



Métodos de deteção de danos baseados na resposta estática da estrutura - Aplicação ao caso de estudo da Ponte de Lanheses

MARIA EUGÉNIA MERLIN PASTORELLO

Novembro de 2017

MÉTODOS DE DETEÇÃO DE DANOS BASEADOS NA RESPOSTA ESTÁTICA DA ESTRUTURA – APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DA PONTE DE LANHESES

MARIA EUGÊNIA MERLIN PASTORELLO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Ph.D Carlos Manuel da Silva Félix

Co-Orientadores: Ph.D Carlos Filipe Guedes Rodrigues

Me. Matheus Henrique Dal Molin Ribeiro (UTFPR)

NOVEMBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Índice de equações.....	xix
Abreviaturas	xxi
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Métodos de detecção de danos.....	7
Capítulo 3 Caso de estudo – Ponte de Lanheses	25
Capítulo 4 Aplicação dos métodos de detecção de danos ao estudo da Ponte de Lanheses	49
Capítulo 5 Considerações Finais	61
Referências Bibliográficas	65
Anexo A – Resultados da regressão linear múltipla	69
Anexo B – Resultados da regressão linear múltipla (Realocação dos sensores).....	75
Anexo C – Gráfico de controle multivariado – T^2 (Realocação dos sensores) - RLM	81
Anexo D – Gráfico de controle multivariado – T^2 (PCA).....	85
Anexo E – Gráfico de controle multivariado – T^2 (RLM - PCA)	91

RESUMO

O funcionamento indevido de uma estrutura civil pode causar diversos problemas e transtornos sociais se não corrigido a tempo. Nos dias atuais, é cada vez mais necessário conhecer o comportamento estrutural, uma vez que muitas obras de arte estão no final de sua vida útil estimada em projeto. Assim, surge o conceito de monitoração da integridade estrutural, com o intuito de monitorar e antecipar problemas estruturais que possam ser gerados durante a fase de serviço e auxiliar na manutenção. As técnicas de detecção de danos fazem parte do processo de monitorização e são cada vez mais comuns quando se trata de estruturas de grande porte. Podemos distinguir estas técnicas em abordagens baseadas em modelo numérico e em dados, a partir de monitorização estática ou dinâmica, ou ainda as duas em conjunto. A monitorização estática engloba a observação de grandezas de carácter estático, como os deslocamentos, as deformações ou as rotações, enquanto a monitorização dinâmica utiliza fatores como o comportamento modal e frequências de vibração. Neste trabalho será retratado o conceito de monitorização estrutural e apresentados alguns métodos de detecção de danos baseados na resposta estática da estrutura. Dentre os métodos estudados aplicou-se a regressão linear múltipla, a análise de componentes principais e uma junção destes dois, buscando a identificação de danos na ponte em estudo, a Ponte de Lanheses, através de um gráfico de controle multivariado. O uso destes métodos permitiu também fazer uma análise da eficiência do sistema de monitorização instalado na ponte na detecção de danos.

Palavras-chave: Detecção de danos, resposta estática, regressão linear múltipla, análise de componentes principais.

ABSTRACT

The malfunction of a civil structure can cause various problems and social disruptions if not corrected in time. Nowadays, it is increasingly necessary to know the behavior of the structures, since many bridges and viaducts are at the end of their lifetime estimated in design. Thereby, the concept of structural health monitoring appears in order to anticipate structural problems that can be generated during the service life. Damage detection techniques are part of the monitoring process and are becoming more common when it comes to large-sized structures. We can distinguish these techniques in approaches based on numerical model and data, from static or dynamic monitoring, or both together. Static monitoring includes, among others, displacements, deformations and rotations, while dynamic monitoring uses factors such as modal behavior and vibration frequencies. In this work the concept of structural monitoring will be denoted and some methods of damage detection based on the static response of the structure will be presented. Among the studied methods, multiple linear regression, principal component analysis and a combination of these two were used to identify the damage in the studied bridge. The use of these methods has shown that the monitoring system installed on the bridge is ineffective when the damage is too far from the sensors since it is only possible to identify the damage located close to the sensors.

Keywords: Damage detection, static monitoring, multiple linear regression, principal component analysis.

AGRADECIMENTOS

Tenho sempre luz em todas as minhas escolhas e caminhos, sou grata unicamente a Deus por isso.

Agradeço aos meus pais e irmão pelo constante amor, apoio e por depositarem em mim toda a confiança de que necessito.

Agradeço ao professor Gustavo Lacerda Dias, coordenador do curso de Engenharia Civil da UTFPR, pela incansável luta para tornar esta oportunidade de intercâmbio possível.

Aos honráveis professores PhD. Carlos Manuel da Silva Félix, PhD. Carlos Filipe Rodrigues e Msc. Matheus Ribeiro pela inigualável disposição em me orientarem nesta caminhada, sem eles este trabalho não teria sido possível nem agradável.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP pela oportunidade de estudo e excelência no acolhimento, e à empresa NewMENSUS, Lda. pela disponibilização de elementos e os dados relativos à Ponte de Lanheses.

ÍNDICE DE TEXTO

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivo	4
1.4	Estrutura da dissertação	4
Capítulo 2	Métodos de detecção de danos	7
2.1	Abordagens baseadas em modelos numéricos e em dados	8
2.2	Monitorização dinâmica	9
2.3	Monitorização estática	9
2.4	Algoritmos de detecção de danos	10
2.4.1	Variação de deslocamentos estáticos	11
2.4.2	Técnicas de otimização	13
2.4.3	Análise de componentes principais (ACP's)	18
2.4.4	Regressão linear múltipla (RLM)	19
2.4.5	Análise autoregressiva (AR)	22
2.5	Gráfico de controle multivariado (GCM) - Hotelling (T^2)	23
Capítulo 3	Caso de estudo – Ponte de Lanheses	25
3.1	Localização e histórico da ponte	26
3.2	Sistema de monitorização estrutural	31
3.2.1	Estudo dos dados provenientes da monitorização estrutural	35
3.3	Desenvolvimento do Modelo Numérico	37
3.3.1	Validação do modelo numérico	43

ÍNDICE DE TEXTO

3.3.2	Simulação de danos no modelo.....	44
3.3.3	Coleta de dados a partir do modelo numérico.....	46
3.3.4	Estimativa dos ruídos.....	47
Capítulo 4	Aplicação dos métodos de deteção de danos ao estudo da Ponte de Lanheses	49
4.1	Aplicação do método de regressão linear múltipla	49
4.2	Aplicação do método da análise das componentes principais	55
4.3	Aplicação do método da RLM e ACP.....	58
Capítulo 5	Considerações Finais.....	61
5.1	Conclusões	61
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema das componentes de um sistema de monitorização estrutural.	2
Figura 2.1 - Técnicas de deteção de danos conforme abordagem.	11
Figura 2.2 - Representação dos pontos mínimo e máximo das funções $f(x)$ e $-f(x)$	13
Figura 2.3 - Técnicas de otimização.....	15
Figura 2.4 - Estrutura básica de um algoritmo genético.	16
Figura 2.5 - Esquema geral de um neurônio artificial.	17
Figura 2.6 - Esquema-base da aplicação da ACP.	19
Figura 2.7 - Sugestão regressão não-linear.....	21
Figura 2.8 - Sugestão regressão linear.	21
Figura 3.1 - Sequência de atividades desenvolvidas –metodologia.....	25
Figura 3.2 - Localização da Ponte de Lanheses em Portugal.....	26
Figura 3.3 - Vista geral da Ponte de Lanheses.....	27
Figura 3.4 - Tabuleiro da Ponte de Lanheses.	27
Figura 3.5 - Junta de dilatação do encontro móvel.....	28
Figura 3.6 - Vista inferior da ponte.....	30
Figura 3.7 - Sensores de temperatura.....	32
Figura 3.8 - Transdutores de deslocamento nos pilares P32 e P35.	33
Figura 3.9 - Sensores de pressão nos tramos T26 e T28.	33
Figura 3.10 - Instalação do sonar altmétrico junto ao pilar P20.	34
Figura 3.11 - Instalação do sensor de pressão junto ao pilar P20.....	34
Figura 3.12 - Esquema do sistema de monitorização provisório.....	34

Figura 3.13 - Relação entre variação de temperatura uniforme do tabuleiro e deslocamentos relativos dos pilares – 2011/2012.....	36
Figura 3.14 - Relação entre variação de temperatura uniforme do tabuleiro e deslocamentos relativos do tabuleiro – 2015.....	36
Figura 3.15 - Relação entre variação de temperatura uniforme e rotação do pilar 26 – 2015.....	36
Figura 3.16 - Tramos internos (padrão).....	38
Figura 3.17 - Tramo extremo , encontro fixo.	38
Figura 3.18 - Tramo extremo, encontro móvel.	38
Figura 3.19 - Seção transversal do tabuleiro.....	39
Figura 3.20 - Representação dos pilares.	40
Figura 3.21 - Seção transversal - elemento 17.....	41
Figura 3.22 - Seção transversal - elemento 18.	41
Figura 3.23 - Seção transversal - elemento 19A.....	41
Figura 3.24 - Seção transversal zona do leito do rio - elemento 19B.....	41
Figura 3.25 - Representação dos cabos de pré-esforço.	42
Figura 3.26 - Modelo final da Ponte de Lanheses em ambiente ROBOT.	43
Figura 3.27 - Comparação entre dados da monitorização e do modelo numérico - Pilar P26.	44
Figura 3.28 - Relação entre os dados da monitorização e do modelo numérico - Pilar P26.....	44
Figura 3.29 - Esquema de inserção e aquisição de dados através do modelo numérico.....	47
Figura 3.30 – Dados do modelo numérico somado o ruído - temperatura vs. deslocamento caso de dano 2 – pilar 32.....	48
Figura 3.31 - Dados do modelo numérico somado o ruído - temperatura vs. deslocamento caso de dano 5 – pilar 26.....	48
Figura 4.2 - RLM Gráfico T ² - Caso de dano 1.	51
Figura 4.3 - RLM Gráfico T ² - Caso de dano 2.	51
Figura 4.4 - RLM Gráfico T ² - Caso de dano 3.	51
Figura 4.5-RLM Gráfico T ² - Caso de dano 4.	51
Figura 4.6 - RLM Gráfico T ² - Caso de dano 5.	52

Figura 4.7 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 6.....	52
Figura 4.8 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 7.....	52
Figura 4.9 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 8.....	52
Figura 4.10 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 9.....	52
Figura 4.11 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 10.....	52
Figura 4.12 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 11.....	53
Figura 4.13 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 12.....	53
Figura 4.14 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 13.....	53
Figura 4.15 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 14.....	53
Figura 4.16 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 15.....	53
Figura 4.17 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 16.....	53
Figura 4.19 - Correlação entre as 12 variáveis - Caso 1.....	55
Figura 4.20 - Variância explicada nos CPs - Caso1.....	56
Figura 4.21 – PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.....	56
Figura 4.22 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.....	56
Figura 4.23 - PCA - 3 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.....	57
Figura 4.24 - PCA - 4 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.....	57
Figura 4.26 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.....	59
Figura 4.27 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Exemplo de falhas em pontes e respetivas causas.....	3
Tabela 2.1 - Características das abordagens analítica e estatística	8
Tabela 2.2 - Trabalhos realizados no âmbito de deteção de danos.....	10
Tabela 2.3 - Interpretação do índice R-quadrado ajustado	21
Tabela 3.1 - Linha do tempo da Ponte de Lanheses.....	28
Tabela 3.2 - Anomalias detectadas na inspeção da Ponte de Lanheses	29
Tabela 3.3 - Principais trabalhos de reforço e reabilitação executados na Ponte de Lanheses	30
Tabela 3.4 - Disponibilidade dos dados de monitorização estrutural.....	35
Tabela 3.5 - Características dos elementos dos tramos do tabuleiro	39
Tabela 3.6 - Características dos elementos dos pilares	42
Tabela 3.7 - Resumo das condições de apoio da estrutura.....	43
Tabela 3.8 - Casos de danos inseridos no modelo numérico da Ponte de Lanheses	45
Tabela 3.9 - Amplitude dos ruídos	47
Tabela 4.1 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 26.	50
Tabela 4.2 - Valor de R^2 ajustado de cada uma das regressões lineares	50
Tabela 5.1 - Resumo dos resultado dos métodos de deteção de danos aplicados	61

