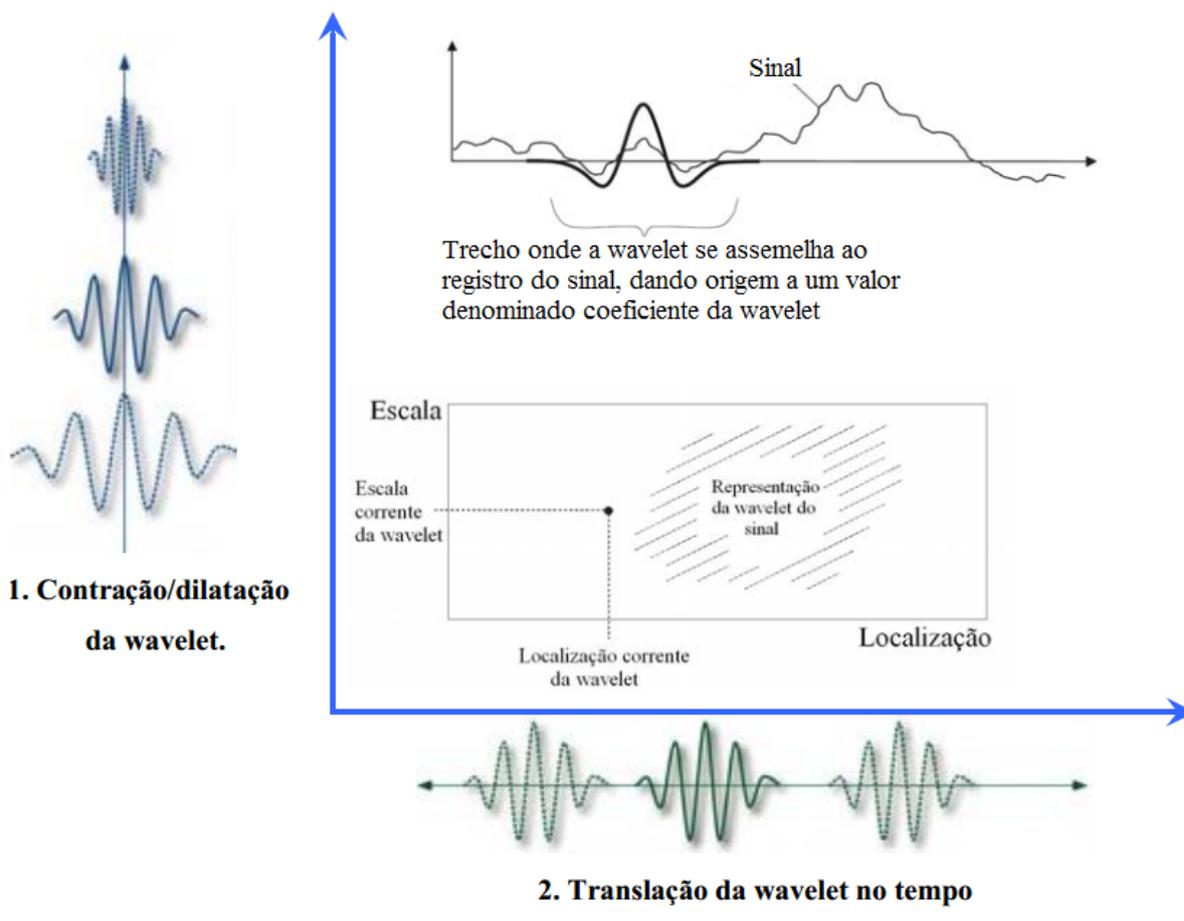


Fonte: Dimande, 2010.

3.2 – Transformada Wavelet

A decomposição de registos em seus componentes com o uso de *wavelets* é denominada de transformada *wavelet* e possui variantes contínuas e discretas. A ideia básica da análise segundo a transformada *wavelet* está em transformar o domínio em que é representado um dado sinal (por exemplo, tempo) para uma representação em outro domínio (domínio da frequência), ou transformar um sinal no domínio do tempo para o domínio tempo-frequência ou tempo-escala, procurando apresentar o máximo de informações possíveis sobre o registo, e revelar as suas características intrínsecas. A análise dos registos segundo as transformadas de *wavelets* é feita a partir de uma função elementar chamada *wavelet* principal. A variação de frequência na transformada de *wavelet* é obtida através da contração/dilatação e translação da *wavelet* principal no tempo. (Addison, 2002). A Figura 3.5 ilustra um exemplo de uma aplicação da transformada *wavelet* na análise do registo uma série de dados.

Figura 3.5 – Aplicação da transformada de *wavelet* na análise de registros



Fonte: Adaptado de Dimande, 2010.

3.3 – Análise em Multirresolução

O comportamento de uma estrutura em serviço é, várias vezes, afetado por uma variedade de ações externas. Essa complexidade é resultado da aleatoriedade das ações sobre as estruturas e do comportamento reológico dos seus materiais, resultando numa complexidade de comportamentos. Por exemplo, os resultados dos dados de deformações numa dada seção de uma ponte, realizadas num período de amostragem suficientemente longo, contêm informações sobre o estado de deformação dessa seção da estrutura sob efeito das sobrecargas que permitem a aferição de modelos de segurança. Contudo, devido à influência de fatores como, a temperatura, umidade do ambiente, insolação direta em partes da estrutura, etc., as informações relativas ao efeito da ação das sobrecargas (por exemplo do tráfego), aparecem ocultas nos dados. Nestes casos, quando se pretende avaliar o efeito da ação destas sobrecargas sobre a seção instrumentada, o efeito de outras grandezas

sobre os registros deve ser removido. Usando a análise em multirresolução, o procedimento consiste em decompor o sinal utilizando a análise em multirresolução até à ordem “J”, e reconstruir o sinal a partir dos coeficientes de aproximação. O efeito das sobrecargas é obtido pela diferença entre o registro total e a reconstrução do sinal através da expressão (Liang, et al., 2006 apud Dimande, 2010):

$$\varepsilon_{LL}(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_{ap}(t) \quad (28)$$

sendo $\varepsilon_{LL}(t)$ a deformação corrigida, $\varepsilon(t)$ a deformação total medida e $\varepsilon_{ap}(t)$ a aproximação do registro reconstruído a partir de um dado nível.

3.4 – Aplicação no Matlab

O *software* Matlab é utilizado para solução de inúmeros problemas relacionados à Engenharia. O programa apresenta várias ferramentas e recursos para facilitar estas resoluções. Uma delas é o *Wavelet Toolbox*, que fornece funções e aplicativos para analisar e sintetizar dados e imagens que exibem o comportamento de diversos elementos. A caixa de ferramentas inclui algoritmos para transformada em *wavelet* contínua e para análise discreta. Algumas das características-chave são: compactação e reconstrução de sinais e imagens e análise de dados a partir dos bancos de *wavelets*-mães.

A interface do *software* (Figura 3.6) também contém ferramentas gráficas e funções de linha de comando que permitem: examinar e explorar propriedades de *wavelets* individuais e pacotes *wavelet*; examinar estatísticas de sinais e componentes de sinal; realizar uma transformada *wavelet* contínua de um sinal unidimensional; realizar análise discreta e síntese de sinais unidimensionais e bidimensionais; realizar análise de pacotes *wavelet* de sinais unidimensionais e bidimensionais; comprimir e remover o ruído de sinais e imagens.

Figura 3.6 – Interface da caixa de ferramentas para análise de *wavelets*.



Fonte: Autor.

A partir dos coeficientes obtidos com o *Wavelet Toolbox*, faz-se a análise das *wavelets* e a comparação, através de métodos estatísticos que comprovem ou não a relação de distribuições, normais ou não-normais com os dados originais.

Segundo Silva e Bogoni (2015) um destes métodos estatísticos é o teste pareado de Wilcoxon, que substitui o teste t de Student para amostras pareadas quando os dados não satisfazem as exigências deste último, como a condição de distribuição normal de probabilidade, por exemplo. Foi desenvolvido por E. Wilcoxon em 1945 e baseia-se nos postos das diferenças intrapares, dando maior importância às diferenças maiores. É um teste não paramétrico utilizado para comparar se as medidas de posição de duas amostras são iguais no caso em que as amostras são dependentes. Ele é usado para testar a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos uma das populações possui funções de distribuição diferentes.

De forma objetiva, os passos para realização deste teste são apresentados a seguir e mais detalhes podem ser vistos em Portal Action (2018):

Considerando duas amostras dependentes de tamanho n vindas de duas populações P_1 e P_2 , isto é, X_1, \dots, X_n e Y_1, \dots, Y_n .

Sendo as observações pareadas, pode-se considerar que há na realidade uma amostra de pares do tipo : $\{(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)\}$

Definindo $D_i = X_i - Y_i$, para $i = 1, 2, \dots, n$. Assim, obtém-se as amostras D_1, D_2, \dots, D_n , resultantes das diferenças entre os valores de cada par.

Para realizar o Teste de Wilcoxon Pareado devemos primeiramente estabelecer as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \Delta = 0 \\ H_1: \Delta \neq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} H_0: \Delta = 0 \\ H_1: \Delta > 0 \end{cases} \quad \begin{cases} H_0: \Delta = 0 \\ H_1: \Delta < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Ou seja, faz-se o teste se as populações diferem em localização ou não utilizando a seguinte ideia: se a hipótese nula for aceita, tem-se que a mediana da diferença é nula, ou seja, as populações não diferem em localização. Já, se a hipótese nula for rejeitada, ou seja, se a mediana da diferença não for nula, tem-se que as populações diferem em localização.

4 TRANSMISSÃO DE CALOR

De maneira geral, pode-se dizer que a transferência de calor ocorre pela troca de energia térmica entre corpos com temperatura distinta. Este fenômeno ocorre de modo a promover o equilíbrio térmico entre os dois, fazendo fluir o calor do corpo mais quente para o corpo mais frio. Numa perspectiva clássica, é usual dividir os processos pelos quais se faz a transmissão de energia térmica em três categorias distintas:

- a) **Radiação:** Observa-se quando não há contato entre o corpo que emite e o que recebe calor. Neste caso, a qualidade e a quantidade de energia radiante recebida dependem da temperatura do corpo emissor.
- b) **Convecção:** É o processo de transmissão de calor por intermédio da movimentação de um fluido. Tendo em vista as causas desse movimento, a convecção pode ser classificada como natural ou forçada. Se não existirem variações bruscas na velocidade e nas trajetórias das partículas do fluido, diz-se que a convecção ocorre em regime laminar, caso essas características não sejam observadas, diz-se que a mesma ocorre em regime turbulento.
- c) **Condução:** Ocorre através de um meio sem que haja intervenção da radiação e sem movimentos internos. É o processo típico de transmissão de calor dentro de um elemento sólido.

As tensões térmicas podem ser substancialmente reduzidas, e o risco de danos causados pela temperatura, eliminado, pela previsão de juntas de dilatação e por reforços específicos corretamente distribuídos. Por esta razão e devido à complexidade do problema, muitas estruturas são projetadas seguindo regras empíricas e com praticamente nenhum cálculo dos efeitos térmicos. Contudo, para estruturas importantes expostas a grandes variações de temperatura, é apropriado ter uma avaliação da magnitude das variações de temperatura e das tensões correspondentes.

Estruturas de concreto expostas a variação térmica sazonal sofrem continuamente a perda e o ganho calor proveniente do ar circunvizinho. A análise do fluxo de calor em um corpo é geralmente um problema tridimensional. Entretanto, para uma laje ou parede de concreto ou para uma seção transversal de ponte, basta tratá-la como um

problema unidimensional ou bidimensional, como forma de simplificação (Ghali et al., 2002).

Uma variação linear de temperatura sobre a seção transversal de uma ponte simplesmente apoiada, não gera tensões de origem térmica na estrutura. Quando a variação de temperatura é não linear, a mesma ponte será sujeita a tensões, porque qualquer fibra, ligada a outras fibras, não pode exibir expansão térmica livre. As tensões térmicas na seção transversal de uma estrutura estaticamente determinada são referidas como tensões auto-equilibrantes.

As análises realizadas nesse trabalho dizem respeito à distribuição de temperatura e às deformações correspondentes nas seções transversais das pontes. A temperatura em qualquer instante é assumida como constante ao longo do comprimento da ponte, mas variável na seção transversal.

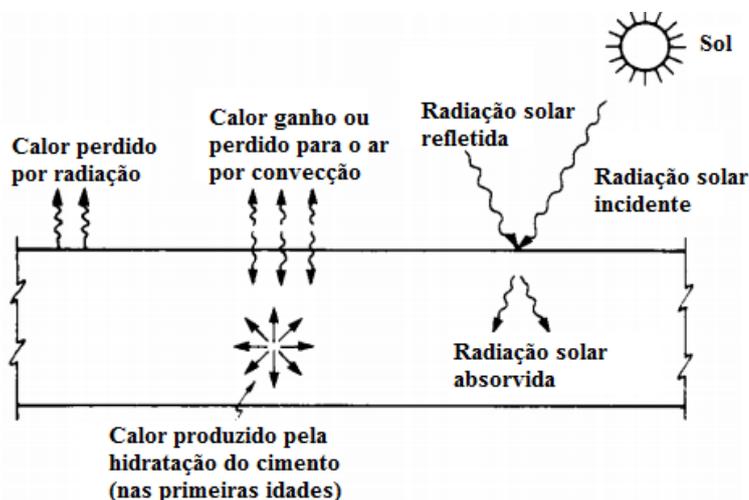
De acordo com Ghali et al. (2002), a distribuição da temperatura sobre uma seção transversal de ponte varia com o tempo e depende das seguintes variáveis:

- a) Geometria da seção transversal;
- b) Condutividade térmica, calor específico e densidade do material;
- c) Natureza e cor das superfícies expostas, expressas em termos de absorção de radiação solar, coeficientes de emissividade e convecção;
- d) Orientação do eixo da ponte, latitude e altitude do local;
- e) Hora do dia e da estação;
- f) Variações diurnas da temperatura do ar ambiente e da velocidade do vento;
- g) Grau de nebulosidade e turbidez da atmosfera.