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	12
Equação 2.2	12
Equação 2.3	12
Equação 2.4	12
Equação 2.5	12
Equação 2.6	12
Equação 2.7	12
Equação 2.8	14
Equação 2.9	20
Equação 2.10	20
Equação 2.11	22
Equação 2.12	22
Equação 2.13	22
Equação 2.14	23
Equação 2.15	23
Equação 4.1	49
Equação 4.2	49

ABREVIATURAS

ACP's – Análise de componentes principais

AG's – Algoritmos genéticos

CP's - Componentes principais

LVDT's - Transdutores indutivos de deslocamento

MMQ - Método dos mínimos quadrados

NDT – Ensaios não-destrutivos (*non-destructive test*)

RLM - Regressão linear múltipla

RNA - Redes neuronais artificiais

SHM – Monitorização da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O funcionamento indevido de uma estrutura pode acarretar consideráveis perdas econômicas e transtornos sociais para a população que a usufrui. Sabe-se que é de extrema importância a realização de avaliações periódicas e/ou monitorização constante, principalmente no que diz respeito às obras de arte, tais como pontes e viadutos. Estas investigações são necessárias sobretudo para gerenciar o comportamento da estrutura frente aos esforços atuantes, condições climáticas, processos de deterioração dos materiais empregados, falhas de execução, e assim avaliar sua segurança enquanto em serviço. Frente a esta afirmação, surge o processo de identificação de danos e monitorização da integridade estrutural, em inglês, *Structural Health Monitoring* (SHM). Esta abordagem é cada vez mais recorrente devido ao fato de um grande número de estruturas estarem no fim de seus ciclos de vida estimados em projeto, e, portanto, requererem uma análise mais avançada a respeito de seu comportamento (Alves, 2016).

A avaliação da integridade estrutural pode ser assimilada como um diagnóstico para a estrutura, onde da mesma maneira que um médico avalia o quadro clínico do paciente e busca os melhores tratamentos para os sintomas/doença, a monitorização estrutural visa conhecer o comportamento da estrutura de forma a identificar os danos e então aplicar as reparações necessárias (Rodrigues, 2011).

Na detecção de danos as inspeções visuais eram um método tradicionalmente usado. Contudo, é reconhecido que este é ineficaz para os pontos não acessíveis da estrutura e avaliação da deterioração interna dos elementos, além de que determinados danos só são perceptíveis quando se encontram já em estado avançado.

É importante destacar que uma eficiente avaliação da integridade estrutural acontece na junção da coleta significativa de dados com o cabível gerenciamento e interpretação dos mesmos. De nada adianta ter à disposição dados coletados através de monitorização avançada se os mesmos não forem corretamente interpretados.

A monitorização estrutural consiste em uma avaliação não destrutiva envolvendo basicamente seis principais componentes (Balageas, 2010) sendo eles:

1. Aquisição de dados (através de sensores);
2. Transmissão dos dados brutos para um sistema-base;
3. Inteligência computacional, análise e processamento de dados;
4. Armazenamento dos dados processados;
5. Diagnóstico (em relação à segurança, deteção de danos, análise de reabilitação, etc);
6. Tomada de decisão conforme resultados dos diagnósticos.

A Figura 1.1 apresenta de forma esquemática o funcionamento geral de um sistema de monitorização estrutural, sendo identificados os subsistemas que o compõem: a rede de sensores, sistema de aquisição de dados, de comunicação e pós-processamento.



Figura 1.1 - Esquema das componentes de um sistema de monitorização estrutural.

Fonte: (Rodrigues, 2011)

Buscando o conhecimento da integridade estrutural existem diversos métodos que visam a obtenção dos danos existentes em uma estrutura, os quais pode ser separados em quatro níveis (Rytter, 1993):

1. Deteção (o método fornece um indicador qualitativo do dano que pode estar presente na estrutura);
2. Localização (o método também fornece informações sobre a provável localização do dano);
3. Avaliação (o método fornece informações a respeito da extensão do dano);
4. Implicações (o método providencia informações sobre o estado de segurança da estrutura baseado no estado do dano).

Observa-se que quanto maior for o nível, mais abrangente é o método, o que recorre a algoritmos cada vez mais complexos e ferramentas computacionais de memória e processamento mais poderosas e dispendiosas. A deteção e localização do dano é já uma prática usual para a maioria das aplicações que se visa, portanto, nível 2, os quais representam a maioria dos métodos encontrados na literatura (Alves, 2016).

Neste trabalho, busca-se o estudo e revisão das técnicas de deteção de danos baseadas em modelo e dados para posterior escolha de um método apropriado a ser aplicado na criação de um algoritmo de deteção de danos com aplicabilidade em uma ponte, a qual já possui dados coletados a partir de monitorização estrutural.

1.2 MOTIVAÇÃO

As técnicas de deteção de dano têm papel fundamental na identificação das anomalias, análise de risco e auxílio de manutenção e reparo de estruturas. Na Tabela 1.1 pode-se identificar alguns exemplos de catástrofes ocorridas em pontes nas últimas décadas. Cenários como estes podem ser evitados se realizada uma rápida e eficiente deteção dos danos, antes que estes ocasionem o colapso da estrutura. Desta forma, é ilustrada a importância do conhecimento e estudo da monitorização e avaliação da integridade estrutural.

Tabela 1.1 - Exemplo de falhas em pontes e respetivas causas

Ponte	Localização	Ano	Causa
Ponte Duplessis	Canadá	1951	Falha estrutural devido a temperaturas adversas
Ponte do Rio Mianus	EUA	1983	Corrosão do metal e fadiga
Ponte Seongsu	Coréia do Norte	1994	Defeito de solda
Ponte Hintze Ribeiro	Portugal	2001	Infraescavação
Ponte Laval	Canadá	2006	Mal posicionamento de peças pré-moldadas e baixa qualidade do betão
Ponte Chhinchu	Nepal	2007	Excesso de sobrecarga
Ponte Tarcoles	Costa Rica	2009	Sobrecarga devido a camiões pesados
Ponte sobre o Rio Po	Italia	2009	Inundação
Myllysilta	Finlândia	2010	Inclinação devido falha nos pilares
Ponte Gongguan	China	2011	Excesso de sobrecarga

Ponte Yangmingtan	China	2012	Excesso de sobrecarga e materiais de baixa qualidade
Ponte Bonnybrook	Canadá	2013	Inundação
Ponte Skjeggstad	Noruega	2015	Deslocamento de pilar
Ponte Yellow Love	Indonésia	2016	Excesso de sobrecarga
Ponte sobre o Rio Santo Antônio	Brasil	2016	Colapso progressivo, precariedade nos apoios das vigas da superestrutura
Viaduto Vivekananda	Índia	2016	Falha na ligação secção e pilar

Pauta-se este trabalho pelo estudo de alguns métodos de deteção de danos, motivado pela introdução aos conhecimentos destas técnicas e oportunidade de aprendizado.

1.3 OBJETIVO

O objetivo geral da presente dissertação é o desenvolvimento e estudo das técnicas de deteção de danos em estruturas com base em dados estáticos provenientes da monitorização estrutural. Especificamente, procura-se, em sequência, desenvolver os seguintes tópicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos métodos de deteção de danos, baseados na resposta estática da estrutura;
- Escolher alguns destes métodos para desenvolver um algoritmo de deteção de danos;
- Desenvolver um modelo numérico representativo para a Ponte de Lanheses (a qual possui dados de monitorização já coletados);
- Simular danos no modelo numérico da ponte e avaliar a eficiência dos algoritmos desenvolvidos em identificá-los.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação engloba um total de cinco capítulos, iniciando-se com o Capítulo 1 onde são apresentadas as considerações iniciais, a justificativa pela qual foi escolhido o presente tema, bem como os objetivos e estrutura na qual se desenvolverá o trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma descrição geral dos métodos de deteção de danos, com foco nas técnicas baseadas na resposta estática da estrutura, a partir de modelagem numérica e tratamento estatístico dos dados.

No Capítulo 3 é retratado um breve histórico e apresentadas as características físicas e geométricas do caso de estudo: a Ponte de Lanheses. Também é descrito o sistema de monitorização instalado na ponte, o tratamento dos dados provenientes desta monitorização e o desenvolvimento do modelo numérico.

No Capítulo 4 são apresentados os métodos de deteção de danos escolhidos para a análise e comentados os resultados das técnicas empregadas, mostrando uma comparação entre elas, e analisada a eficiência das mesmas.

O Capítulo 5 retrata o desfecho final, sendo desenvolvidas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS

Durante a vida útil das estruturas, as mesmas estão sujeitas a diversos danos causados por diferentes razões, entre as quais podemos citar a influência dos fatores ambientais, o excesso de sobrecarga aplicada, o desgaste em elementos estruturais, entre outros. Quando os danos gerados por estes fatores não são identificados e tratados a tempo podem causar perdas das propriedades fundamentais, ocasionando o mal funcionamento estrutural. As técnicas de detecção de danos têm merecido uma atenção crescente nas últimas décadas por se mostrarem efetivas, quando aplicadas a problemas estruturais reais, auxiliando na prevenção de problemas graves através da manutenção preventiva.

No lugar de inspeções visuais ou testes experimentais locais, as técnicas de obtenção de danos envolvem a identificação de danos baseada em ensaios não destrutivos (*non-destructive test, NDT*). A aplicação destas técnicas não destrutivas fundamenta-se na comparação entre o comportamento estático e/ou dinâmico da estrutura num estado de referência e seu comportamento após passado algum tempo (Fatemi & Tabrizian, n.d.). Esta análise comparativa é feita através das discrepâncias dos dados, entre modelos analíticos e experimentais. A identificação das mudanças ocorridas nos parâmetros da estrutura é usada para entender seu desempenho face a ações atuantes, identificar danos e melhorar a confiabilidade e performance desta.

Na prática, para realizar análises de detecção de danos, podem ser usadas duas diferentes abordagens: a primeira, baseada no modelo numérico da estrutura real, também designada de analítica, enquanto a segunda se baseia na análise estatística dos dados coletados sob diferentes estados estruturais, também conhecida como *data-driven* (Vitola, Vejar, & Vejar, n.d.).

Para além disso, os métodos de detecção de danos podem ser divididos em métodos baseados na resposta estática da estrutura e métodos baseados na resposta dinâmica. Pode ainda ser considerada uma combinação destes dois, ou seja, baseados na resposta estática e dinâmica.

Será apresentado um resumo das abordagens analítica e estatística, bem como os fundamentos dos métodos baseados na resposta estática e dinâmica. Entretanto, este trabalho será focado nos métodos de detecção de danos estatísticos baseados na resposta estática da estrutura. Justifica-se a escolha desta

abordagem pois o estudo de caso a ser apresentado apenas possui dados de monitorização de carácter estático.

2.1 ABORDAGENS BASEADAS EM MODELOS NUMÉRICOS E EM DADOS

Existem duas técnicas que suportam a análise de deteção de danos, as baseadas na modelação numérica (analítica) e a baseada em dados (estatística). Ambas tem o propósito de comparar os dados extraídos das medições dos sensores de monitorização no período de comportamento normal da estrutura com as medições posteriores, buscando identificar alterações que possam ser interpretadas como danos estruturais (Farrar & Worden, 2007).

A abordagem analítica requer a construção de um modelo numérico detalhado e confiável da estrutura. Neste modelo são simulados os comportamentos estruturais e comparados com os medidos através da monitorização, buscando diferenças que podem representar sinais de danos (Posenato, 2009). O modelo numérico, então, necessita ser atualizado conforme o estado de evolução da estrutura, sendo assim, esta abordagem se torna bastante complexa, custosa e engloba muitas variáveis.

A abordagem estatística examina a série de dados coletados através da monitorização em uma linha temporal em tempo real. Estas técnicas são totalmente independentes do modelo físico da estrutura e se baseiam em um período de treinamento dos dados, a ser comparado com as medições posteriores (Vitola et al., n.d.).

A Tabela 2.1 apresenta uma breve comparação entre essas duas abordagens.

Tabela 2.1 - Características das abordagens analítica e estatística

Adaptado: (Posenato, 2009)

Abordagem analítica	Abordagem estatística
Complexa;	Não necessita de modelo numérico da estrutura;
Custosa;	Exige uma fase de treinamento;
Difícil de ser atualizada;	Fácil de ser atualizado;
Diferente para cada estrutura;	Baixo custo;
Engloba muitas variáveis;	Rápida;
Lenta;	Não retrata a capacidade resistente da estrutura;
Retrata uma aproximação;	Difícil diagnóstico;
De fácil diagnóstico;	Difícil estimativa das anomalias iniciais;
Conhecimento da capacidade resistente;	

Para o desenvolvimento de uma análise estatística dos dados de monitorização, inicialmente é necessário selecionar o período adequado de aprendizado dos dados, também chamado de período de calibração. É com base neste aprendizado que a segunda fase dos dados será testada para verificar se correspondem as condições normais de comportamento ou se estão fora do padrão (Posenato, 2009). Destaca-se que esta abordagem estatística não necessita de um conhecimento prévio do estado da estrutura, antes se supõe que para o período de aprendizado do algoritmo, a estrutura esteja em normal funcionamento, ou seja, sem anomalias.

2.2 MONITORIZAÇÃO DINÂMICA

A monitorização dinâmica busca conhecer o comportamento dinâmico das estruturas através de parâmetros que abrangem sobretudo as frequências naturais, os modos de vibração, a função de resposta de frequência, o amortecimento modal. Para a obtenção destes parâmetros, ensaios de vibração ambiental ou forçada são comumente usados (Olson, 2005).

A aplicação de cargas em uma estrutura causa a aceleração de seus componentes ($F=ma$). A amplitude e a frequência de resposta para essas excitações dinâmicas são chamadas de resposta modal. Através da monitorização da integridade estrutural, pode-se determinar exatamente qual será a resposta da estrutura frente a essas acelerações. Assim, comportamentos diferenciados da estrutura devido a alterações nas condições de suporte ou propriedades dos materiais podem ser identificados, pois estas causam uma alteração dos parâmetros dinâmicos de resposta (Posenato, 2009).

Uma vez que a identificação dos parâmetros dinâmicos requer o conhecimento de propriedades como massa, rigidez e amortecimento da estrutura, este se faz mais complexo que o método de resposta estática, a qual se baseia apenas nas propriedades de rigidez.

2.3 MONITORIZAÇÃO ESTÁTICA

Os métodos estáticos possibilitam a identificação de danos a partir da medição das mudanças na resposta estática da estrutura. Para a utilização deste método recorre-se a grandezas como deslocamentos ou deformações, observadas quando a estrutura é solicitada em ensaios de carga ou em condições de serviço (Silva, 2015). Para o estudo de pontes as ações mais frequentemente consideradas são as variações de temperatura e as cargas devido ao tráfego de veículos, sendo os efeitos da temperatura geralmente os mais significantes (Grosso, n.d.).

Os métodos baseados na estática são geralmente mais simples que os dinâmicos, uma vez que a equação de equilíbrio estático é relevante a partir da caracterização da rigidez dos elementos estruturais (Wang, Hu, Fukunaga, & Yao, 2001). Além do mais, os equipamentos necessários para o acompanhamento das

grandezas de carácter estático estão já bem desenvolvidos e são relativamente económicos, desta forma pode-se obter medidas de forma rápida, confiável e viável economicamente.

Por outro lado, algumas desvantagens limitam o uso destes métodos de maneira isolada. Pode-se citar duas limitações do método estático: a primeira explica que este método utiliza menos informações do que o dinâmico, o que torna mais difícil a identificação do resultado ideal; já a segunda trata de que os efeitos do dano podem ser ocultados devido ao caminho das cargas, uma vez que o elemento danificado pode ter pouca ou quase nenhuma contribuição na deformação da estrutura para certos casos de carga e dessa maneira este dano pode ser difícil de ser identificado (Wang et al., 2001). Estas limitações intrínsecas da equação de equilíbrio estático podem ser parcialmente dominadas através de um estudo de otimização dos esquemas de carga e do posicionamento da instrumentação, adotando vários cenários diferentes através de uma pré-análise adequada.

2.4 ALGORITMOS DE DETEÇÃO DE DANOS

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas na identificação de danos estruturais, conforme os dados de monitorização disponíveis e também o grau esperado para a identificação do dano. A Tabela 2.2 apresenta trabalhos realizados neste âmbito mostrando algumas das técnicas comumente utilizadas.

Tabela 2.2 - Trabalhos realizados no âmbito de deteção de danos

Identificador de danos	Autor (Ano)	Trabalho realizado
Algoritmos genéticos	Amir Abbas Fatemi et al. (2012)	Com base em especificações e propriedades derivadas de dados estáticos desenvolveu um modelo analítico de treliça. Utilizou os algoritmos genéticos para resolver o problema de otimização entre a estrutura com e sem danos, simulando diferentes cenários de danos.
	Patrícia da Silva Lopes (2007)	Utiliza as técnicas de otimização global e identificação de parâmetros com o uso de algoritmos genéticos de redes neuronais artificiais para a identificação dos danos.
Redes Neuronais Artificiais	Marco Nieto Martínez (2013)	Através de um estudo de alterações de tensão/deformação em peças mecânicas, utilizou o método dos elementos finitos e as redes neuronais artificiais para identificação de parâmetros e deteção de danos.
Redes Neuronais Artificiais	Luís Manuel Ferreira Roseiro (2004)	Utilizou parâmetros estáticos e dinâmicos como dados de treino para as redes neuronais, para deteção de danos em uma estrutura de materiais compósito laminado.

Análise de componentes principais (ACP's)	João Pedro Santos (2014)	Utilizando dados estáticos de monitorização estrutural e assumindo que danos iniciais geram redistribuição de esforços, combinou a análise de componentes principais com outros métodos estatísticos para deteção de danos.
Regressão linear	Chenhao Jin (2015)	Realizou uma análise da relação entre temperatura e frequência-natural para determinar danos na estrutura de uma ponte, através da combinação dos métodos de regressão linear múltipla e redes neuronais artificiais.
	Yuchen Pan (2012)	Para calcular os indicadores de danos utilizou os coeficientes gerados a partir da regressão linear feita com base em dados das respostas dinâmicas da estrutura.
Auto Regressão	C. C. R. Mucchiani (2010)	Desevolveu uma metodologia para deteção e localização de danos considerando respostas de deslocamentos através de um modelo de predição auto-regressivo.

Podemos separar as técnicas apresentadas conforme o tipo de abordagem, mostrado na Figura 2.1.

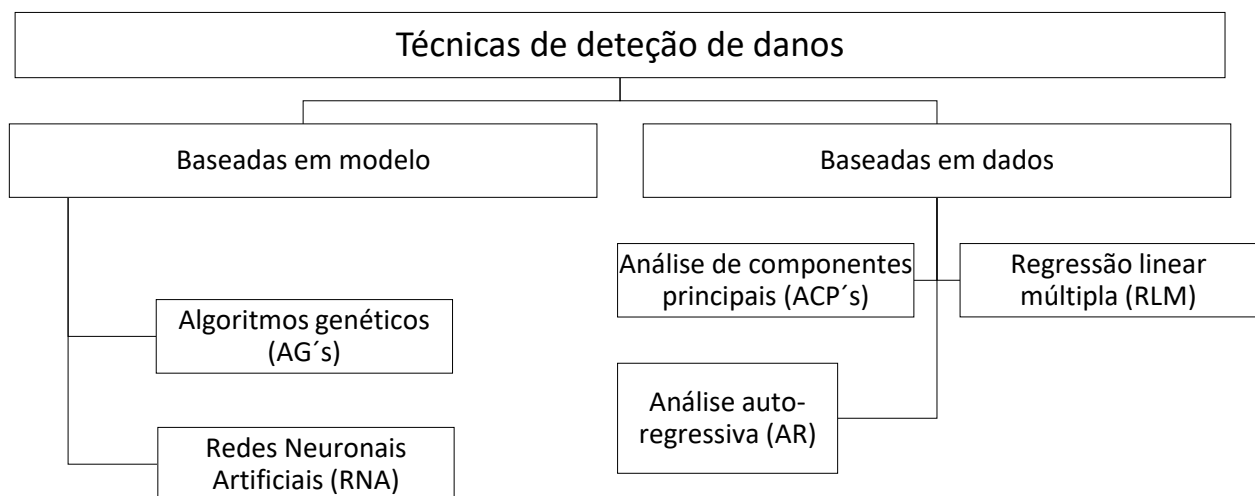


Figura 2.1 - Técnicas de deteção de danos conforme abordagem.

A seguir é explicado o fundamento das funções de otimização baseados na variação de deslocamento estático, a qual serve como função objetivo dos algoritmos de otimização no âmbito da deteção de danos baseados na resposta estática. Após é apresentada separadamente cada uma das técnicas supracitadas.

2.4.1 Variação de deslocamentos estáticos

Este método de identificação de dano baseia-se na modificação (redução) da matriz rigidez relacionada com a variação dos deslocamentos estáticos. As medidas dos deslocamentos, devidos a cargas estáticas,

podem ser obtidas com o peso próprio da estrutura, ou seja, os deslocamentos causados pelo carregamento permanente da estrutura (Silva, 2015).