Durante o dia, especialmente no verão, o ganho de calor é maior do que a perda de calor, resultando em um aumento da temperatura. O inverso ocorre nas noites de inverno, e a temperatura da estrutura cai. A Figura 4.1 é uma representação esquemática do fluxo de calor para um tabuleiro de uma ponte durante o dia no verão. A radiação solar incidente é parcialmente absorvida e o resto é refletido. A energia absorvida aquece a superfície e produz um gradiente de temperatura através do tabuleiro. A quantidade de radiação absorvida depende da natureza e cor da superfície: a absorvidade é maior numa superfície áspera escura em comparação com uma superfície lisa de cor clara. Parte do calor absorvido de radiação é perdido para

o ar por convecção e rerradiação da superfície, através do ar. A quantidade de convecção depende da velocidade do vento e das temperaturas do ar e da superfície.

Figura 4.1 – Processos de transferência de calor para um tabuleiro de ponte



Fonte: Adaptado de Ghali et al., 2002.

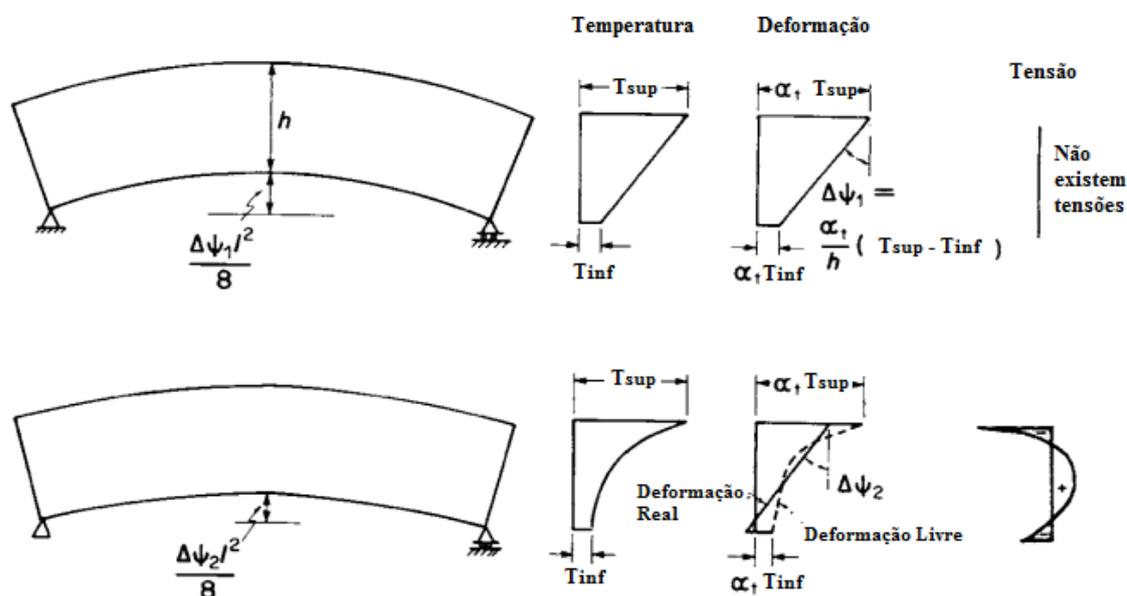
A Figura 4.2 mostra as distribuições da deformação e da tensão e a deflexão de uma viga biapoiada submetida a um aumento de temperatura que varia linear ou não linearmente ao longo da sua seção transversal.

onde:

ψ é a curvatura da viga, l é o vão da viga, T_{inf} e T_{sup} as temperaturas nas faces inferior e superior, respectivamente, h a altura da seção transversal e α_t o coeficiente de dilatação térmica do material.

Duas linhas são mostradas para a distribuição da deformação no caso de variações de temperatura não-lineares. A linha tracejada representa a tensão hipotética que ocorreria se cada fibra estivesse livre para se expandir. Mas, como as seções transversais planas tendem a permanecer planas, a distribuição da deformação real é linear, conforme mostrado. A diferença entre as ordenadas da linha tracejada e da reta representa expansão ou contração que é restringida pelas tensões de auto-equilíbrio.

Figura 4.2 – Efeitos mecânicos do aumento de temperatura em uma viga biapoiada



Fonte: Adaptado de Ghali, 2002.

Com a suposição de que a distribuição de temperatura sobre uma seção transversal de ponte é constante ao longo do comprimento de ponte, não ocorre fluxo de calor na direção longitudinal e aplica-se a seguinte equação para o fluxo de calor no plano da seção transversal:

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q = p \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (30)$$

onde:

T é a temperatura em qualquer ponto, (x, y) em qualquer instante, t;

k é a condutividade térmica que é a taxa de fluxo de calor por condução por unidade de área por unidade de gradiente de temperatura. A unidade de k é W/(m °C);

Q é a quantidade de calor gerado dentro do corpo (por exemplo, por hidratação de cimento) por unidade de tempo por unidade de volume, W/m³;

p é a densidade, kg/m³;

c é a capacidade calorífica específica; ou seja, a quantidade de calor necessária para a temperatura da massa unitária do material em um grau, J/(kg °C).

O fluxo de calor em qualquer instante, em qualquer ponto nos extremos da seção transversal, segue a equação:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot n_x + k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot n_y + q = 0 \quad (31)$$

onde n_x e n_y são cossenos de direção de um vetor externo normal ao ponto extremo da seção transversal; q é a quantidade de transferência de calor por unidade de tempo por unidade de área do ponto extremo da seção transversal em unidades de W/m^2 . O valor de q , que varia com o tempo e com a posição do ponto extremo da seção, é a soma de três componentes:

$$q = q_s - q_c - q_r \quad (32)$$

onde:

q_s = radiação solar; Isto é, o ganho de calor devido aos raios solares

q_c = convecção devido à diferença de temperatura entre superfície e ar

q_r = a rerradiação da superfície para o ar circundante.

O fenômeno da transmissão de calor, de maneira geral, engloba os três tipos de processos de transferência de energia e o seu estudo pode ser feito sobrepondo os efeitos dos três processos.

De maneira geral, um corpo emite de maneira permanente radiações térmicas para o espaço que o cerca e absorve, reflete ou transmite radiações provenientes de outros corpos.

Designam-se por absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ), as frações da radiação térmica correspondentes, respectivamente, às parcelas absorvida, refletida e transmitida. O somatório dessas três parcelas tem valor igual a um. (Welty, 1978)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (33)$$

Em relação à transmissividade, se $\tau = 1$ o corpo é dito perfeitamente transparente, enquanto que se $\tau = 0$, o corpo é dito opaco.

No que se refere à refletividade, se $\rho = 1$ e a reflexão for do tipo especular (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), os corpos são ditos refletores perfeitos. Se ρ não depender do ângulo de radiação incidente, o corpo é chamado de emissor ou refletor difuso. Nas situações em que ρ for independente do comprimento de onda da radiação incidente, o corpo é classificado como cinzento. Um caso particular dos corpos cinzentos são os corpos brancos, em que $\rho = 1$ para todos os comprimentos de onda da radiação incidente.

A capacidade que a superfície de um corpo tem de refletir a radiação proveniente do exterior, e que se traduz por um impedimento total ou parcial da penetração da radiação no interior desse mesmo corpo, atua de forma semelhante em relação à radiação desse corpo para o exterior, impedindo igualmente a saída de calor.

No âmbito do armazenamento da energia que neles incide, os corpos brancos, transparentes ou refletores perfeitos, comportam-se exatamente da mesma forma.

Em relação à absorvidade, se $\alpha = 1$ o corpo é dito negro ou radiador perfeito e tem a propriedade de absorver totalmente todas as radiações que nele incidem.

Os valores de absorvidade, refletividade e transmissividade são função do comprimento de onda na radiação incidente. (Silveira, 1996 apud Gomes, 1962). Por outro lado, a absorvidade, a refletividade e a transmissividade também são função do ângulo de incidência da radiação, o que explica que certas superfícies transparentes se mostrem espelhadas quando observadas de um ângulo rasante.

No estudo da radiação é usual recorrer aos corpos negros, que consistem numa abstração teórica, mas as características podem ser comparadas às dos corpos reais, e cuja finalidade principal é a de simplificar os problemas que envolvem esse fenômeno.

Conforme já mencionado, o corpo negro absorve toda a energia que incide sobre ele e, uma vez atingido o equilíbrio térmico, este passa a emitir uma quantidade de energia igual à que recebe, motivo pelo qual também é chamado de radiador perfeito.

4.1 – Radiação Solar

A radiação térmica que atinge a superfície terrestre tem como agente emissor exclusivamente o Sol. O conhecimento da radiação solar, bem como das condições de exposição das superfícies de uma obra de arte, é fundamental para determinar a temperatura dessas superfícies, ou, mais concretamente, a elevação da temperatura das mesmas em relação à temperatura do ar e os consequentes efeitos desse fenômeno. A radiância extraterrestre no topo da atmosfera pode ser calculada utilizando fórmulas astronômicas e a constante solar empírica $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ (Santos, 2013 apud Allen et al. 1998). A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, sofre vários fenômenos de absorção, reflexão e absorção/re-emissão. Após atravessar a atmosfera, num dia de céu relativamente limpo, a radiação solar atinge a superfície terrestre com uma potência inferior em cerca de 30% da registrada no topo da mesma, ou seja, aproximadamente, de 1000 W/m^2 . Ao nível do solo, a radiação solar de curto comprimento de onda é dada pela soma de três componentes: radiação direta ou de feixe, radiação difusa proveniente da atmosfera e radiação refletida pelo solo. A radiação direta corresponde à parcela de radiação que não sofreu qualquer desvio, sendo função da posição do Sol e da orientação da superfície; a radiação difusa resulta da fração de radiação que, tendo sido desviada do feixe direto, atinge a superfície, proveniente de todas as direções, sendo função do ângulo de aceitação e da orientação da superfície; a radiação refletida corresponde à porção de radiação refletida pelo solo e objetos circundantes, sendo função do ângulo de aceitação, da orientação da superfície coletora, e do albedo (coeficiente de reflexão) das superfícies circundantes (Santos, 2013 apud D. Queluz, 2007.). A soma dessas componentes recebe o nome de radiação global I , e corresponde ao fluxo total incidente na unidade de área de uma superfície colocada na Terra. O valor da radiação solar global varia, ao longo do dia e ao longo do ano, devido ao fato de os ângulos segundo os quais os raios do Sol incidem sobre a superfície considerada variarem com a posição da Terra em relação ao Sol. Por exemplo, em relação a uma superfície horizontal, durante o nascer e o pôr-do-sol, o seu valor é muito reduzido, não só devido ao fato de ser maior a espessura da camada atmosférica atravessada, mas, principalmente, porque o ângulo de incidência é elevado.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A parte inicial da elaboração deste trabalho foi desenvolvida fazendo-se uma revisão bibliográfica a respeito de processamento de sinais, transformadas *wavelets* e análises experimentais relacionadas com métodos de medição, identificação e quantificação da influência térmica nas deformações observadas em elementos estruturais. Tal revisão bibliográfica forneceu conhecimentos a respeito dos equipamentos e softwares utilizados, bem como dos métodos empregados nas análises. Com isso, realizou-se um estudo teórico-experimental através do monitoramento dos níveis de deformação de pontes reais e o posterior tratamento desses dados. Para validação da técnica aplicada, foram realizados também ensaios laboratoriais em situação de temperatura ambiente, mas com variáveis relevantes controladas. Para este estudo, são abordadas as metodologias de tratamento de dados através das transformadas *wavelets* e correlação estatística.

Os dados de interesse foram processados no software proprietário MATLAB (Matrix Laboratory), versão R2014b, da empresa Mathworks. Trata-se de um ambiente de programação técnica, computação numérica, simulação e visualização gráfica. Neste software foi utilizada a *Wavelet Toolbox*, na qual se apresenta uma coleção de funções construídas e fornecidas para a análise e síntese de sinais e imagens. As ferramentas são oferecidas por meio de linha de comando ou interface gráfica interativa.

O procedimento experimental proposto para esse trabalho que tem por objetivo quantificar os níveis de deformação provenientes de variação térmica em elementos estruturais foi baseado na aplicação da transformada *wavelet* em dados de deformações de um corpo de prova (CP) medidos em laboratório e de deformações medidas em elementos que compõem duas pontes reais durante ensaio de carga e em situação de serviço.

5.1 Etapa Experimental

O procedimento experimental tem por objetivo validar a técnica proposta de identificação da influência térmica nas deformações observadas em elementos estruturais. O modelo de estrutura adotado é uma viga de concreto. A técnica foi baseada em manter o corpo de prova (CP), devidamente instrumentado com

extensômetros, carregado mecanicamente de forma constante ao longo do dia e submetido também à variação térmica ambiente, com registro da temperatura de forma simultânea, e avaliar, após o período em questão, o perfil das deformações registradas pelos sensores em comparação com o perfil de variação da temperatura. Para a confecção dos corpos de prova, foi realizada a moldagem dos corpos de prova conforme ilustra o item a seguir.

5.1.1 – Moldes do Corpo de Prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com o que preconiza a NBR 5738:2008. A primeira etapa do experimento consiste na confecção de moldes para os corpos de prova de concreto. Foram confeccionados dois corpos de prova com as dimensões de 40 cm x 10 cm x 10 cm. Os corpos de prova foram produzidos utilizando Cimento Portland composto (CP II-F-32) com adição de fíler calcário, em teor entre 6% e 10%, areia grossa (com Módulo de Finura no valor de 3,31), brita 0, sendo areia e brita recebidas de acordo com especificações da ABNT NBR 7211:2009, areia e água potável em condições ideais para utilização em concreto estrutural, segundo a ABNT NBR 15900-1:2009, sem qualquer adição ou aditivo. Todos os corpos de prova se apresentaram no formato prismático. Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados moldes de madeira (impermeabilizados com fôrmica e silicone). Os corpos de prova já desmoldados são ilustrados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Corpos de Prova recém desmoldados



Fonte: Acervo do autor.

5.1.2 – Instrumentação dos Corpos de Prova

Para fixação dos extensômetros no corpo de prova é necessário que a superfície do mesmo esteja completamente pronta para a aplicação. Antes de iniciar o procedimento de fixação, é recomendável a verificação da resistência elétrica do

extensômetro para checar se a mesma está próxima do valor indicado pelo fabricante. Ao final da instalação também é aconselhável esta verificação, pois o sensor não pode ser danificado, tendo uma ou mais propriedades alteradas. Antes de iniciar o processo de colagem propriamente, realizou-se a regularização da superfície do corpo de prova através de lixas, aplicou-se uma camada fina do adesivo epóxi e lixou-se novamente para posterior colagem do gage. Tais procedimentos estão descritos na Figura 5.2.