A equação que rege o equilíbrio estático de uma estrutura pode ser escrita como

$$F = \mathbf{K}\mu \quad (2.1)$$

onde F representa o vetor força estática aplicada na estrutura, \mathbf{K} representa a matriz rigidez e μ o vetor deslocamento. Após, pode-se isolar o vetor deslocamento, calculando-o da seguinte maneira:

$$\mu = \mathbf{K}^{-1}F \quad (2.2)$$

Danos estruturais geralmente causam alterações na matriz rigidez da estrutura. Chamando esta diferença de quantidade na matriz rigidez de $\Delta\mathbf{K}$, obtém-se a equação de equilíbrio da estrutura danificada por:

$$F = (\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})\mu^* \quad (2.3)$$

Onde, o vetor de deslocamento μ^* pode ser obtido a partir da aproximação de primeira ordem descrito a seguir (Wang et al., 2001):

$$\mu^* = (\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})^{-1} F \approx (\mathbf{K}^{-1} - \mathbf{K}^{-1} \Delta\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1}) F \quad (2.4)$$

Consequentemente, a alteração dos deslocamentos devido aos danos existentes pode ser descrita como:

$$\Delta\mu = \mu - \mu^* \approx \mathbf{K}^{-1} \Delta\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} F \quad (2.5)$$

De acordo com (Silva, 2015), em um sistema de método de elementos finitos (MEF) a mudança na matriz rigidez do sistema pode ser representada como a soma das mudanças nas matrizes de rigidez de todos os elementos, conforme apresentado abaixo:

$$\Delta\mathbf{K} = \sum_{i=1}^{ND} \mathbf{B}_i^T \Delta k_i^* \mathbf{B}_i \quad (2.6)$$

Onde ND representa o número de elementos danificados, \mathbf{B}_i é a matriz booleana correspondente ao i -ésimo elemento e Δk_i^* é a variação da rigidez no i -ésimo elemento, a qual pode ser explicada como:

$$\Delta k_i^* = \alpha_i E_i \Delta k_i \quad (2.7)$$

Sendo α_i um escalar (entre $-1 \leq \alpha_i \leq 0$) representativo da fração do dano e E_i o parâmetro da rigidez no i -ésimo elemento danificado. A matriz Δk_i envolve as propriedades geométricas dos materiais ou termos que contêm o coeficiente de Poisson. Para estruturas com danos simples ou de mesma severidade, o

escalar α_i pode ser representado como um fator comum α para todos os elementos (Wang et al., 2001). Este processo ajuda na separação entre a influência da extensão do dano e a influência da sua localização.

2.4.2 Técnicas de otimização

O processo de otimização pode ser entendido como a busca pela obtenção do melhor resultado sob determinadas circunstâncias, sejam elas maximizar os benefícios ou diminuir os esforços em qualquer tipo de problema. O processo de otimização pode ser transformado em uma função com certas variáveis, onde o resultado buscado são os valores máximos ou mínimos para esta dada função (Rao, 2009).

Pode-se observar na Figura 2.2 que se o ponto x^* corresponde respectivamente ao mínimo valor da função $f(x)$ e ao máximo valor da função $-f(x)$. Sendo assim, um problema de otimização pode ser tratado como um problema de minimização, desde que o máximo da função na forma negativa possa ser encontrado através do mínimo da função na forma positiva (Rao, 2009):

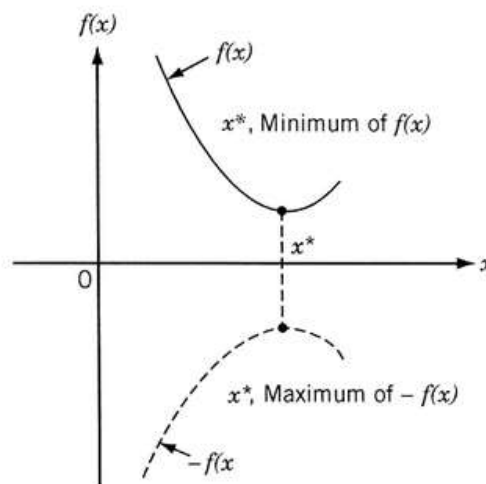


Figura 2.2 - Representação dos pontos mínimo e máximo das funções $f(x)$ e $-f(x)$.

Fonte: (Rao, 2009)

Além disso, à função objetivo, as seguintes operações não devem causar alteração na solução ótima de x^* (Rao, 2009):

- Multiplicação ou divisão da função $f(x)$ por uma constante positiva;
- Adição ou subtração de uma constante positiva na função $f(x)$.

No âmbito da detecção de danos, a técnica de otimização se baseia na utilização dos deslocamentos estáticos e na rigidez de cada elemento, uma vez que os danos nas estruturas podem ser definidos na maioria das vezes como uma redução na rigidez dos elementos, conforme apresentado no item 2.2.1. Desta maneira, a partir dos elementos finitos da estrutura e de uma análise dos deslocamentos estáticos,

antes e após a ocorrência do dano, pode-se estabelecer a função de otimização da seguinte maneira (Silva, 2015):

$$0 = \sum_{i=1}^{nn} \left| \frac{D_i^M}{D_i^C} - 1 \right| \quad (2.8)$$

Onde D_i^M e D_i^C se referem respectivamente ao deslocamento medido e calculado no i -ésimo nó, e nn é o número de nós do sistema.

O procedimento de detecção de danos através das técnicas de otimização em 7 passos, podem então ser apresentados na sequência (Silva, 2015):

1. Medição do deslocamento a partir da estrutura danificada;
2. Cálculo de deslocamento a partir do modelo não danificado;
3. Verificação da convergência;
4. Verificar se o critério de convergência é atingido;
5. Mudança para um novo ponto;
6. Cálculo do deslocamento, no ponto de novo;
7. Iteração do passo (3) para o passo (6).

Podemos dividir o universo da otimização em dois grandes grupos: os métodos locais baseados em cálculo e os métodos globais baseados em heurísticas. Os métodos pertencentes ao primeiro grupo são empregados em problemas que apresentam um extremo dentro de um intervalo considerado, chamados de problemas unimodais. Para solução de problemas multimodais, estes métodos estarão sujeitos a escolha de um ponto inicial, o que pode convergir o resultado para o extremo local mais próximo da direção de busca apontada pelas derivadas. Sendo assim, para problemas multimodais, é aconselhável o uso de métodos heurísticos pois estes oferecem maior chance de obtenção do extremo ótimo global do sistema uma vez que não desenvolvem a busca por um único ponto, mas a partir da criação de uma população de pontos iniciais que simulam as possíveis soluções do sistema (Lopes, 2007).

Como métodos de otimização local baseado em cálculo pode-se mencionar a programação quadrática sequencial. Dentre métodos heurísticos bastante usuais e eficientes na solução de problemas complexos de otimização podemos citar os algoritmos genéticos, redes neurais artificiais, arrefecimento simulado, enxame de partículas, colônia de formigas e otimização fuzzy.

Na Figura 2.3 é apresentado um esquema de divisão nos dois grandes grupos das técnicas de otimização referidas.

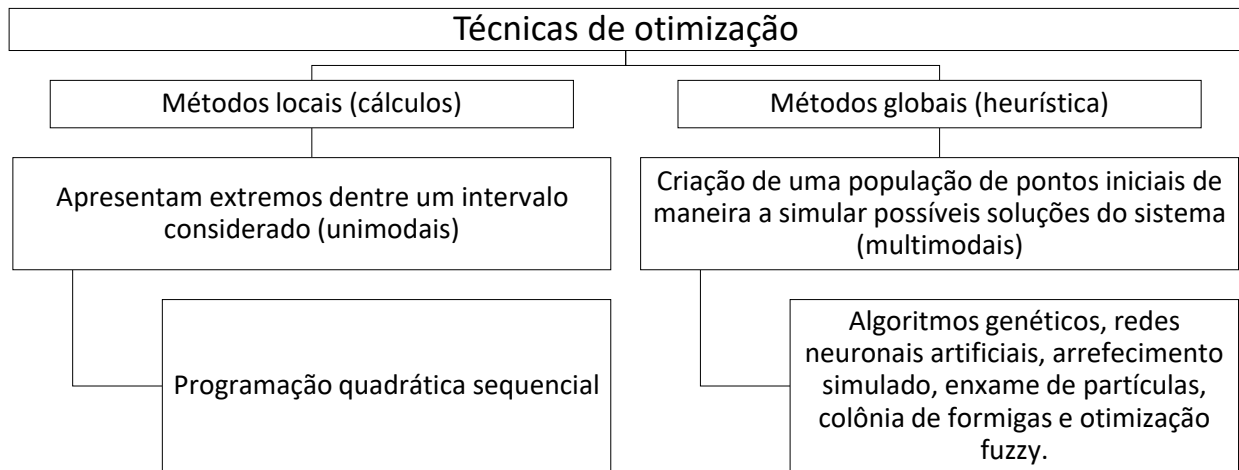


Figura 2.3 - Técnicas de otimização.

Nos próximos subcapítulos deste trabalho serão detalhados os algoritmos genéticos e as redes neurais artificiais que são, dentre os métodos supracitados, os heurísticos mais usados na detecção de danos em estruturas de engenharia civil (Lopes, 2007).

2.4.2.1 Algoritmos genéticos (AG's)

As simulações computacionais de sistemas genéticos tiveram início nos anos de 50 e 60, porém as primeiras pesquisas foram desenvolvidas por John Holland, o qual publicou um livro em 1975 retratado como ponto inicial dos algoritmos genéticos (Pozo, Cavalheiro, Ishilda, Spinosa, & Rodrigues, 2011).

Os AG's são técnicas de otimização baseadas na "Teoria da Evolução" e na sobrevivência do mais apto. De acordo com a Teoria de Darwin da Seleção Natural "...qualquer ser que se modifica ligeiramente de maneira proveitosa a si mesmo, terá melhores chances de sobrevivência...", desta maneira, os AG simulam o processo evolutivo numericamente inspirados na evolução natural, hereditariedade, mutação, seleção e cruzamento (Gomes & Santos, 2006) e são utilizados para solucionar problemas de otimização e aprendizado de máquinas (Pozo et al., 2011). Uma vez que o problema de detecção de danos pode ser tratado como um problema de otimização, sendo considerado o dano como qualquer mudança na propriedade do material ou geometria original da estrutura, este pode ser possível de solução aplicando as técnicas dos algoritmos genéticos.

De acordo com os AG's, os indivíduos mais aptos conseguirão atingir um maior número de descendentes, acontecendo o contrário nos indivíduos menos aptos. Alguns dados ou elementos são necessários para a implementação de um AG (Pozo et al., 2011):

- Um código genético com as possíveis soluções do problema;
- Uma população inicial com diversidade suficiente para o algoritmo conseguir combinar características e produzir novas soluções;

- Um método de mensuração da qualidade da solução potencial;
- A combinação de soluções para gerar novos indivíduos na população;
- Critérios para seleção das soluções, escolhendo as que permanecem na população e as que são retiradas;
- Procedimento para introdução de alterações nas soluções da população.

A ideia básica destas etapas é tratar as possíveis soluções do problema como “indivíduos” de uma “população”, que irá “evoluir” a cada iteração do processo (Pozo et al., 2011). A execução do algoritmo pode ser resumida conforme Figura 2.4.

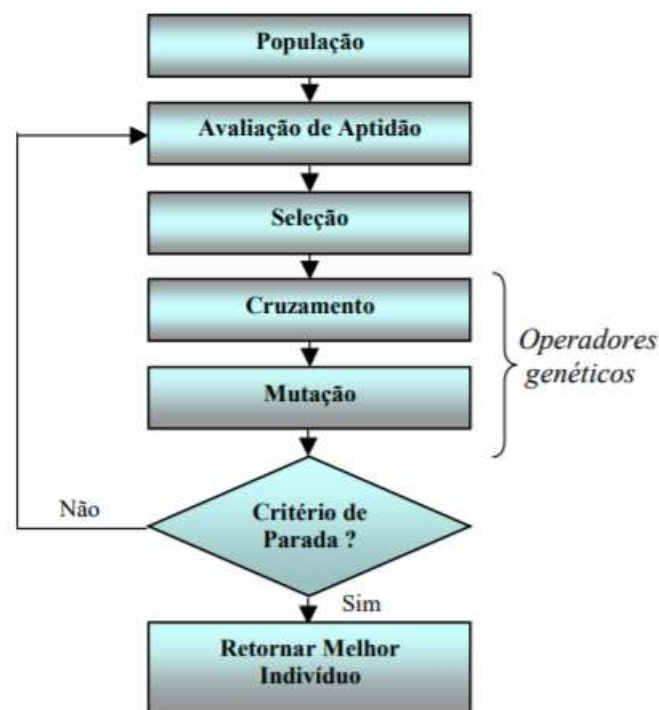


Figura 2.4 - Estrutura básica de um algoritmo genético.

Fonte: (Pozo et al., 2011)

Resumidamente, em primeira etapa escolhe-se a população inicial, normalmente formada aleatoriamente. Após criada, a população é avaliada segundo algum critério que tenha como função a qualidade do indivíduo, também chamada de função aptidão. Através do operador seleção, os indivíduos de melhor valor são escolhidos e formam a nova geração, na qual são aplicados operadores de cruzamento e mutação que misturam suas características (“genes”). Toda essa operação é repetida até que seja encontrada uma solução pretendida.

2.4.2.2 Redes neurais artificiais (RNA)

Originalmente, as redes neurais foram desenvolvidas na década de 40 e 50, por McCulloch e Pitts (1943), Hebb (1949) e Roseblatt (1958). O trabalho consistia em um modelo de resistores variáveis e amplificadores que representavam conexões sinápticas de um neurônio biológico, simulando “máquinas” em modelo de rede de auto-organização (Carvalho, 2006). Mais tarde, na década de 80, o trabalho começou a ser desenvolvido para modelos de redes neurais artificiais, que buscavam mecanismos internos de aperfeiçoamento em memória, controle e auto-organização para aplicação na indústria e negócios (Tafner, 1998).

Pode-se definir as redes neurais artificiais como técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes. Estas redes são um combinado de neurônios artificiais capazes de adquirir, armazenar e utilizar conhecimento experimental (Carvalho, 2006).

Os neurônios artificiais são estruturas lógico-matemática que são utilizadas para representar a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. Eles são processadores interligados que trabalham em paralelo para desenvolver uma determinada tarefa (Goulart et al., 2006). São compostos por elementos de entrada, elementos peso, função de soma e função de transferência, para substituir as funções dos neurônio biológicos (Tafner, 1998). Na Figura 2.5, é apresentado um esquema geral do k-ésimo neurônio, descrito na sequência.

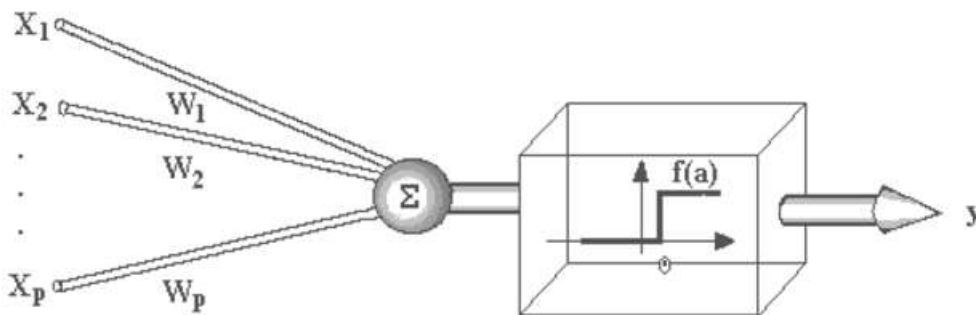


Figura 2.5 - Esquema geral de um neurônio artificial.

Fonte: (Carvalho, 2006)

Os sinais de entrada, representados por X_i , são a saída do neurônio da camada superior. W_i são os pesos e representam a memória da rede, ou seja, a experiência adquirida com o resultado das n -apresentações dos padrões da rede e a influência de cada sinal na saída da unidade. Estes pesos combinam a não-linearidade para que a mesma fique distribuída por toda a rede (Carvalho, 2006). É então caracterizada a combinação linear dos pesos, correspondendo à soma ponderada dos sinais de entrada que produz um nível de atividade. Se este nível de atividade exceder o limite estabelecido, a unidade

deste neurônio produz uma determinada resposta de saída y , que depende do nível da função ativação (Goulart et al., 2006).

Inicialmente, os dados de entrada são fornecidos e os pesos iniciais são determinados aleatoriamente. Juntamente com as funções de ativação, estes são utilizados para relacionar os dados de entrada e de saída, processando as respostas de cada camada. O resultado fornecido pela rede é comparado com o esperado, e a diferença deste resultado é minimizada com a correção dos pesos. Quando o valor deste erro é considerado satisfatório a rede é dita treinada (Maia & Doz, 2016).

Os modelos matemáticos baseados nas redes neuronais artificiais são bastante úteis quando não é possível estabelecer-se claramente uma lista de regras, como por exemplo, quando o ambiente gerador dos dados muda constantemente. Este tipo de modelagem é usualmente aplicado para classificação de padrões e previsão de resultados (Goulart et al., 2006).

A principal característica destas redes é a sua capacidade de aprender com exemplos. Sendo assim, na detecção de danos utiliza-se este processo treinando a rede com dados de entrada e saída conhecidos da estrutura, e através de um processo iterativo, a rede ajusta o peso das ligações de acordo com os padrões apresentados, estabelecendo relações entre as informações fornecidas e generalizando o aprendizado para os demais dados de entrada e saída (Maia & Doz, 2016).

2.4.3 Análise de componentes principais (ACP's)

A análise de componentes principais é a técnica de estatística multivariada mais conhecida (Goulart et al., 2006). Inicialmente foi introduzida por Pearson (1901) com o objetivo de encontrar linhas e planos que melhor explicassem um conjunto de pontos em um espaço p -dimensional. Mais tarde, esta técnica foi denominado por Hotelling (1933) de "Principal component analysis" (Vicini & Mendonça Souza, 2005).

Baseada nos princípios da álgebra linear, esta técnica consiste em reduzir a dimensão do problema em componentes não correlacionados e com independência estatística, denominados componentes principais (CP), explorando a interdependência dos dados multivariados. Uma vez que haja redundância significativa no conjunto de dados analisados, pode ser possível explicar a maior parte das informações num conjunto mais compacto (Ribeiro, 2016). Esta técnica tem o propósito de reter o máximo de informações em termos da variação total contida nos dados (Goulart et al., 2006). A falta de correlação entre as componentes implica que os índices estão descrevendo diferentes "dimensões" dos dados (Araujo & Coelho, 2009). Através do novo conjunto criado é possível observar com mais clareza as tendências, padrões e também os outliers que estão presentes no conjunto original.

Basicamente, a técnica da ACP faz com que uma matriz de dados representada por n registros e p atributos, que podem estar correlacionados, seja resumida por eixos não correlacionados, as componentes principais r , através de uma combinação linear das p variáveis originais (Ribeiro, 2016).

Em termos práticos, o algoritmo se baseia na matriz de variância-covariância (Σ), ou na matriz de correlação (R), das quais são extraídos os autovalores e autovetores, e por fim são escritas as combinações lineares, que serão as novas variáveis (CP's), onde cada uma delas é uma combinação linear de todas as variáveis originais (Vicini & Mendonça Souza, 2005). A Figura 2.6 representa um esquema-base da aplicação da ACP.

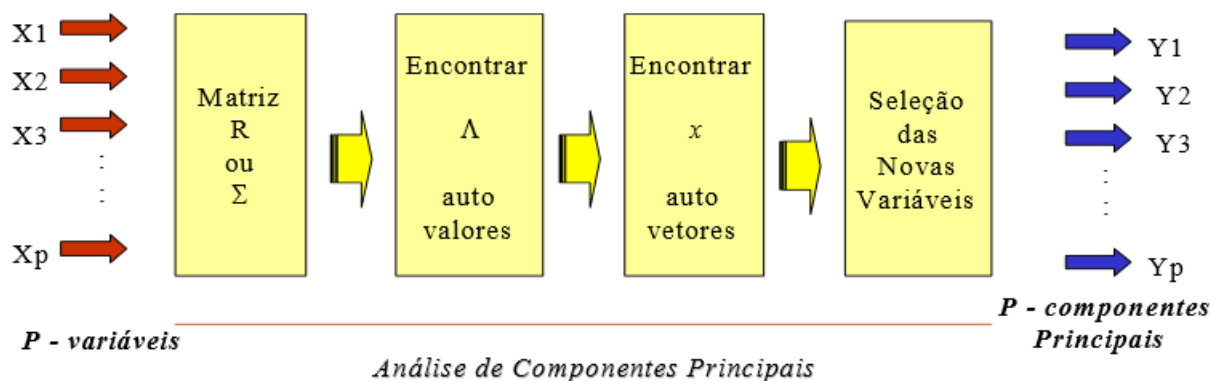


Figura 2.6 - Esquema-base da aplicação da ACP.

Fonte: (Souza, 2000)

Uma das maiores limitações desta técnica é o fato de não representar a variação no tempo, uma vez que a maioria dos processos de aplicação possuem essa variação (Posenato, 2009). Porém, quando se faz a ACP recursivo pode-se adaptar o modelo do algoritmo ao conjunto normal de evolução do processo, e a partir deste, calcular novos modelos com um novo conjunto de medições (Chen & Liu, 1999).

A técnica da ACP, dentro da monitorização estrutural, é utilizada somente no pré-processamento dos dados com o intuito de redução do volume sem perda de informações. Não se utiliza esta técnica isoladamente devido ao atraso temporal na detecção de algum evento anormal da estrutura. Um algoritmo de detecção de danos realiza o processamento do resultado final baseado na série temporal dos dados compactados pela técnica da ACP (Posenato, 2009).

2.4.4 Regressão linear múltipla (RLM)

A RLM engloba um conjunto de técnicas estatísticas de forma a desenvolver modelos que descrevam, de maneira satisfatória, a relação entre as variáveis explicativas de um determinado processo (Henriques, 2011). No modelo busca-se relacionar uma variável resposta, chamada de dependente, com outras

variáveis explicativas, chamadas regressores ou independentes (Gujarati & Porter, 2011). O modelo geral de regressão, no qual se associam estas variáveis, pode ser traduzido através da seguinte expressão:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (2.9)$$

Onde X_p representa a p-ésima variável observada, β_p o coeficiente associado à p-ésima variável e ε o erro que apresenta distribuição normal e média zero. O valor obtido com o modelo é um único valor que representa uma combinação do conjunto inteiro das variáveis que melhor atinge o resultado da análise multivariada específica (Sassi, Perez, Myazato, Ye, & Francisco, n.d.).