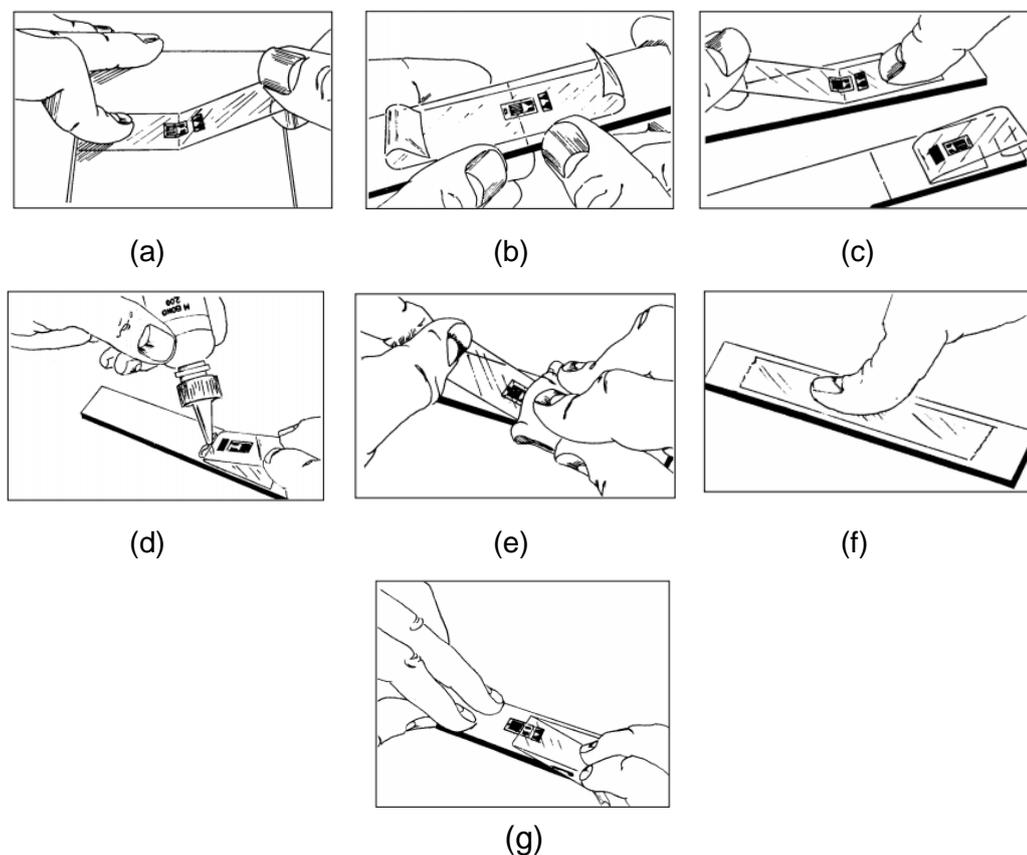
Figura 5.2 – Preparo da superfície do corpo de prova para colagem do extensômetro



Fonte: Acervo do autor.

O procedimento de colagem dos sensores utilizado seguiu o roteiro definido por VISHAY (2018) e está representado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Posicionamento (a), gage posicionado (b), preparação para aplicação do adesivo (c), aplicação do adesivo (d), reposicionamento do gage (e), aplicação de pressão para aumentar a aderência (f), retirada da fita adesiva (g).



Fonte: VISHAY (2018)

Após a colagem dos extensômetros e dos terminais, de acordo com os procedimentos descritos anteriormente, realizou-se a soldagem dos sensores e dos fios nos terminais. O aspecto final está representado na Figura 5.4.

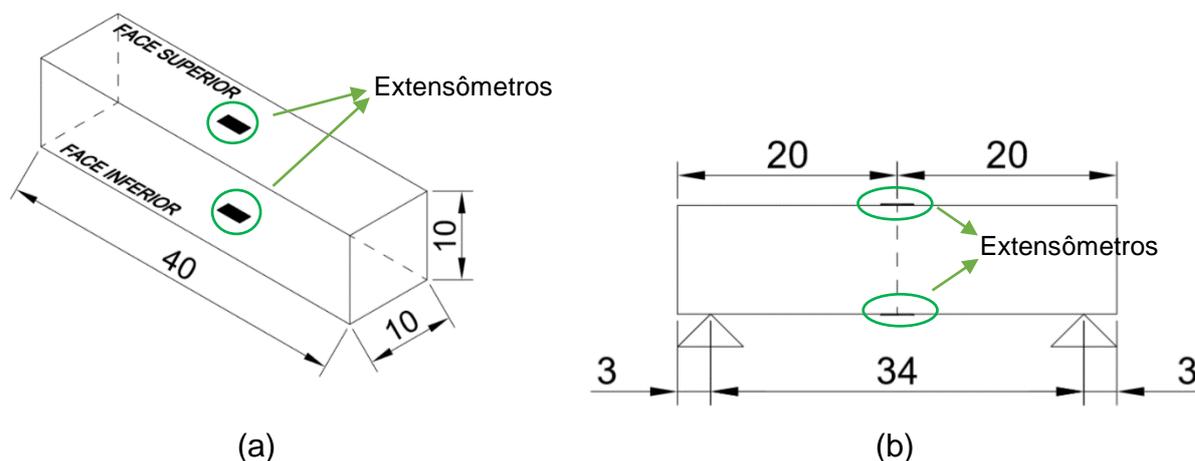
Figura 5.4 – Aspecto final do sensor após a soldagem dos terminais



Fonte: Acervo do autor.

Os extensômetros foram colados nas faces superior e inferior do CP, de acordo com esquema ilustrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Ilustração das vistas em perspectiva (a) lateral (b) do corpo de prova instrumentado com dimensões em centímetros



Fonte: Acervo do autor.

5.1.3 – Realização do ensaio

Além dos extensômetros colados nas faces superior e inferior, conforme representado anteriormente, também foram utilizados outros com objetivo de avaliar somente a parcela térmica (*dummy*), e este foi colado no sentido transversal aos demais. No primeiro ensaio foi utilizado somente um *dummy* e no segundo ensaio foram utilizados dois. Os ensaios realizados que resultaram em respostas mais adequadas foram os de flexão a quatro pontos. A formulação para este ensaio assume que entre os pontos de aplicação da carga externa existe um estado de flexão pura, desconsiderando quaisquer outras tensões que possam advir do fato que exista carregamento agindo sobre o corpo. Este ensaio consistiu no posicionamento do CP na condição bi-apoiada e na aplicação de uma carga incremental programada para estabilizar-se ao atingir 150 kgf. A carga foi aplicada de forma concentrada em dois pontos ao longo do comprimento da peça, nas posições correspondentes a $L/3$, conforme prevê a configuração de cargas deste tipo de ensaio. Foi utilizada a máquina de ensaios universais eletromecânica Shimadzu modelo AGX, com capacidade de aplicação de carga de até 100 kN, bem como seu kit de testes para submeter o corpo de prova a flexão nos terços. A máquina, com corpo de prova durante um dos ensaios é ilustrada na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Realização do ensaio de 4 pontos e o aparato utilizado



Fonte: Acervo do autor.

De modo a registrar a temperatura ambiente e avaliar o efeito térmico ao longo dos ensaios, foi utilizado um termo higrômetro, equipamento específico para mensurar a temperatura e a umidade relativa do ar no local da medição, sendo, no ensaio em questão, somente utilizados como preponderantes os registros da variação térmica. O equipamento utilizado apresenta faixa de utilização recomendada pelo fabricante de 0 a 50°C e foi programado para registrar a temperatura a cada 5 segundos, com resolução de 0,1°C. A Figura 5.7 apresenta o equipamento durante o uso.

Figura 5.7 – Termo higrômetro utilizado para registro da temperatura



Fonte: Acervo do autor.

5.2 Aplicação de em Pontes

Foi feita também a análise do efeito da influência térmica em deformações medidas em pontes reais. Os dados térmicos e das deformações foram obtidos em medições específicas para cada caso.

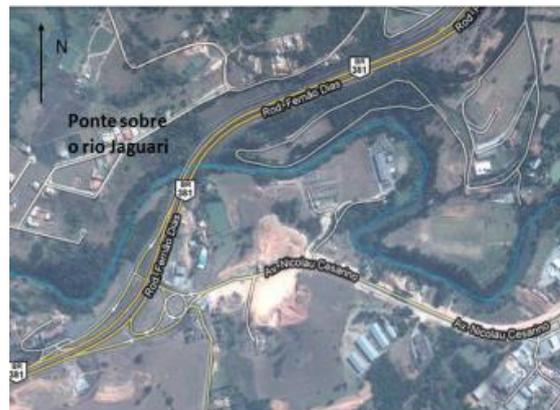
5.2.1 Ponte do Rio Jaguari (Desempenho em Serviço)

As pontes sobre o Rio Jaguari, executadas em concreto armado, com curvas e em declive, localizadas na Rodovia BR 381- Fernão Dias, km946+300, na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. Os dados das deformações e de temperatura dessa ponte foram obtidos durante o período da missão acadêmica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através da parceria com o Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais – LEM.

Figura 5.8 – Pontes sobre o Rio Jaguari: (a) vista geral; (b) localização



(a)

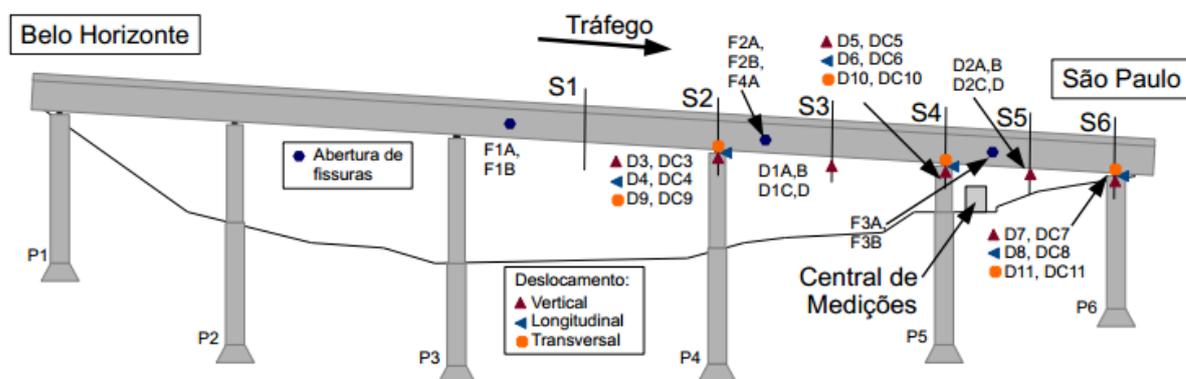


(b)

Fonte: Bittencourt, T. N. et al., 2015

Na ponte sobre o Rio Jaguari, foram analisadas somente as deformações medidas nas seções S1 e S3, estas posicionadas nos vãos central e seu o subsequente à direita, do lado de acesso a São Paulo, conforme ilustra a Figura 5.9.

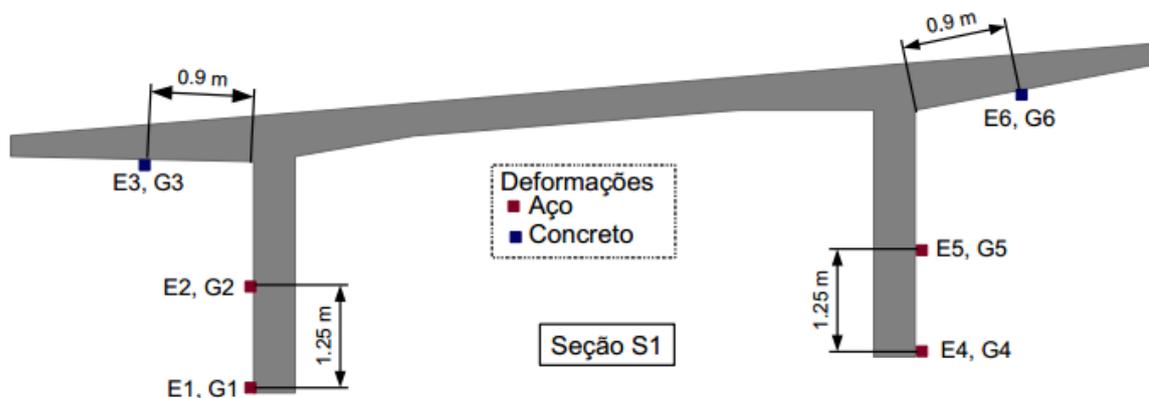
Figura 5.9 – Disposição dos extensômetros nas seções de interesse – Ponte do Rio Jaguarí



Fonte: Bittencourt, T. N. et al., 2015.

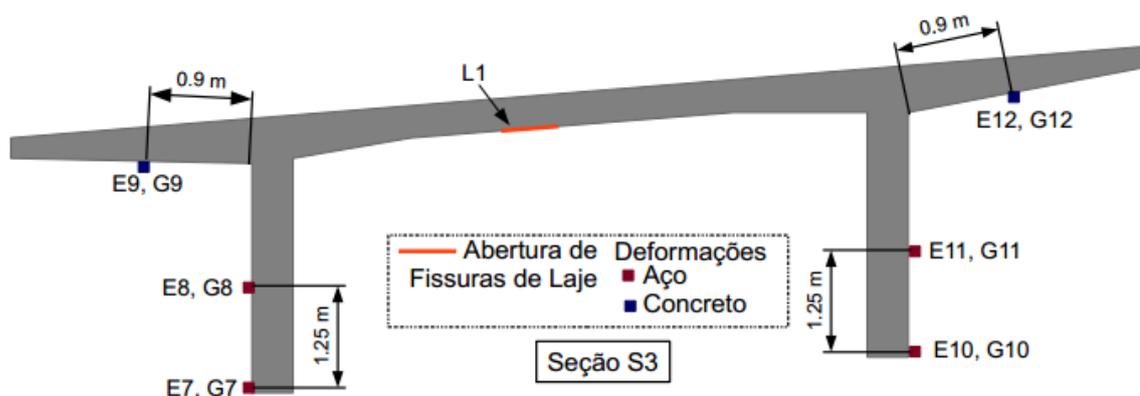
Tanto na seção S1 como na S3 foram instalados sensores de deformação na armadura de aço e no concreto. A disposição desses sensores na seção S1 é ilustrada na Figura 5.10. Já a representação da disposição dos sensores seção S3 é feita na Figura 5.11.