Em termos de notação matricial, o modelo de regressão linear múltipla aparece como sendo:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2.10)$$

Onde:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1(x_{11} - \bar{x}_1) & \dots & (x_{k1} - \bar{x}_k) \\ 1(x_{12} - \bar{x}_1) & \dots & (x_{k2} - \bar{x}_k) \\ \vdots & & \vdots \\ 1(x_{1n} - \bar{x}_1) & \dots & (x_{kn} - \bar{x}_k) \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

A estimativa dos coeficientes para determinação do ajuste da reta pode ser generalizado pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

Porém, antes de realizar a análise de regressão linear múltipla, é importante conhecer a correlação entre as variáveis aplicadas para identificar o grau de relacionamento linear destas. O diagrama de dispersão é comumente usado para decidir empiricamente se pode ser assumido um relacionamento linear entre as variáveis estudadas e a intensidade do grau de relacionamento destas (Henriques, 2011). Abaixo são apresentadas, nos gráficos de dispersão, uma sugestão de regressão não-linear (Figura 2.7) e linear (Figura 2.8).

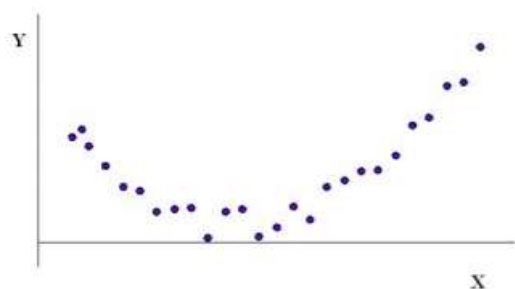


Figura 2.7 - Sugestão regressão não-linear.

Fonte: (Henriques, 2011)

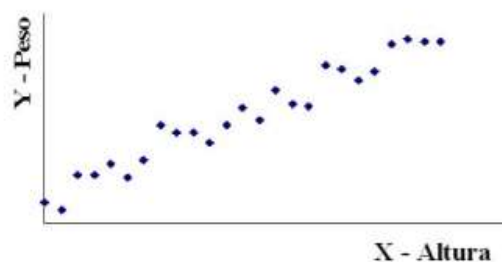


Figura 2.8 - Sugestão regressão linear.

Fonte: (Henriques, 2011)

No gráfico de dispersão, deve-se analisar a maneira como se situam os pontos ao redor de uma reta imaginária que passa através do enxame de pontos. A correlação entre as variáveis é tanto maior quanto mais os pontos se concentram em torno dessa reta.

Uma vez construído o modelo de regressão, é importante conhecer o nível de confiança estatística que este tem em representar os parâmetros analisados. Comumente utiliza-se o valor do índice R-quadrado ajustado para realizar esta classificação, uma vez que este, diferente do R quadrado não aumenta com a inclusão de variáveis independentes não significativas. Na Tabela 2.3 é apresentada uma interpretação para os intervalos de valores que este índice pode assumir.

Tabela 2.3 - Interpretação do índice R-quadrado ajustado

Fonte: (Posenato, 2009)

Valores de R-quadrado	Interpretação
$0 \leq R < 0.2$	Correlação muito fraca e negligenciável
$0.2 \leq R < 0.4$	Correlação fraca, não significativa
$0.4 \leq R < 0.7$	Correlação moderada
$0.7 \leq R < 0.9$	Correlação forte
$0.9 \leq R < 1$	Correlação muito forte

Sendo assim, uma vez que a análise de regressão é realizada e possui um índice esperado para a correlação entre estas, pode-se dizer que o modelo descreve satisfatoriamente os dados analisados.

A regressão linear pode ser usada de duas maneiras diferentes para a identificação de danos. A primeira delas consiste na observação de pontos que estão distantes da linha de regressão estimada durante o

período de referência (Posenato, 2009). Outro método consiste em estimar os parâmetros de regressão quando um novo ponto é adicionado e avaliar as mudanças significativas após cada uma destas inserções.

2.4.5 Análise autoregressiva (AR)

O modelo de análise autoregressiva se baseia em informações passadas para realizar a previsão futura dos dados. Este modelo é usado quando existem correlações entre os valores em uma série temporal e entre os valores que precedem e sucedem estes.

Na análise autoregressiva, a variável de saída (Y) em algum espaço de tempo (t), assim como na regressão linear, é diretamente relacionada com as variáveis preditoras (X). A diferença entre este tipo de regressão e a regressão linear múltipla descrita em 2.4.4, é que no modelo de análise AR a variável de saída depende das variáveis preditoras e também dos valores das variáveis de saída anteriores (Ranalli, 2017).

O modelo de AR pode ser descrito através da expressão:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \epsilon_t \quad (2.11)$$

Onde o valor y para determinada série temporal no instante t é calculado através da regressão das variáveis anteriores correspondentes à mesma série temporal.

Também se pode realizar a análise de autoregressão de ordens superiores (segunda, terceira... n -ésima ordem) (Ranalli, 2017), uma vez que os valores no instante t são previstos através dos valores nos instantes $t - 1, t - 2... t - n$. A equação abaixo representa o modelo genérico de análise autoregressiva de segunda ordem.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \epsilon_t \quad (2.12)$$

Genericamente, podemos dizer que n -ésima ordem da autoregressão é uma regressão linear múltipla cujos valores em qualquer instante de tempo t é uma função linear dos valores nos tempos $t - 1, t - 2, \dots, t - n$.

Para monitorar a relação linear entre as observações em um determinado período de tempo e observações de períodos anteriores, é importante calcular a correlação entre as variáveis do conjunto temporal de dados (Ranalli, 2017). Esta correlação é chamada de função de autocorrelação (ACF – autocorrelation function) e pode ser descrita como:

$$Corr(y_t, y_{t-n}) \quad (2.13)$$

Onde n é o intervalo de tempo considerado. Por exemplo, para $n=2$ estará sendo calculada a correlação entre o período de tempo t e 2 períodos de tempo anteriores.

Uma vez que se assume o modelo de autoregressão, busca-se encontrar apenas variáveis que estejam associadas entre si e filtrar as variáveis que possam representar valores aleatórios na amostra, portanto, busca-se valores de correlação diferentes de zero e que tenham influência relevante para cada uma das previsões (Ranalli, 2017).

2.5 GRÁFICO DE CONTROLE MULTIVARIADO (GCM) - HOTELLING (T^2)

O controle multivariado demonstra como as variáveis influenciam conjuntamente no processo. Os GCM funcionam de maneira eficaz quando o número de variáveis não é superior a dez, e em algumas situações se faz necessário o controle de duas ou mais características da qualidade do processo (Lowry & Montgomery, 1995).

Para o controle dos dados gerados a partir da aplicação do método de regressão linear múltipla foi utilizado o gráfico de controle multivariado de Hotelling também conhecido por estatística de T^2 , comumente usado em problemas de monitorização (Lowry & Montgomery, 1995).

O valor de T^2 é calculado a partir da seguinte expressão:

$$T^2 = n * (x_i - \bar{x}) * S^{-1} * (x_i - \bar{x})' \quad (2.14)$$

Nesta técnica, p variáveis são controladas simultaneamente. Para o cálculo, as observações são divididas em m subgrupos com n amostras cada. A variável x_i representa a média de cada uma das p variáveis para cada um dos m subgrupos, enquanto \bar{x} é a média das médias de cada variável obtidas no período de referência. O parâmetro S^{-1} é a matriz inversa da covariância, obtida a partir da média das matrizes de covariância de cada um dos subgrupos do período de referência (Tavares, 2003).

O limite superior de controle (LSC) é calculado a partir da expressão:

$$LSC = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn - m - p + 1} F_{\alpha, p, mn-m-p+1} \quad (2.15)$$

Onde F é o valor tabelado da estatística seguindo o nível de significância α a ser determinado segundo os graus de liberdade (Tavares, 2003).

O valor do limite inferior (LIC) é igual a zero devido ao fato de que qualquer alteração na média levará a um aumento da estatística T^2 , assim o LIC pode ser ignorado (Mason & Young, 2002).

CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDO – PONTE DE LANHESES

Alguns dos métodos de detecção de danos estudados foram aplicados ao caso de estudo da Ponte de Lanheses. Neste capítulo, serão descritas as características da ponte, bem como o processo que antecedeu à aplicação dos métodos de identificação de danos.

Inicialmente foram estudados os projetos de reabilitação e reforço da Ponte de Lanheses juntamente com os dados provenientes da monitorização estrutural. Em segunda etapa, foi desenvolvido o modelo numérico da ponte e realizada a validação do mesmo. Após, simulou-se neste modelo a estrutura da ponte, com e sem a presença de danos, para inúmeras combinações das ações de variação de temperatura, sendo realizadas coletas de dados de resposta. Com fundamento nos dados coletados aplicou-se os métodos de detecção de danos. Na Figura 3.1 é apresentado um esquema do desenvolvimento das atividades supracitadas.

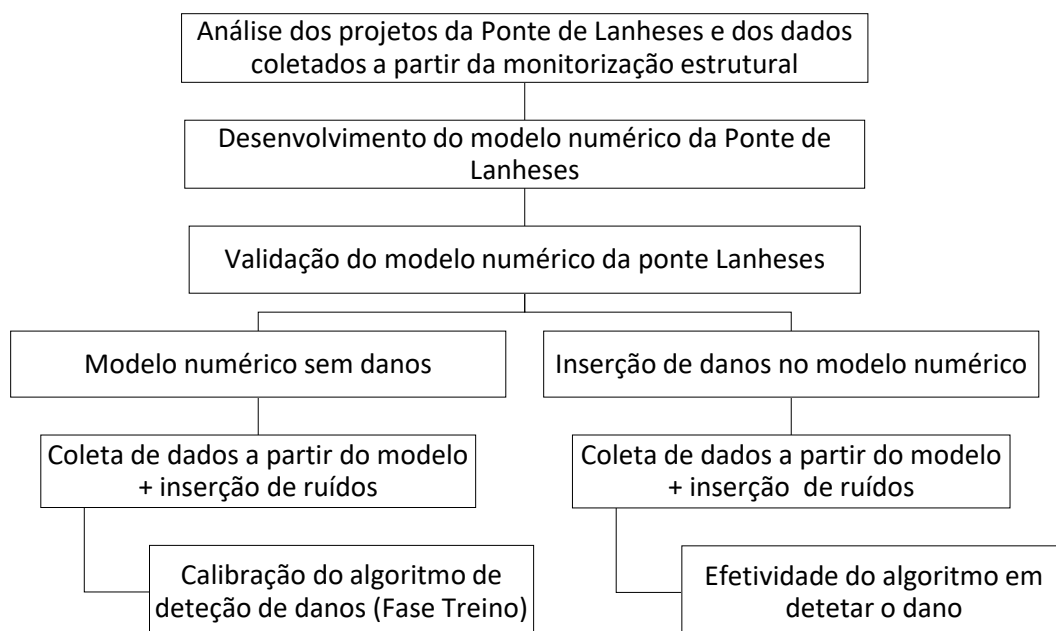


Figura 3.1 - Sequência de atividades desenvolvidas –metodologia.

O estudo, tratamento, desenvolvimento, análise e aplicação dos dados gerados nesta pesquisa foram efetuados com o auxílio dos softwares comerciais Microsoft Excel 2016, AutoCAD 2015, Robot Structural Analysis 2018, MatLab R2016a e RStudio.

3.1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA PONTE

A Ponte de Lanheses situa-se em Viana do Castelo, cidade da região norte de Portugal, dista cerca de 13,50km da foz e garante travessia sobre o rio Lima ligando as freguesias de Moreira de Geraz e Lanheses. A mesma tem seu projeto original desenvolvido pelo Engenheiro Edgar Cardoso e foi construída entre os anos de 1977 e 1981 (Neves, Santo, & Félix, 2015). A Figura 3.2 e a Figura 3.3 mostram respectivamente a localização e uma imagem atual da ponte.

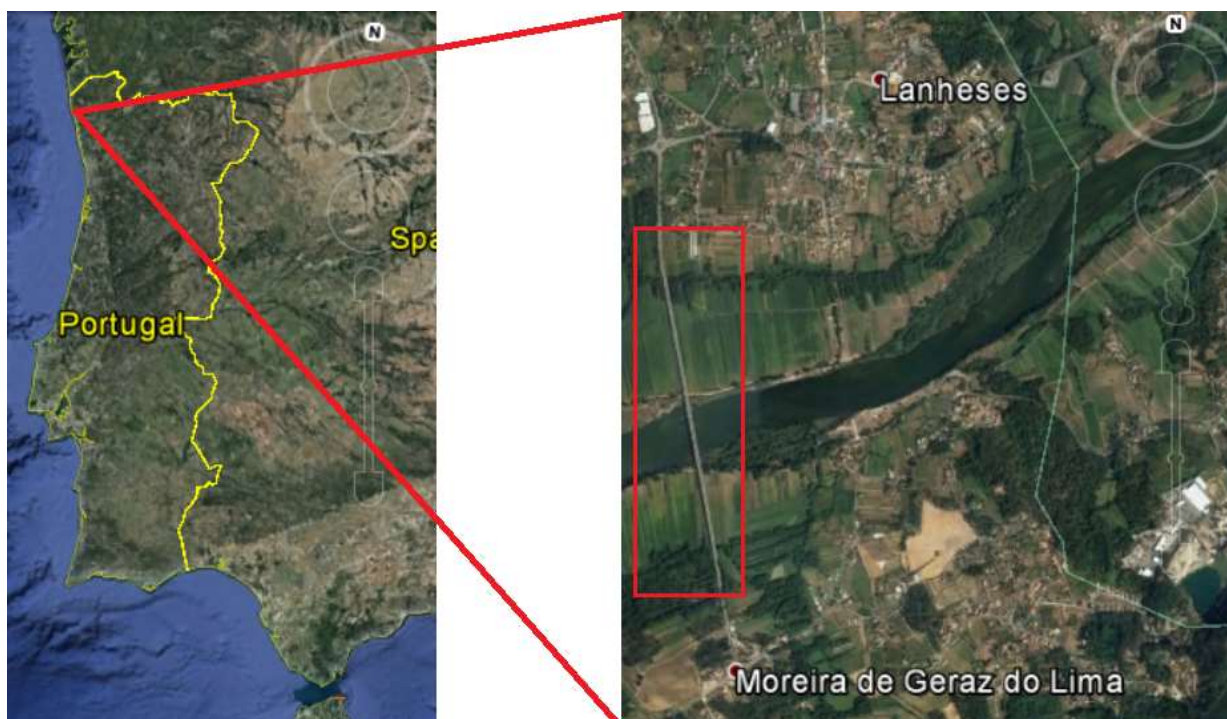


Figura 3.2 - Localização da Ponte de Lanheses em Portugal.



Figura 3.3 - Vista geral da Ponte de Lanheses.

Em seus 1218 m de comprimento, a ponte é dividida em 41 tramos, sustentados por 40 pilares em betão armado. Estes tramos são correntes de 30,0 metros, com exceção dos dois vãos extremos cujo vão é de 24,0 metros. Já os encontros possuem 10,30 metros de extensão cada. Cerca de 10 pilares da ponte encontram-se situados no leito menor do Rio Lima, o qual é o principal condicionante da obra de arte.

Ainda, a ponte é constituída por um tabuleiro único de 11,50 metros de largura, o qual comporta ambos os sentidos de circulação da EN305 sobre o Rio Lima, correspondente a uma faixa de rodagem e bermas com 9,0 metros e a dois passeios laterais sobrelevados com 1,25m cada. A Figura 3.4 mostra a faixa de rodagem e os passeios laterais do tabuleiro da ponte.



Figura 3.4 - Tabuleiro da Ponte de Lanheses.

A superestrutura da ponte é feita em betão armado pré-esforçado transversal e longitudinalmente, sendo constituída por quatro vigas longitudinais com inércias variáveis as quais são solidarizadas na face superior pela laje do tabuleiro e transversalmente por carlingas situadas a terços de vão e sobre os apoios nos pilares.

A estrutura monolítica do tabuleiro encontra-se fixa ao encontro na margem esquerda (Sul), podendo dilatar livremente na direção longitudinal sobre os diferentes pilares e o encontro móvel (Norte). A Figura 3.5 apresenta uma imagem atual da junta de dilatação do encontro móvel, vista pela parte superior do tabuleiro.



Figura 3.5 - Junta de dilatação do encontro móvel.

Desde a inauguração da ponte foram realizadas inspeções que detetaram variadas anomalias e resultaram em intervenções de reabilitação e reforço. A Tabela 3.1 mostra uma linha do tempo das principais ações executadas na Ponte de Lanheses.

Tabela 3.1 - Linha do tempo da Ponte de Lanheses

Fonte: (Neves et al., 2015)

Ano	Evento
1977	Data do projeto de execução do Engenheiro Edgar Cardoso
1981	Conclusão da obra e inauguração da Ponte de Lanheses
Entre 1997 e 2002	Realização de três inspeções à ponte e identificação de anomalias nas fundações e nos pilares
2005	Execução da reparação e reforço estrutural
2011	Instalação do sistema permanente de monitorização estrutural

Os trabalhos de inspeção e caracterização do estado de conservação da obra foram desenvolvidos pela COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, Lda. De entre as medições realizadas, pode-se observar os ensaios com solução de fenolftaleína para avaliação do estado de carbonatação dos betões e o ensaio de deteção da delaminação do betão através da percussão com martelo, além da leitura da largura de fendas, medição do potencial elétrico das armaduras e resistividade do betão e extração de carotes para determinação do teor em cloretos (Pinho, 2010).

Na Tabela 3.2 é apresentado um resumo das anomalias detetadas nos diversos componentes da estrutura.

Tabela 3.2 - Anomalias detectadas na inspeção da Ponte de Lanheses

Fonte: (Pinho, 2010)

Fundações	Pilares	Tabuleiro	Encontros
Erosão com estacas à vista	Degradação do betão e das armaduras junto às articulações	Fissuração nas vigas principais dos tramos	Fissuras e degradações localizadas com delaminação e exposição de armaduras corroídas
Estacas descobertas	Esmagamento e delaminação do betão; exposição de armaduras	Degradação generalizada das zonas das juntas de construção	Ligação degradada entre o tabuleiro e o encontro do lado fixo
Movimentação dos enroncamentos ao redor das cortinas	Destruição da placa de chumbo de apoio, contato betão-betão	Carlingas fissuradas e com armaduras principais expostas	Roletes do apoio móvel necessitando de lubrificação
Erosão generalizada em todo leito arenoso	Degradação dos pilares nas extremidades laterais com delaminação e corrosão de armaduras	Armaduras expostas corroídas nas vigas principais e segregação do betão	
		Bainhas de pré-esforço expostas	

Depois de realizadas as inspeções, os estudos necessários para a completa caracterização de anomalias, e a condução de diversos ensaios complementares de diagnóstico, a intervenção na obra resultou, de maneira geral, no reforço das fundações dos pilares, reforço nas ligações do tabuleiro ao encontro, substituição de aparelhos de apoio, isso tudo somado à alteração do sistema estrutural original da ponte, o qual possuía pilares pendulares e passou a ter pilares encastrados em sua base. O reforço e reabilitação da ponte foram executados pela empresa Soares da Costa. A Tabela 3.3 apresenta os principais trabalhos de reforço estrutural, reabilitação, reparação e proteção realizados pela empreiteira.

Tabela 3.3 - Principais trabalhos de reforço e reabilitação executados na Ponte de Lanheses

Fonte: (Costa, 2005)

Reforço estrutural	Reabilitação, reparação e proteção
Reforço das fundações indiretas com execução de micro estacas	Reparação e proteção do betão degradado
Alargamento e reforço dos maciços de encabeçamento	Reparação e proteção de fissurações
Verticalização e encastramento dos pilares em pêndulo e instalação dos aparelhos de apoio	Reparação e proteção de armaduras com falta de recobrimento
Alargamento e reforço das carlingas	Juntas de construção, irregularidades, porosidade excessiva e infiltrações
Instalação de pré-esforço exterior no tabuleiro	Proteção e revestimento de superfícies de betão
Reforço do encontro sul	Colocação de tela de impermeabilização no tabuleiro e execução de camada de desgaste
Demolição e execução de nova viga de bordadura	

A Figura 3.6 apresenta uma imagem recente da parte inferior da ponte, mostrando os atuais aparelhos de apoio, o alargamento da carlinga sobre os apoios e também os cabos de pré-esforço exterior instalados no decorrer da intervenção.



Figura 3.6 - Vista inferior da ponte.

Concluída a reabilitação e reforço estrutural, deu-se início ao processo de monitorização da obra de arte.

3.2 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

O sistema de monitorização estrutural permanente foi concebido e instalado pela NewMENSUS, Lda., com base no especificado pelo projetista no caderno de encargos, e tem como objetivo principal acompanhar a fase de serviço, pós-reabilitação, perspectivando prolongar a vida útil da estrutura através da observação permanente da sua integridade e durabilidade.

A implementação do sistema na ponte em estudo combina a aquisição e digitalização de dados vindos de sensores elétricos distribuídos por pontos de observação locais, ligados a um ponto de observação central. Os dados recolhidos são importados por um servidor e inseridos em uma base de dados com aplicação web a qual permite acesso a partir de qualquer computador credenciado (Faria, Félix, & Figueiras, 2011).

Resumidamente, o sistema de monitorização estrutural instalado na Ponte de Lanheses permite a medição das seguintes grandezas:

- Temperaturas ambientais no betão (através de detetores de temperatura resistivos);
- Deslocamentos dos apoios e das juntas de apoio (através de transdutores indutivos de deslocamento, LVDT's).
- Flechas (através de sensores de pressão elétricos);
- Infraescavação (monitorada através de sonar altimétrico);
- Nível da água (monitorado através de sensor de pressão).

A este sistema acresce o sistema de monitorização da durabilidade, dotado, entre outros, de sensores de corrosão.

Temperaturas ambientais e no betão

Foram instalados na obra da Ponte de Lanheses seis sensores de temperatura, dois deles caracterizados pela medição local da temperatura ambiente e os restantes pela temperatura no interior do betão. Todos eles foram instalados no tramo 29, conforme é apresentado na Figura 3.7.