Figura 5.10 – Posição dos extensômetros na Seção S1



Fonte: Bittencourt, T. N. et al., 2015

Figura 5.11 – Posição dos extensômetros na Seção S3



Fonte: Bittencourt, T. N. et al., 2015

O procedimento realizado neste trabalho consiste em, através das técnicas de análise de dados em multirresolução, realizar a decomposição do sinal medido pelos dispositivos em várias bandas, esta decomposição permite uma melhor compreensão do comportamento dos sinais e a extração de singularidades contidas em cada registro. As características do sinal são separadas em componentes de baixas e altas frequências e em vários níveis. Feita essa decomposição, realiza-se a diferença entre o registro total e o sinal reconstruído através da decomposição.

5.2.2 Ponte do Pinhão (Prova de Carga)

A ponte metálica do Pinhão (Figura 5.12) é uma obra de arte inserida na E.N. 323 ao km 31.604, a qual está localizada sobre o Rio Douro e constitui importante ligação dos distritos de Tabuaço, S. João da Pesqueira, Sabrosa e Alijó. Os dados de deformação dessa ponte foram obtidos durante o ensaio de carga. A ponte do Pinhão é constituída fundamentalmente por uma estrutura metálica composta por chapas e cantoneiras e possui tabuleiro misto concreto-aço apresentando três pilares e dois encontros de alvenaria de pedra. (Assis, W. S. et al., 2004).

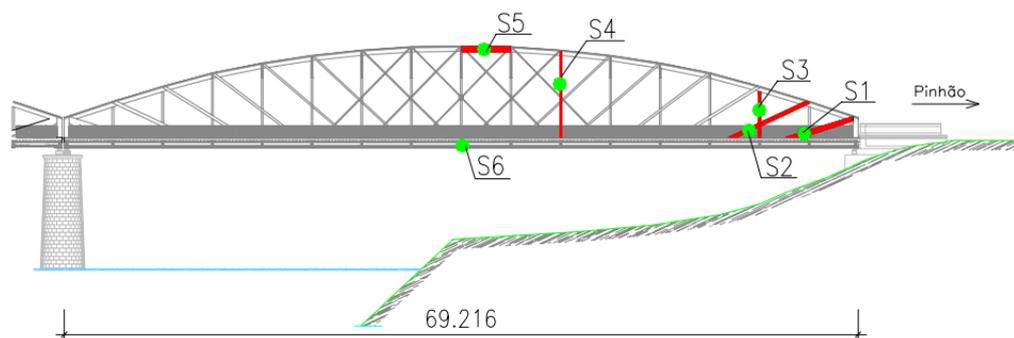
Figura 5.12 – Ponte do Pinhão - Portugal



Fonte: Assis, W. S. et al., 2004.

Para a ponte em questão, foram analisadas somente as deformações medidas nas seções S1 e S2, estas posicionadas nas segunda e terceira diagonais do lado de acesso ao Pinhão desde ponte, conforme ilustra a Figura 5.13.

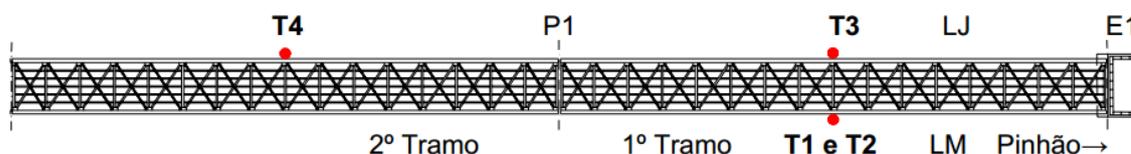
Figura 5.13 – Disposição das seções de interesse onde os extensômetros foram fixados – Ponte do Pinhão



Fonte: Assis, W. S. et al., 2004.

A medição da temperatura ambiente vinculada às seções S1 e S2 foi realizada através de dois detectores resistivos, denominados neste trabalho por T1 e T2. A escolha desses sensores se deu devido a sua localização, pois dentre os existentes, foram os posicionados mais próximos às seções de interesse, conforme é representado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Disposição dos sensores de temperatura em planta



Fonte: Assis, W. S. et al., 2004.

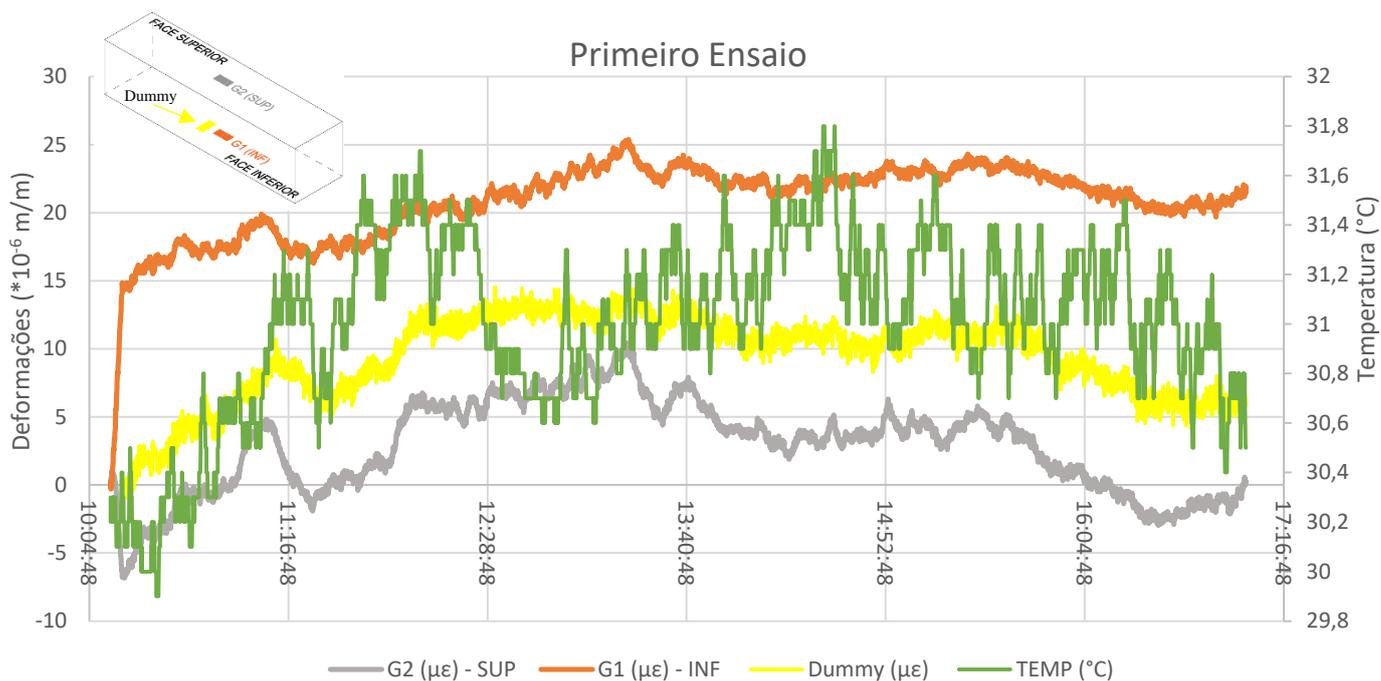
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Ensaio Experimental

Conforme previamente descrito, o ensaio consistiu em manter um corpo de prova carregado mecanicamente através da máquina de ensaios universais eletromecânica Shimadzu modelo AGX de forma constante ao longo de aproximadamente 7 horas e submetido a variação térmica ambiente, realizando de forma simultânea o registro das deformações observadas nos extensômetros e da temperatura monitorada pelo termo higrômetro. Os dados medidos pelos dois sistemas de aquisição foram analisados de forma conjunta, de modo que é possível verificar visualmente nos gráficos a influência da variação térmica nas deformações medidas pelos extensômetros.

Tais resultados estão apresentados nas Figura 6.1. e Figura 6.6. A figura mostra as deformações medidas pelos extensômetros fixados nas faces superior e inferior do corpo de prova no sentido longitudinal e pelo *dummy*, fixado no sentido transversal da face inferior. Além disso, está representada também a variação térmica do período registrada pelo termo higrômetro.

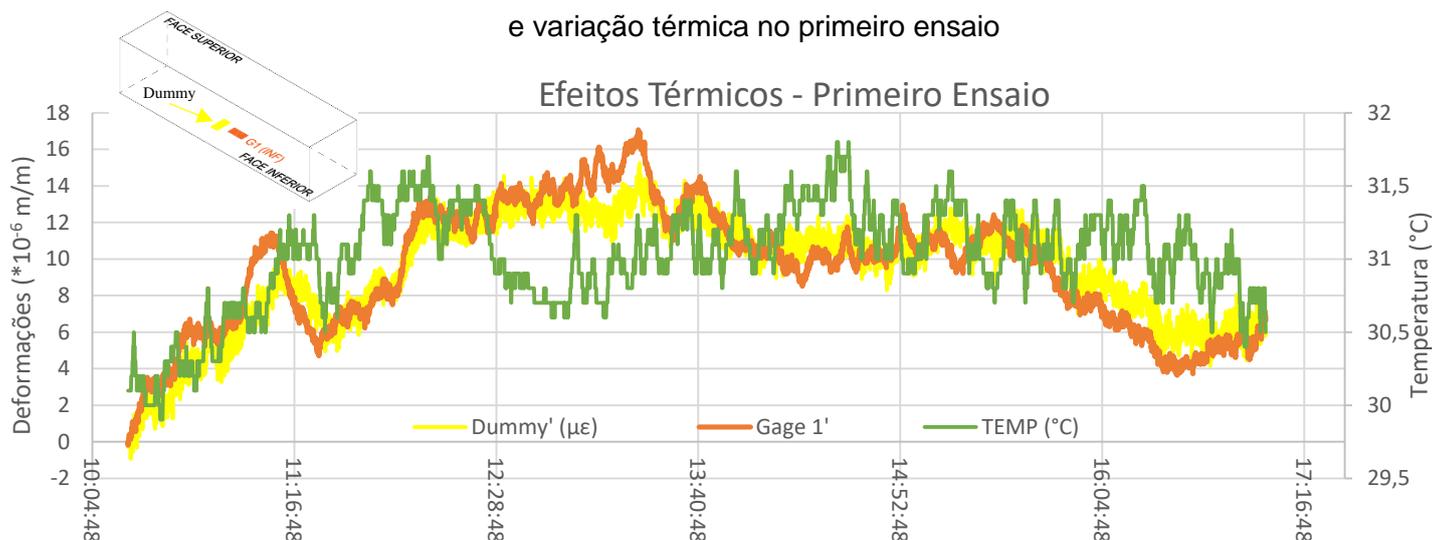
Figura 6.1 – Resultados dos perfis de deformação e variação térmica no primeiro ensaio



Fonte: Acervo do autor.

No ensaio primeiro ensaio foi usado somente um *dummy* localizado próximo ao gage da face inferior (G1). Como é possível perceber através somente de comparação visual, os perfis das deformações e da temperatura apresentam correlação em algumas situações, ou seja, analisando isoladamente o perfil de deformações do *dummy* e do extensômetro colado na face inferior (G1), percebem-se perfis muito parecidos. Comparando-se então somente o G1 e o *dummy* fazendo a remoção da parcela de deformação decorrente do carregamento mecânico, de forma a avaliar somente a parcela térmica, tem-se os perfis apresentados na Figura 6.2. A parcela de deformações decorrente do carregamento mecânico mensurada ao no ensaio pela aplicação de uma carga mecânica e a deformação observada em um curto intervalo de tempo.

Figura 6.2 – Resultados dos perfis de deformação considerando somente a parcela térmica e variação térmica no primeiro ensaio



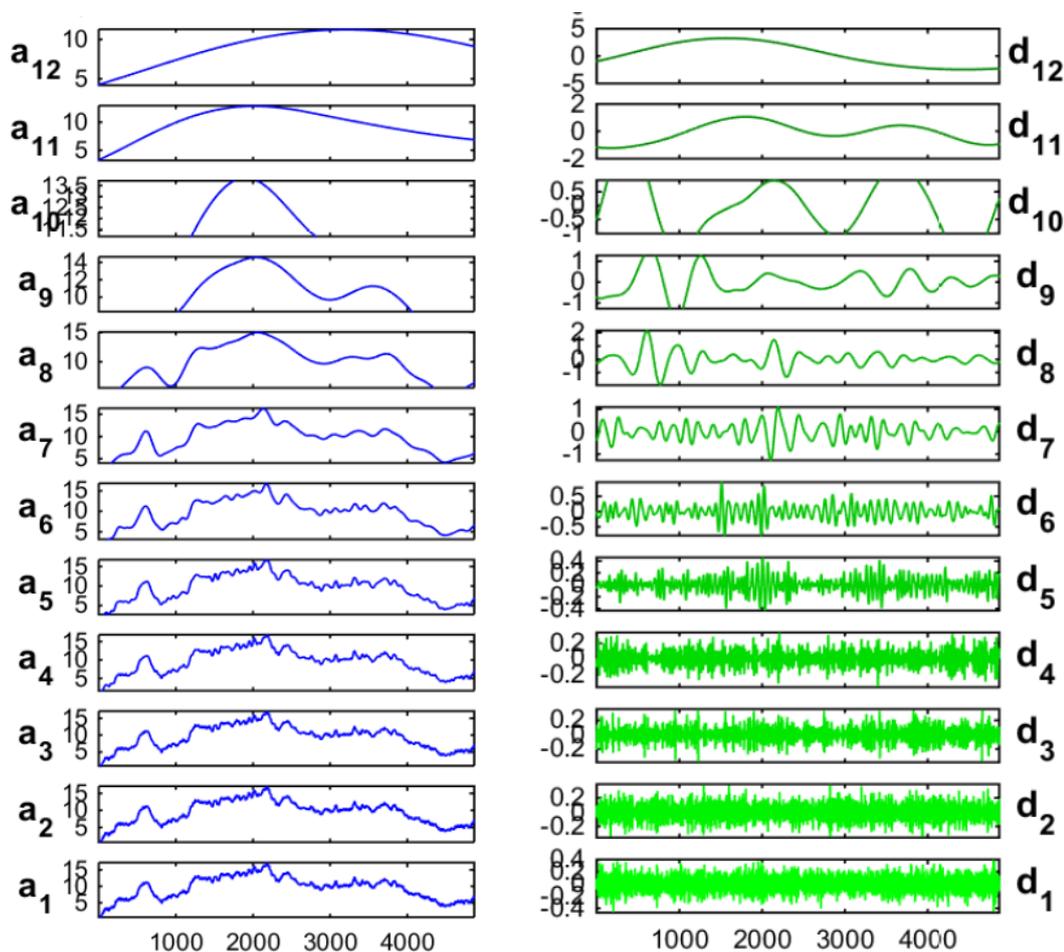
Fonte: Acervo do autor.

Um exemplo de aplicação da análise em multirresolução em dados não-estacionários foi aplicado nessa amostra de deformações medidas pelo sensor G1. Durante o ensaio os dados foram registrados pelo sistema a cada 5 segundos, o que corresponde a um total de 4930 leituras, tanto para os valores de deformação como para os de temperatura. Com esse número total de amostras, os valores de deformações podem ser decompostos em até no máximo 12 níveis, isto é, $J = \log_2(4930) \approx 12$, com análise em multirresolução. (Dimande, 2010).

Na Figura 6.3 apresentam-se os 12 níveis de decomposição dos valores das deformações em termos de componentes de baixa-frequência (a1 a a12) e de alta-frequência (d1 a d12) processados e gerados através do *Wavelet Toolbox* no MATLAB. Os componentes de alta-frequência do sinal indicam variações abruptas contidas no registro desse sinal, o que no caso do ensaio, não faz sentido, já que a análise dessas deformações considera somente o efeito térmico. Os componentes de baixa-frequência extraem as variações lentas do sinal, podendo representar então o efeito da evolução diária da temperatura sobre os dados.

Outra análise realizada mostrou que o valor médio das deformações medidas pelo *dummy*, representam 44,10% das deformações medidas pelo sensor G1. Ou seja, pode-se afirmar que as deformações de origem térmica, têm impacto significativo nas deformações da peça.

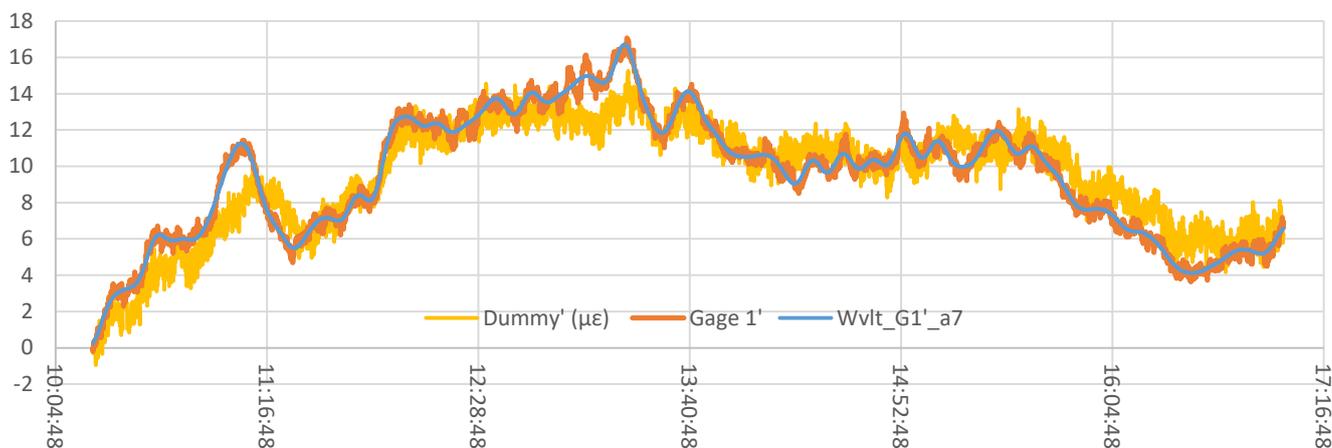
Figura 6.3 – Decomposição do registro das deformações em 12 níveis aplicando as *wavelets* de Daubechies (db10)



Fonte: Acervo do autor.

A avaliação do efeito da temperatura é feita subtraindo, do sinal original das deformações, o sinal reconstruído a partir da componente de baixa-frequência do registro no nível 7 (ver Figura 6.3) e comparando esse resultado com o da subtração entre do sinal original das deformações medidas por G1 e o sinal das deformações medidas pelo *dummy*. A escolha do nível 7 de decomposição para a reconstrução do sinal deve-se pela verificação do baixo nível de perturbação que a evolução da componente de baixa-frequência apresenta a este nível, o que resulta num sinal reconstruído sem perturbações, como pode ser visualizado na Figura 6.3, onde representam-se os perfis das deformações medidas no extensômetro G1, das deformações medidas no *dummy* e dos coeficientes de baixa frequência a_7 , de forma sobreposta.

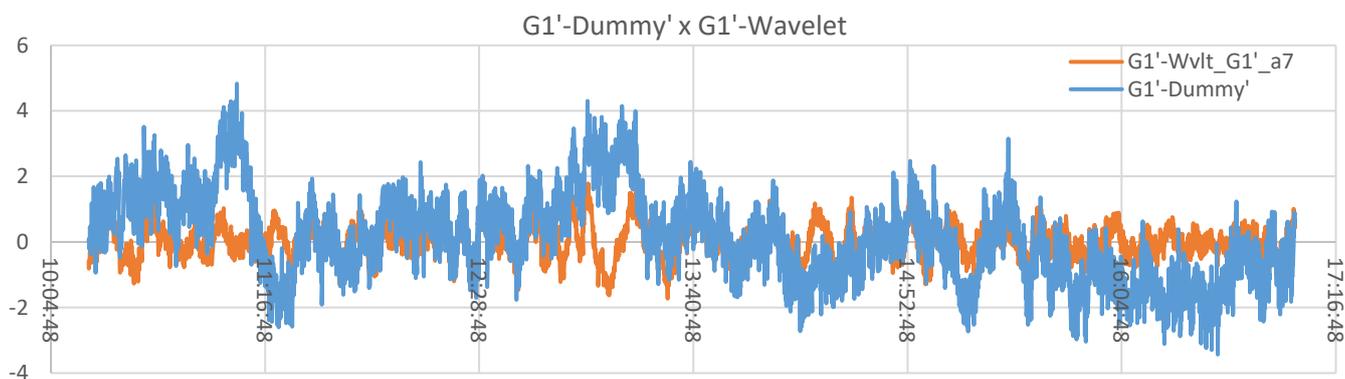
Figura 6.4 – Sobreposição do registro das deformações com o coeficiente a7



Fonte: Acervo do autor.

A aderência entre o perfil do coeficiente a7, o perfil das deformações de G1 e perfil das deformações do dummy é facilmente perceptível, e, realizando, portanto, a subtração entre os valores de deformação de G1 e do coeficiente a7 e comparando com a subtração entre os valores de deformação de G1 e do *dummy*, tem-se:

Figura 6.5 – Comparação entre gage - dummy e gage - wavelet



Fonte: Acervo do autor.

E, a partir do teste de Wilcoxon pareado, já que as amostras não apresentam distribuições normais de probabilidade, é possível afirmar que as duas amostras de subtração entre os valores de deformação de G1 e do coeficiente a7 e de a subtração entre os valores de deformação de G1 e do *dummy* são equivalentes com um nível de confiança de 95%, conforme indicado na Tabela 6.1.

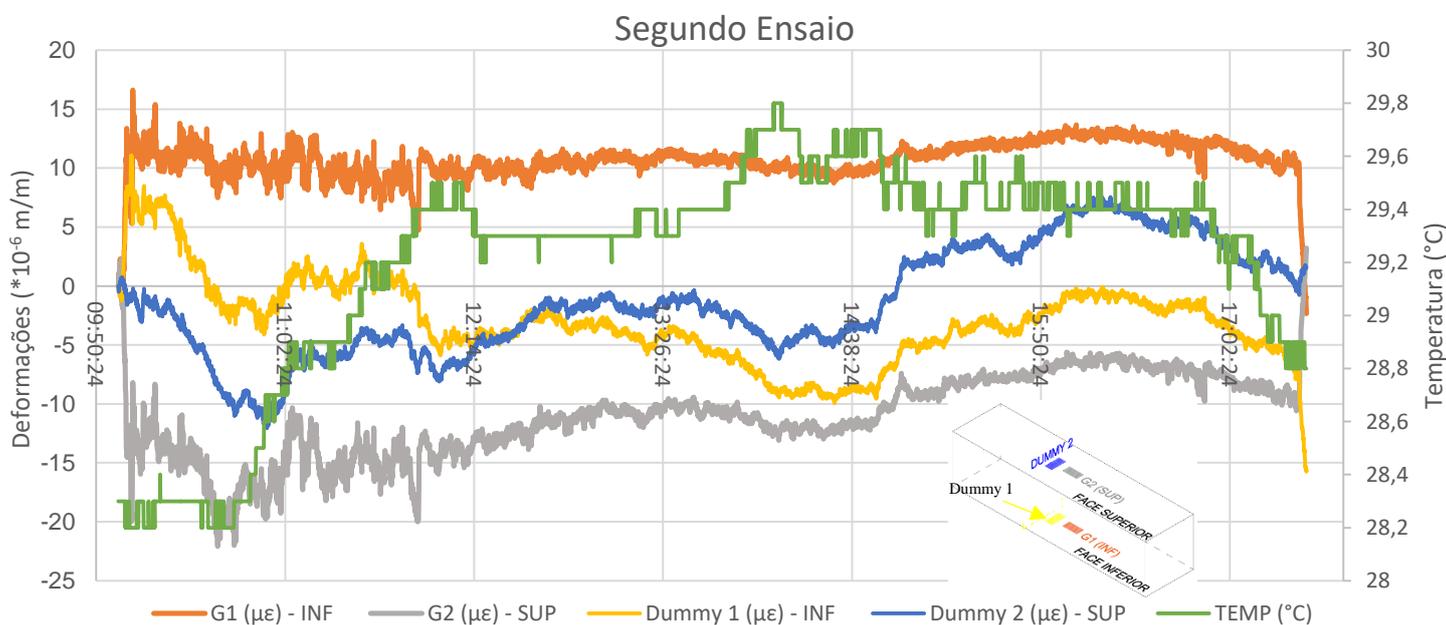
Tabela 6.1 – Resultado teste estatístico Wilcoxon pareado – Primeiro ensaio

Tabela da Estatística do Teste (Wilcoxon)	
Informações	Valores
Estatística	6235458
P-valor	0,0016
Hipótese Nula	0
Limite Inferior	0,022764207
(Pseudo) Mediana	0,060048667
Limite Superior	0,097478805
Nível de Confiança	0,95

Fonte: Acervo do autor.

Já no segundo ensaio, foram utilizados dois *dummies*, um próximo a cada um dos gages G1 e G2, fixados nas faces inferior e superior, respectivamente, do corpo de prova. Para facilitar a interpretação, nomeou-se o *dummy* associado a G1 como sendo *dummy 1* e *dummy* associado a G2 como sendo *dummy 2*.

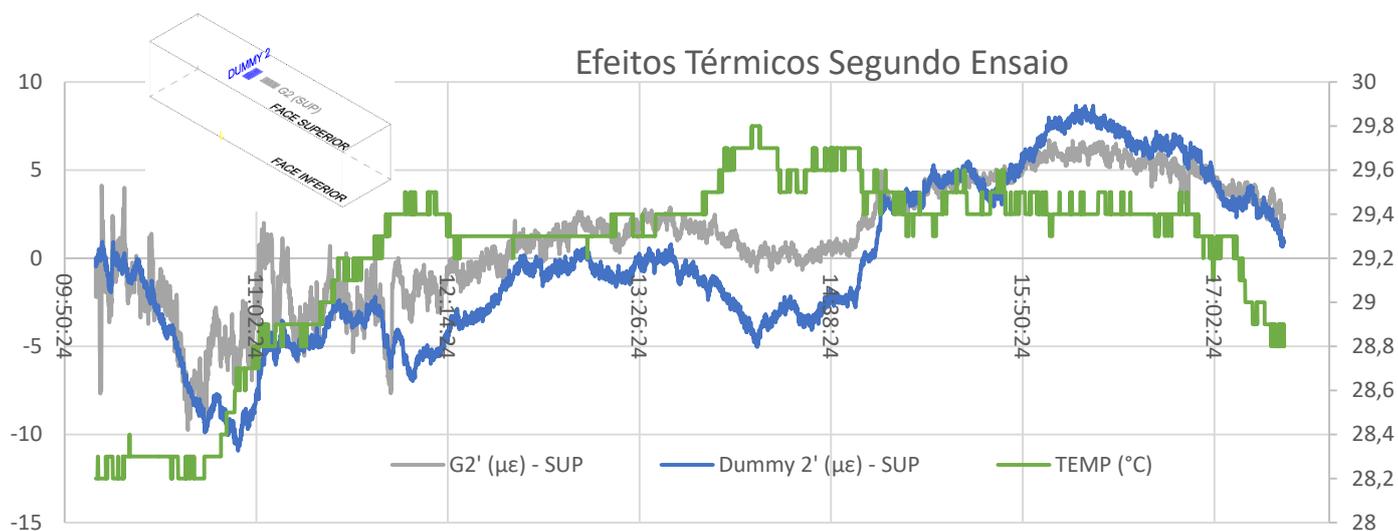
Figura 6.6 – Resultados dos perfis de deformação e variação térmica no segundo ensaio



Fonte: Acervo do autor.

Fazendo então uma análise semelhante a anterior e comparando-se então somente o gage G2 e o *dummy 2* fazendo a remoção da parcela de deformação decorrente do carregamento mecânico, de forma a avaliar somente a parcela térmica, tem-se:

Figura 6.7 – Resultados dos perfis de deformação considerando somente a parcela térmica e variação térmica no segundo ensaio

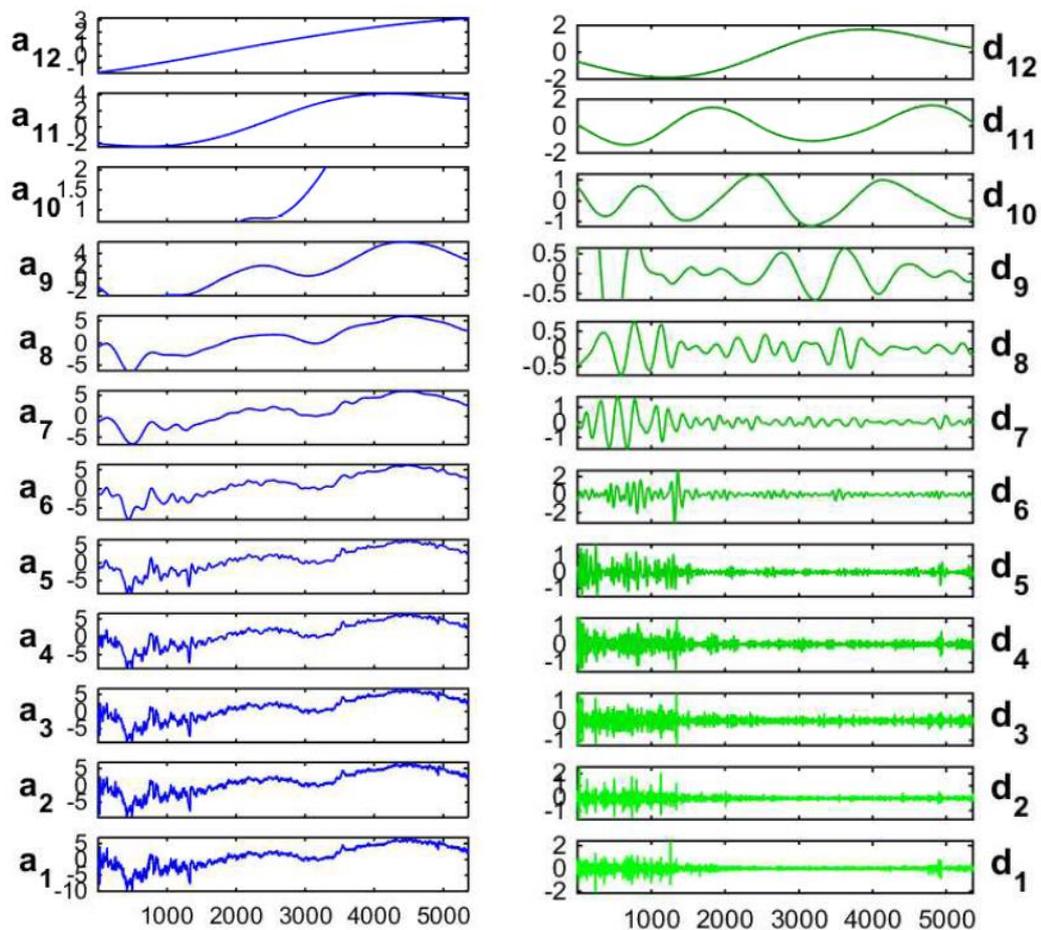


Fonte: Acervo do autor.

Durante o ensaio desse dia os dados também foram registrados pelo sistema a cada 5 segundos, o que corresponde a um total de 5435 leituras. Conforme já apresentado, com esse número total de amostras, os valores de deformações podem ser decompostos em até no máximo 12 níveis, isto é, $J = \log_2(5435) \approx 12$, com análise em multirresolução.

Neste ensaio, a análise realizada mostrou que o valor médio das deformações medidas pelo *dummy 2*, representam 37,28% das deformações medidas pelo sensor G2. Ou seja, pode-se afirmar também que as deformações de origem térmica, têm impacto significativo nas deformações da peça.

Figura 6.8 – Decomposição do registro das deformações em 12 níveis aplicando as *wavelets* de Daubechies (db10)

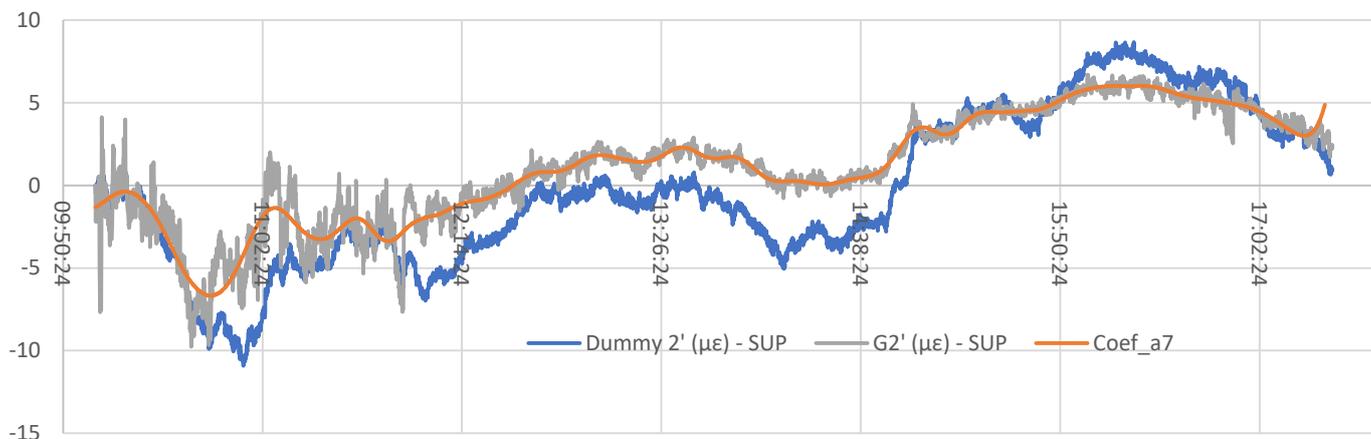


Fonte: Acervo do autor.

Na Figura 6.8 apresentam-se os 12 níveis de decomposição dos valores das deformações em termos de componentes de baixa-frequência e de alta-frequência gerados através do *Wavelet Toolbox* do MATLAB.

Na Figura 6.9 são apresentados os perfis das deformações medidas no extensômetro G2, das deformações medidas no *dummy 2* e dos coeficientes de baixa frequência a_7 , de forma sobreposta.

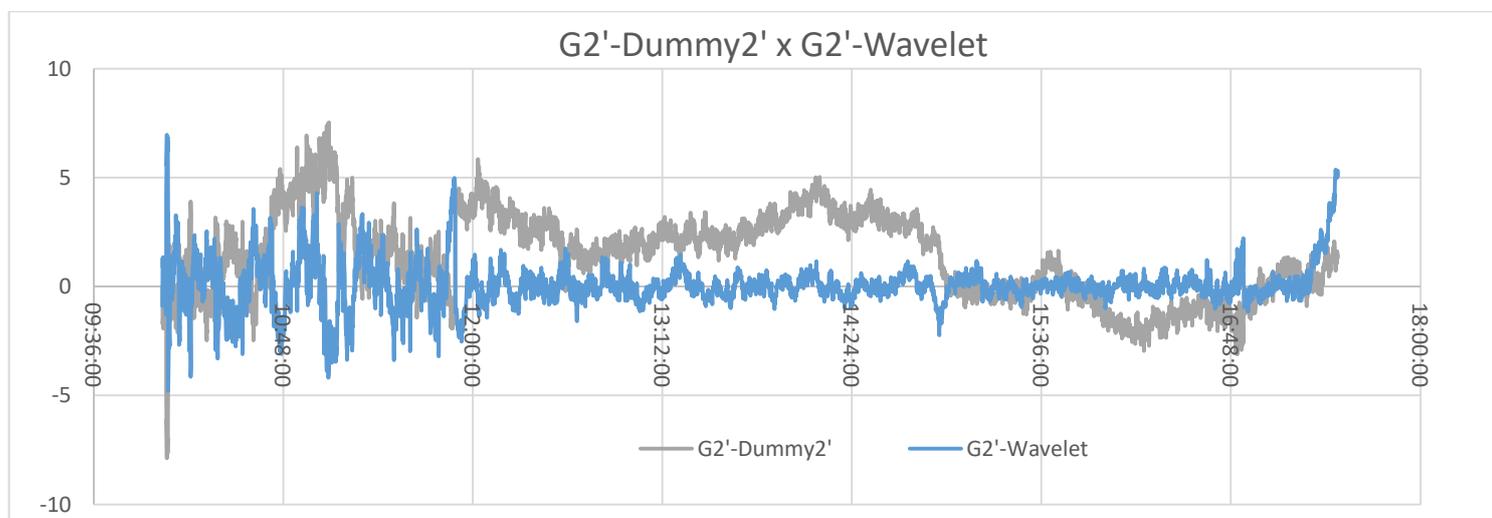
Figura 6.9 – Sobreposição do registro das deformações com o coeficiente a7



Fonte: Acervo do autor.

Realizando a subtração entre os valores de deformação de G2 e do coeficiente a7 e comparando com a subtração entre os valores de deformação de G2 e do *dummy 2*, tem-se:

Figura 6.10 – Comparação entre gage - dummy e gage - wavelet



Fonte: Acervo do autor.

E, também pelo teste de Wilcoxon pareado, é possível afirmar que as duas amostras de subtração entre os valores de deformação de G2 e do coeficiente a7 e de a subtração entre os valores de deformação de G2 e do *dummy 2* são estatisticamente equivalentes a um nível de confiança de 95%, conforme pode ser visto na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultado teste estatístico Wilcoxon pareado – Segundo Ensaio

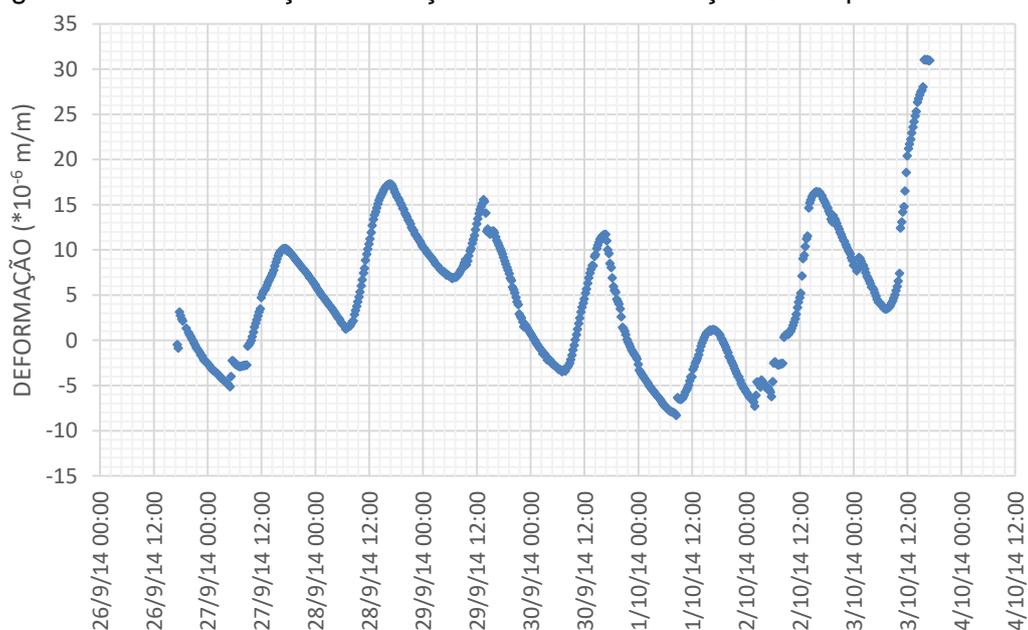
Tabela da Estatística do Teste (Wilcoxon)	
Informações	Valores
Estatística	11715826
P-valor	0
Hipótese Nula	0
Limite Inferior	1,289570939
(Pseudo) Mediana	1,350233896
Limite Superior	1,41153726
Nível de Confiança	0,95

Fonte: Acervo do autor.

6.2 Ponte do Rio Jaguari

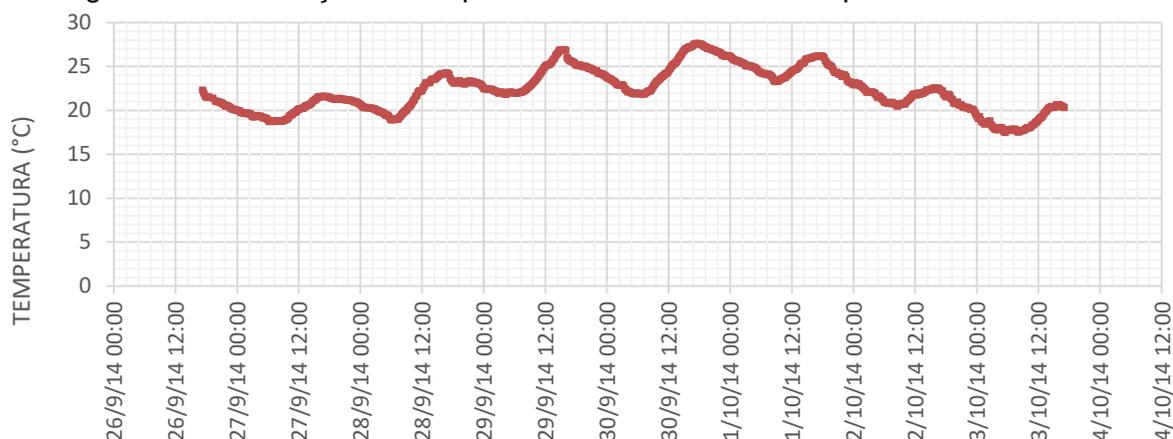
O monitoramento dessa ponte foi realizado desde setembro de 2014. A amostra corresponde a um período de 1 semana com medições realizadas com uma frequência de 1 leitura a cada 15 minutos, o que corresponde a um total de 669 leituras (Figura 6.11). A variação de temperatura para o mesmo período de amostragem é apresentada na Figura 6.12. Com esse número total de amostras, os valores de deformações podem ser decompostos em até no máximo 9 níveis, isto é, $J = \log_2(669) \approx 9$, com análise em multirresolução.

Figura 6.11 – Deformações na seção transversal da seção S1 da ponte do rio Jaguari



Fonte: Acervo do autor.

Figura 6.12 – Evolução da temperatura ambiente durante o período de 1 semana

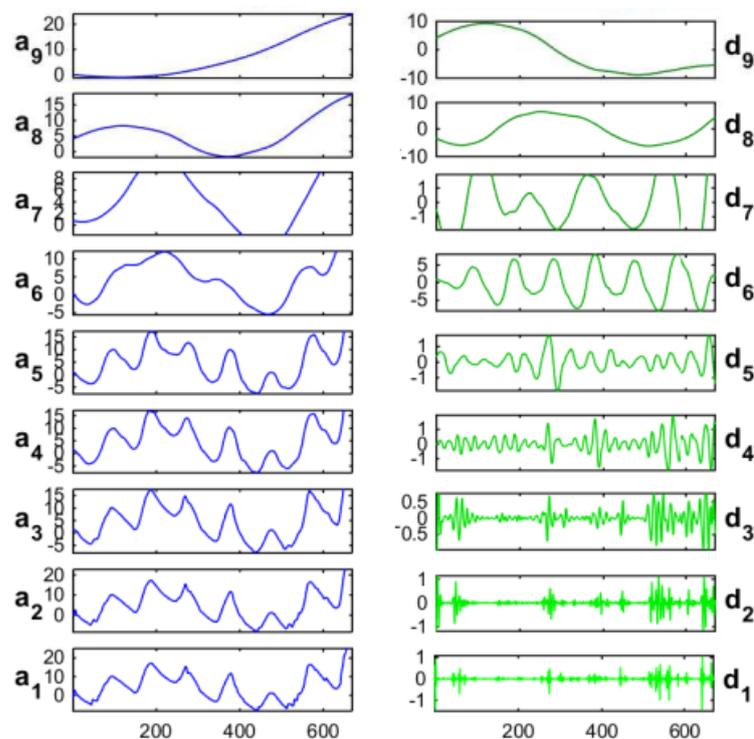


Fonte: Acervo do autor.

Na Figura 6.11 é possível observar a influência da resposta da estrutura devido ao efeito cíclico da temperatura sobre estas medições.

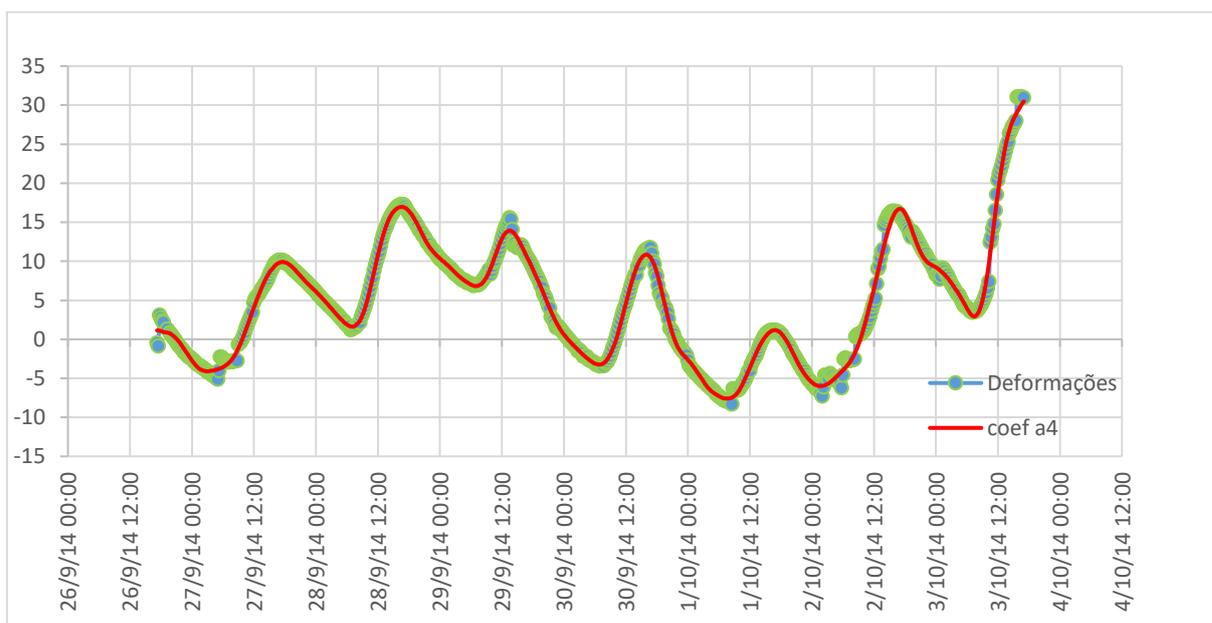
Na Figura 6.13 apresentam-se os 9 níveis de decomposição dos valores das deformações em termos de componentes de baixa-frequência (a1 a a9) e de alta-frequência (d1 a d9) processados no MATLAB. As componentes de alta-frequência do sinal indicam os períodos de maior movimento do tráfego na estrutura através da identificação de variações abruptas contidas no registro desse sinal. As componentes de baixa-frequência extraem as variações lentas do sinal devidas ao efeito da evolução diária da temperatura sobre os dados. A eliminação do efeito da temperatura é feita, mais uma vez, subtraindo, do sinal original das deformações, o sinal reconstruído a partir da componente de baixa-frequência do registro no nível 4. A escolha deste nível de decomposição para a reconstrução do sinal deve-se pela verificação do baixo nível de perturbação que a evolução da componente de baixa-frequência apresenta a este nível (ver Figura 6.14) o que resulta num sinal reconstruído sem perturbações.

Figura 6.13 – Decomposição do registro das deformações em 9 níveis aplicando as *wavelets* de Daubechies (db05)



Fonte: Acervo do autor.

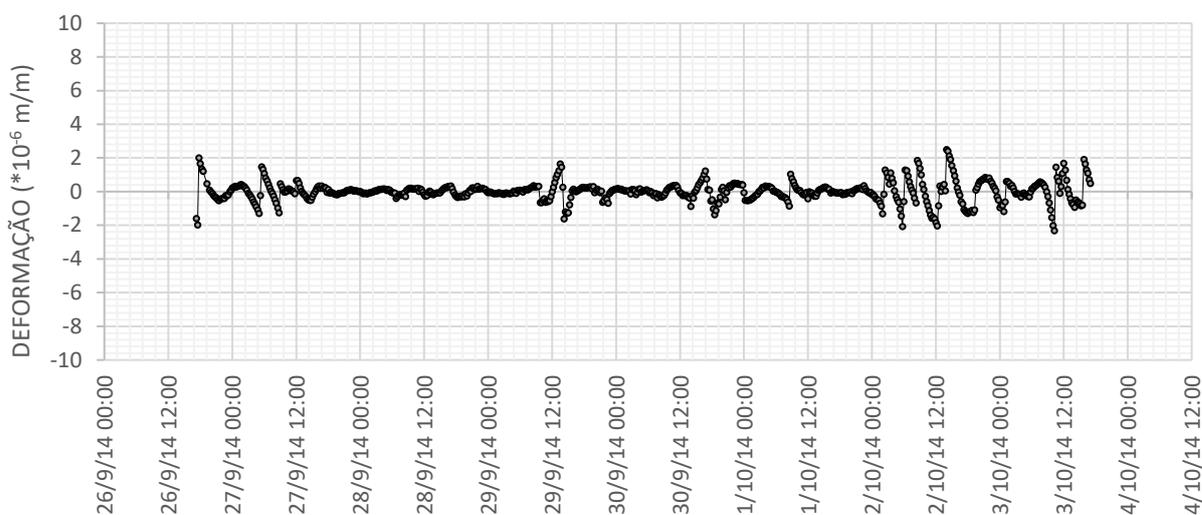
Figura 6.14 - Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução



Fonte: Acervo do autor.

As deformações registradas para o período de uma semana e corrigidas da influência da temperatura diária são apresentadas na Figura 6.15. Para o período de amostragem, a seção em questão apresentou deformações máximas por tração de cerca de $2,5 \cdot 10^{-6}$ m/m devido à ação da passagem do tráfego, o que nesse caso reflete uma predominância do efeito da temperatura nas deformações medidas.

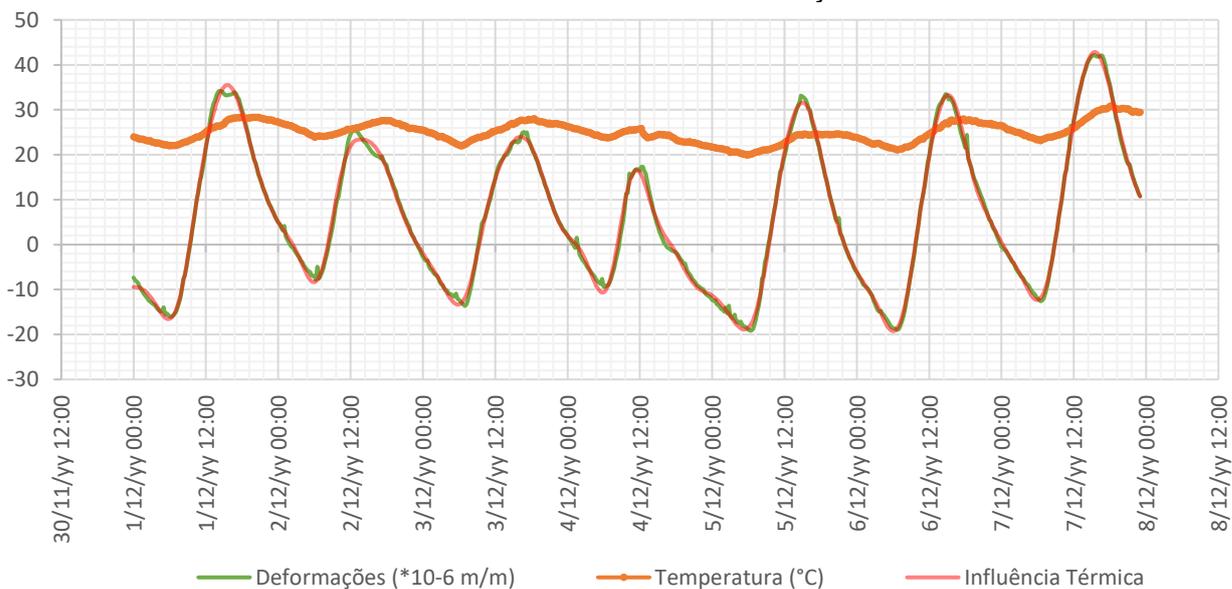
Figura 6.15 – Registro das deformações medidas na seção S1 com o efeito da temperatura removido.



Fonte: Acervo do autor.

Um outro caso de análise da ponte do rio Jaguari foi feita usando a análise em multirresolução, tendo sido escolhido um período de registros correspondente a uma semana. Conforme pode ser observado na Figura 6.16, há também uma correlação entre a variação da temperatura ao longo do dia e os valores das deformações, sendo, portanto, o efeito térmico preponderante.

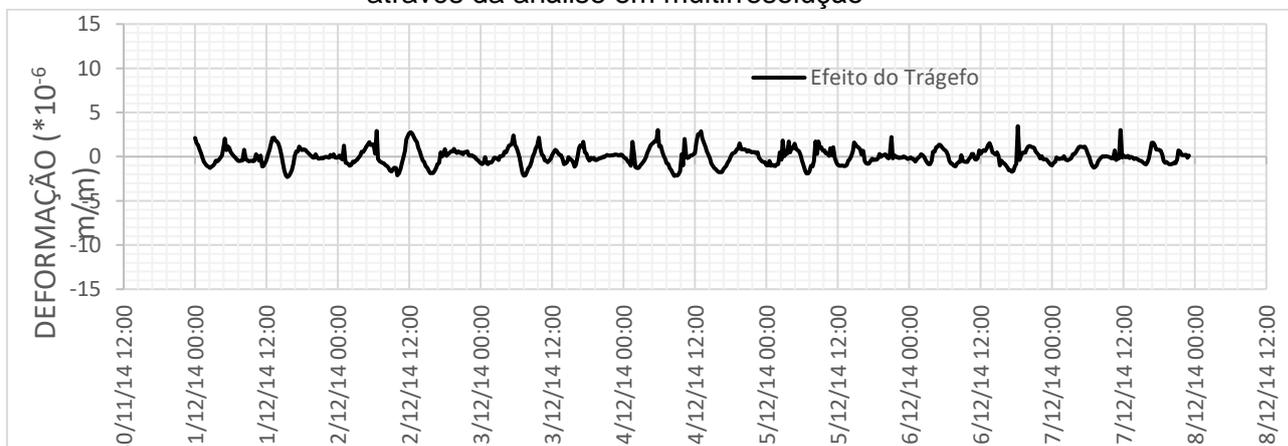
Figura 6.16 – Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução



Fonte: Acervo do autor.

Realizando-se, portanto, a eliminação do efeito da temperatura subtraindo mais uma vez, do sinal original das deformações, o sinal reconstruído a partir análise em multirresolução, conforme verificado na Figura 6.16, obtém-se, de forma análoga, a representação das deformações registradas para o período de uma hora e corrigidas da influência da temperatura e estas são apresentadas na Figura 6.17. Para o período de amostragem, a seção em questão apresentou deformações máximas por tração de cerca de $3,5 \cdot 10^{-6}$ m/m e por compressão de cerca de $2,3 \cdot 10^{-6}$ m/m devido à ação do tráfego.

Figura 6.17 – Comparação entre os dados das deformações com o sinal reconstruído através da análise em multirresolução



Fonte: Acervo do autor.

6.3 Ponte do Pinhão

Para a verificação dos dados da ponte do Pinhão, foi feita a consideração de que a influência da temperatura sobre a estrutura variou linearmente, visto que o período de monitoramento foi de 1h e ocorreu durante uma prova de carga na estrutura, situação condizente com a variação térmica observada nos registros. A aproximação da variação térmica se deu pela construção da reta a partir da interpolação de pontos com valores conhecidos de deformação. Tal situação pode ser observada na Figura 6.18. O trecho central, onde há uma variação brusca nos registros, é condizente com a passagem dos veículos durante a prova de carga.

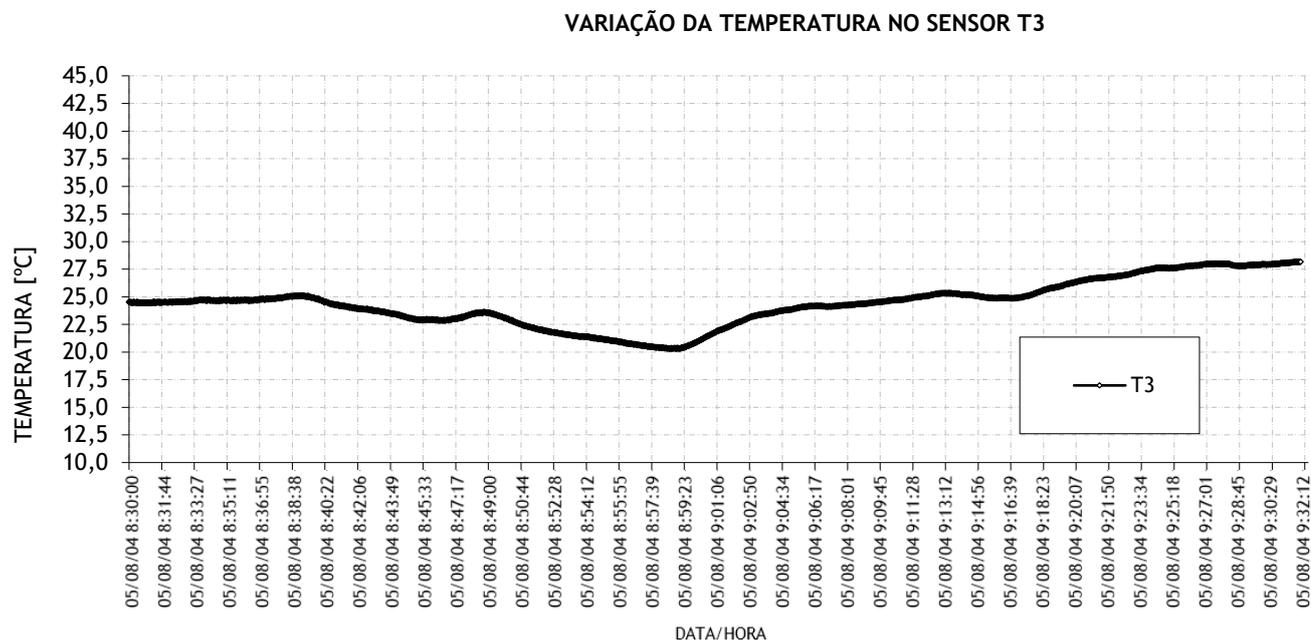
Figura 6.18 – Comparação entre os dados das deformações com os de temperatura reconstruídos através de interpolação linear



Fonte: Acervo do autor.

A escolha da variação térmica a partir de uma linearização se deu pela análise do registro de temperatura medido pelo sensor posicionado próximo da seção analisada. Esse registro está representado na Figura 6.19.

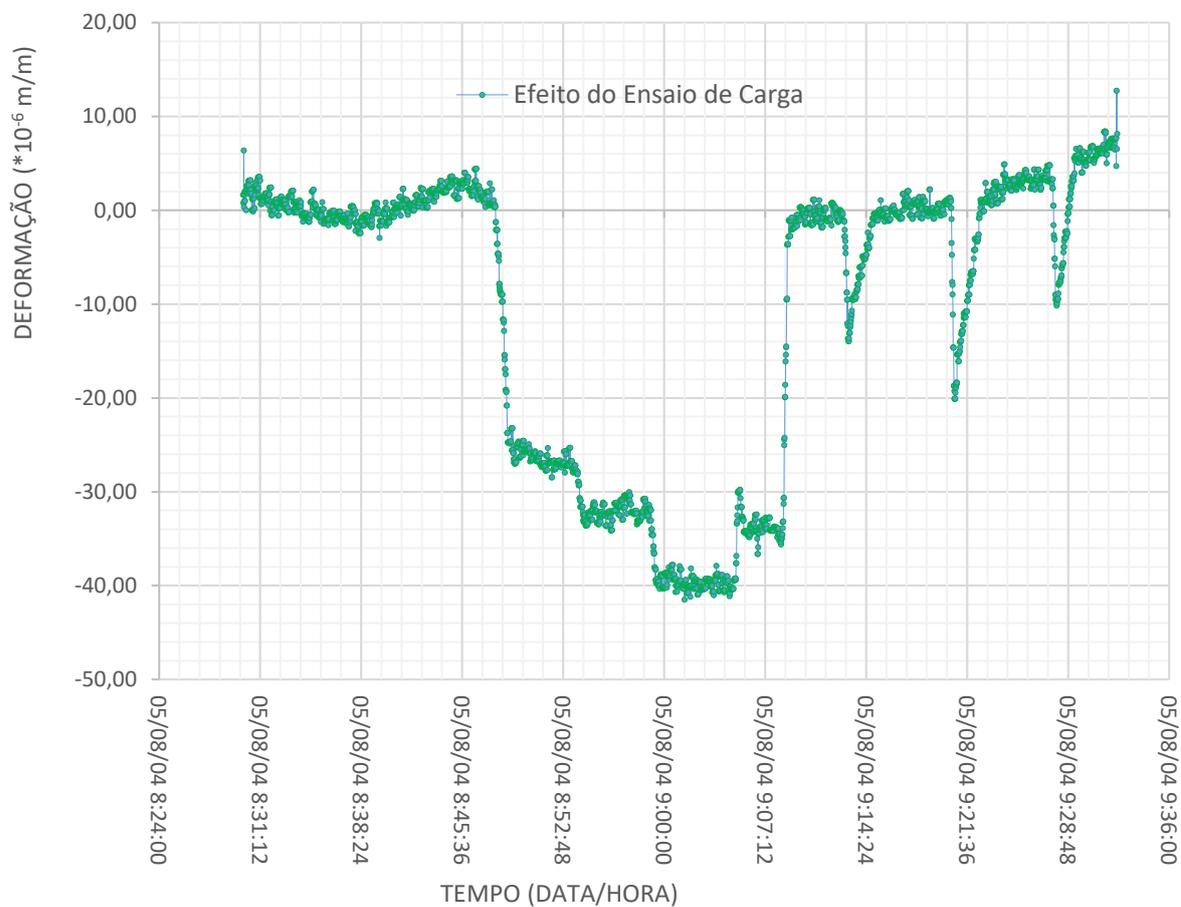
Figura 6.19 – Registro das temperaturas no sensor T3 da Ponte do Pinhão



Fonte: Acervo do autor.

Realizando-se, portanto, a eliminação do efeito da temperatura subtraindo, do sinal original das deformações, o sinal reconstruído a partir da componente interpolação, conforme verificado na Figura 6.20, as deformações registradas para o período de uma hora e corrigidas da influência da temperatura através da interpolação são apresentadas na Figura 6.20. Para o período de amostragem, a seção em questão apresentou deformações máximas por tração de cerca de $13 \cdot 10^{-6}$ m/m por compressão de cerca de $41 \cdot 10^{-6}$ m/m devido à ação da passagem dos veículos durante a prova de carga.

Figura 6.20 – Registro das deformações medidas na seção ES11 da ponte do Pinhão com o efeito da temperatura obtido por interpolação removido.



Fonte: Acervo do autor.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu em um estudo teórico-experimental e de análise do efeito térmico nas deformações sofridas por elementos estruturais. Foram apresentadas técnicas para quantificação dos níveis de deformação de origem térmica através da Transformada Wavelet sem necessariamente associar ao ensaio um dispositivo específico para quantificação dessa grandeza, como um *dummy*, por exemplo.

É bem sabido que as variações térmicas podem produzir esforços internos às estruturas da mesma ordem de grandeza ou até superiores que outras cargas de qualquer natureza. Contudo, as tensões devidas à temperatura são produzidas somente em elementos estruturais cuja vinculação resulta em situações hiperestáticas, quando a expansão ou contração térmica é restringida, situação correspondente aos casos das pontes abordadas nesse trabalho.

Na análise feita com as *wavelets* dos dados do ensaio em laboratório, onde as condições de vinculação era de simplesmente apoiada, os resultados, entretanto, os melhores resultados foram encontrados utilizando as *wavelets*-mães de Daubechies e estes resultaram como satisfatórios após a análise estatística através do teste de Wilcoxon Pareado, que comprovou a validade da metodologia quando comparados os valores de deformação medidos pelos *dummies* ou gerados através da TW.

Através do resultado dos ensaios de laboratório, pode-se afirmar que a parcela de deformação de origem térmica corresponde a aproximadamente 40% das deformações totais medidas.

Conforme verificado, o método aplicado apresenta limitações, já que os resultados dos níveis de deformação após a remoção do efeito térmico nos casos hiperestáticos não apresentam nem valores significativos nem uma correspondência com a passagem de veículos, levando em consideração os horários de maior tráfego.

Possivelmente, no caso da análise da Ponte do Pinhão, o problema maior esteja associado a brevidade do ensaio de apenas 1h, tempo pouco suficiente para que os efeitos térmicos pudessem ser de fato significativos do ponto de vista da metodologia proposta e possíveis de serem quantificados de forma mais expressiva na peça instrumentada.

Outra limitação, no caso da ponte do rio Jaguari, se deu pelo fato das medições serem realizadas com o intervalo de 15 minutos e isso pode acabar mascarando o efeito da

passagem dos veículos, ou seja, de fato o sinal de deformação medido seria puramente térmico.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se a reprodução da técnica laboratorial proposta neste trabalho, porém em uma câmara térmica com temperatura controlada para que seja possível quantificar de forma exata a influência da temperatura, inclusive simular períodos longos com temperaturas constantes para verificar o efeito disso nas deformações.

Sugere-se também a continuação desse estudo em laboratório, com variáveis de influência do problema controladas, simulando também situação de hiperestaticidade e, a partir daí, iniciar o entendimento do efeito da temperatura em peças com restrições de deslocamentos. Um estudo mais específico com posterior tratamento estatístico poderá ser feito sobre esses resultados (identificação de valores máximos e mínimos ocorridos e as frequências de ocorrência) para o estudo, por exemplo, da fadiga sofrida pelo material em condições de variação térmica mais expressiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

_____. **ABNT NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.

ADDISON, P. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook - Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance**, Institute of Physics Publishing, Edinburgh, UK, ISBN: 0-7503-0692-0, 2002.

ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico de falhas em para-raios utilizando termografia**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.

ANDOLFATO, R. P. **Extensometria Básica**. Notas de aula - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira– SP, 2004.

ASSIS, W. S. et al. **Instrumentação e observação do comportamento da ponte do Pinhão durante ensaio de carga**. Relatório Técnico. Porto. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2004.

ASSIS, W. S. **Sistemas Computacionais de Apoio à Monitoração de Estruturas de Engenharia Civil**. Tese de Doutorado em Estruturas de Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo. 2007.

BRANCO, F. A.; MENDES, P. A. **Thermal Actions for Concrete Bridge Design**, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, N° 8, Agosto, 1993. ISSN 0733-9445/93/0008-2313.

BITTENCOURT, T. N. et al. **Desenvolvimento e aplicação de técnicas de “structural health monitoring” para avaliação estrutural de pontes rodoviárias**. Relatório Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo. 2015.

BOLLER, C.; CHANG, F.; FUJINO, Y. **Encyclopedia of Structural Health monitoring**, England, UK, p. 1-2, ISBN: 978-0-470-05822-0, 2009.

CAMPILHO, A. **Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição**. FEUP edições. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª edição. Portugal, 2000.

CEPSRM - Centro estadual de pesquisas em sensoriamento remoto e meteorologia. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/rem.html>>. Acessado em: 04/08/2016

DIMANDE, A. O. **Análise Experimental de Pontes durante a Construção e em Serviço.** Tese de Doutorado em Estruturas de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2010.

DOYLE, J. F. **Modern Experimental Stress Analysis: Completing the Solution of Partially Specified Problems**, England, UK, ISBN 0-470-86156-8, 2004.

FÉLIX, C. M. da S. **Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte.** Tese de Doutorado em Estruturas de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2004.

FIGUEIREDO, E. J. F. **Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte.** Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2006.

FIGUEIREDO, E. J. F. et al. **Structural Health Monitoring Algorithm Comparisons Using Standard Data Sets.** Los Alamos – National Laboratory. Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal. 2009.

GHALI, A.; FAVRE, R.; ELDBADRY M.. **Concrete Structures - Stresses and Deformations**, England, UK, ISBN 0-203-98752-7, 2002.

GRIMM, A. M. **Meteorologia Básica.** Notas de aula - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 1999.

GURGEL, V. C. **Aplicação de Técnicas Wavelets em Análise de Séries Temporais para Detecção de Correlações.** Monografia - Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Rio Grande do Norte, 2013.

HAAR, A. **Zur theorie der orthogonalen functionen-systeme.** Mathematische Annalen, Berlin, v.69, p. 331-371, 1910.

MATLAB®. The Language of Technical Computing, versão R2014b, Mathworks. 2014.

MEDEIROS, C. B.; ROSA, E. **Apostila de extensometria para disciplina de graduação em Engenharia Mecânica.** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS, **Instalação e configuração de dispositivos DAQ PCI/PCI Express e PXI/PXI Express.** Disponível em: < <http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/pt/pci-pxi>> Acesso em: 13 de Mai. de 2018.

NETO, J. O. dos S. **Transferência de calor.** Notas de aula - Universidade Estadual do Maranhão, São Luis – MA, 2012.

OMEGA™. Disponível em:
 <https://www.omega.com/pptst/SGT_SHEAR_GAGES.html> Acessado em:
 15/10/2018

PALECHOR, E. U. L. **Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Wavelets e Dados Numéricos e Experimentais**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Brasília, DF. 2013.

PORTAL ACTION, **TESTE DE WILCOXON PAREADO**. Disponível em:
 <<http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas/teste-de-wilcoxon-pareado>> Acesso em: 13 de Mai. de 2018.

PRESEZNIAK, F. A. **Identificação de danos e determinação da vida útil em estruturas usando transformada wavelet e conceitos de mecânica da fratura**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais. Curitiba, PR. 2007.

RIBEIRO, F. **Sensor inteligente em fibra ótica para localização de deformações em estruturas planas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Paraná. 2014.

SANTOS, E. M. C. dos. **Análise Térmica de Barragens de Betão Durante a Construção**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas - Instituto Superior Técnico, Portugal. 2013.

SILVA, P. G da.; BOGONI, J. A. **Introdução a Estatística Básica**. Notas de aula - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2015.

SILVEIRA, A. P. C. da. **A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado pré-esforçado**. Tese de Doutorado – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 1996.

SOARES, W. C. **“Um Método Não-Limiar para Redução de Ruído em Sinais de Voz no Domínio Wavelet”**. Tese de Doutorado Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.

TELES, M. **Comportamento Térmico de Barragens de Betão**. Tese de Doutorado em Estruturas de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1985.

VISHAY, **Vishay Micro-Measurements Strain Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive**, 2018, 4p. Disponível em:
 <<http://http://www.vishaypg.com/docs/11127/11127B127.pdf>> Acesso em 06 de Mai de 2018.

VOLKMAR, Z. **Applications of Wavelet Analysis in System Identification**. Doctoral Thesis, Bauhaus-Universität at Weimar, 2002.

WAVELET. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Wavelet>>. Acessado em: 12/12/2017.

WELTY, J. R. **Transferencia de Calor Aplicada da la Ingeniería**, Balderas, México, ISBN 968-18-0628-X, 1996.