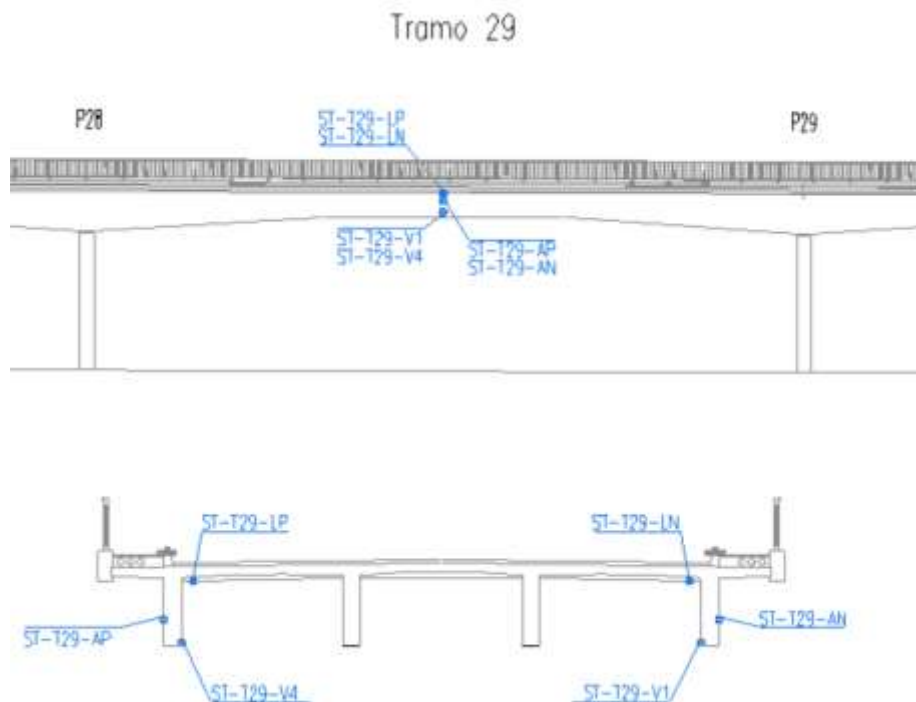


Figura 3.7 - Sensores de temperatura.

Fonte: (Faria et al., 2011)

Destaca-se que sigla utilizada para a monitorização deve ser entendida da seguinte forma: o primeiro grupo de letras se refere ao tipo de sensor, o segundo grupo refere-se ao tramo no qual este sensor está instalada, e por último concretiza-se a posição do equipamento no tramo, exemplo: ST – T29 – LP refere-se ao sensor de temperatura instalado no tramo 29, na laje (L) ao lado poente (P).

Foram utilizados somente sensores detetores de temperatura resistivos, os quais se baseiam no princípio do aumento da resistência de um metal com a temperatura, neste caso a platina. O sinal de saída destes sensores é uma resistência, expressa em ohm, a qual é convertida automaticamente em graus centígrados através do programa computacional utilizado (Faria et al., 2013).

Deslocamento dos aparelhos de apoios

Foram instalados ao todo doze transdutores elétricos de deslocamento para a medição de deslocamentos de apoio (DA). Dez destes sensores têm como objetivo a mensuração do deslocamento relativo entre o topo do pilar e o tabuleiro, sendo estes instalados aos pares, do lado poente (P) e lado nascente (N) sobre os pilares P26, P29, P32, P35 e P38. Os outros dois LVDT's foram instalados sobre o encontro do lado móvel (encontro E2), a fim de mensurar os movimentos da junta de dilatação (Faria et al., 2011).

A Figura 3.8 ilustra a localização destes sensores nos pilares P32 e P35 (DA-P32 e DA-P35). Instrumentação similar foi realizada nos demais pilares e no encontro E2.

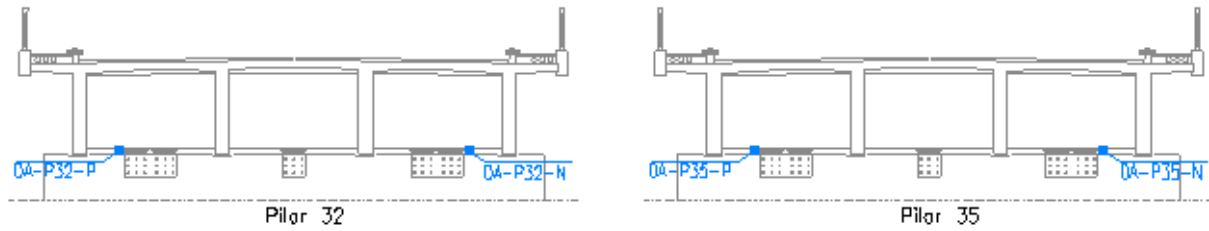


Figura 3.8 - Transdutores de deslocamento nos pilares P32 e P35.

Fonte: (Faria et al., 2011)

Os sensores utilizados pertencem à classe de transdutores indutivos de deslocamentos, também chamados de LVDT.

Flechas

Para a medição das flechas foi instalado um sistema de nivelamento hidrostático, ao qual se associaram sete sensores de pressão elétricos, seis deles localizados a meio vão dos tramos T26, T28, T30 e T32, sendo que nos tramos T28 e T30 estes foram instalados aos pares. Um sensor de referência se encontra no pilar P29 para compensar os efeitos de variação de temperatura e eventuais perdas do líquido no circuito (Faria et al., 2011). A Figura 3.9 ilustra a localização dos sensores de pressão (DV), na secção de meio-vão dos tramos T26 e T28, nas vigas interiores do tabuleiro (V2 e V3).

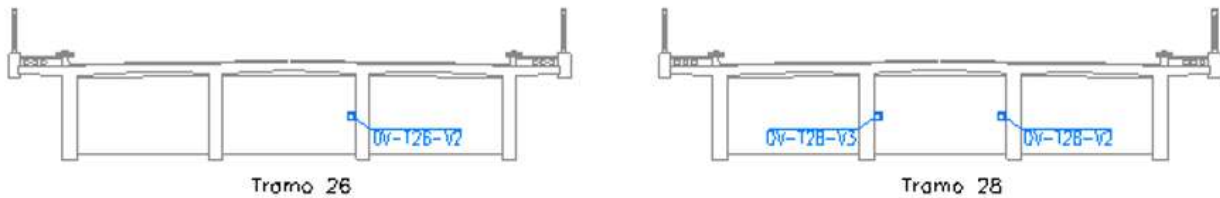


Figura 3.9 - Sensores de pressão nos tramos T26 e T28.

Fonte: (Faria et al., 2011)

Infraescavação e nível de água

Um sonar altimétrico (SO-P20) de corpo em aço inox foi instalado junto à fundação do pilar P20 para a monitorização da profundidade do leito do rio (Faria et al., 2011). Para a determinação do nível de água do rio foi instalado na mesma região um sensor de pressão (SP-P20). Os dois foram aplicados junto ao maciço de encabeçamento das estacas, conforme mostrado nas Figura 3.10 e Figura 3.11.

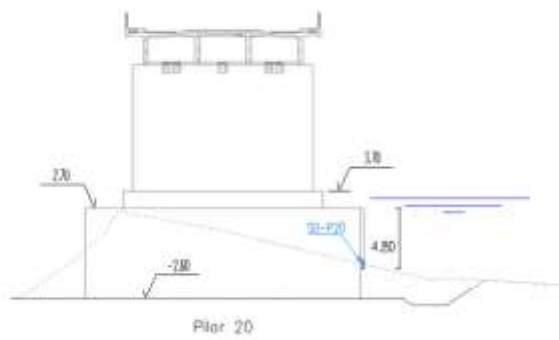


Figura 3.10 - Instalação do sonar altimétrico junto ao pilar P20.

Fonte: (Faria et al., 2011)

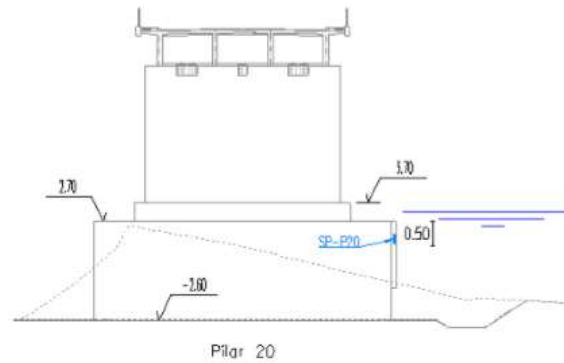


Figura 3.11 - Instalação do sensor de pressão junto ao pilar P20.

Fonte: (Faria et al., 2011)

Monitorização provisória – Temperatura e rotação dos pilares

Para além da monitorização permanente, foi realizada em 2015, no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECM-EST/2131/2012, FCOMP-01-0124-FEDER-028861 (Félix et al., 2015), uma monitorização provisória. Esta monitorização contou com a medição de temperatura em 4 pontos dos pilares P26 e P29 (ST) e também registrou a inclinação dos mesmos (IC). Abaixo é ilustrada a localização dos sensores utilizados no sistema de monitorização temporário.

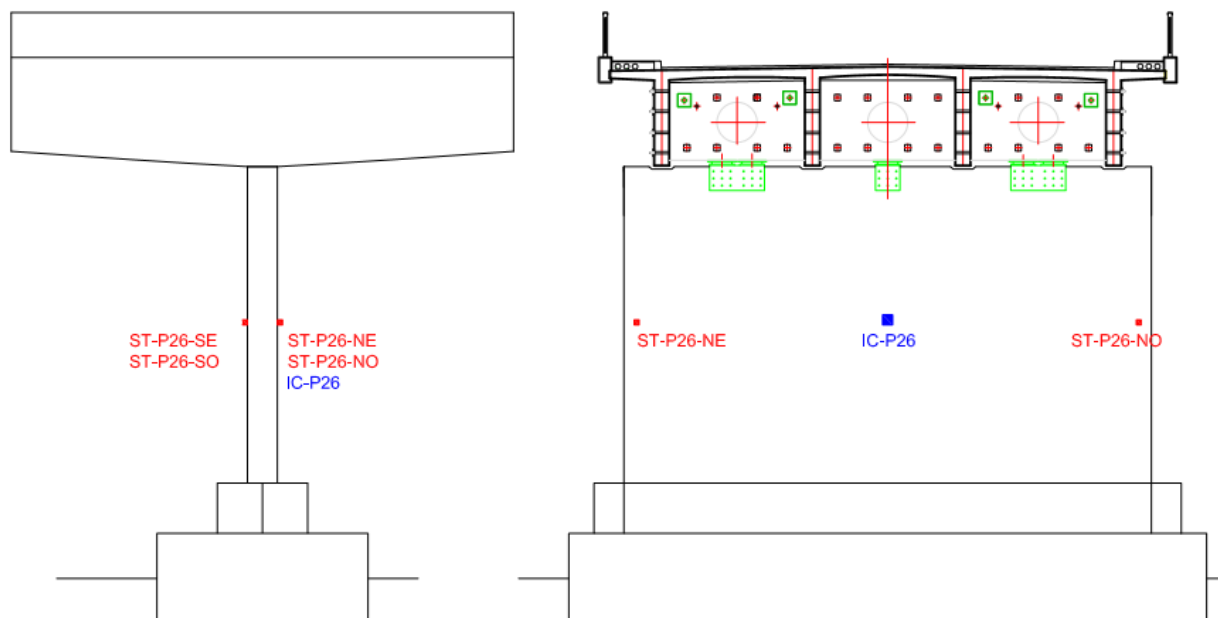


Figura 3.12 - Esquema do sistema de monitorização provisório.

Fonte: (Faria et al., 2011)

3.2.1 Estudo dos dados provenientes da monitorização estrutural

Os dados disponíveis da monitorização estrutural da Ponte de Lanheses que serão utilizados neste trabalho fazem referência às mensurações de temperaturas, deslocamentos, rotações dos pilares e flechas nos tramos do tabuleiro, todos coletados através do sistema de monitorização estrutural descrito na seção 3.2.

Os dados estão disponíveis em dois conjuntos: (i) o primeiro, datado dos anos de 2011 – 2012, contendo 9692 dados coletados de hora em hora durante aproximadamente 13 meses; (ii) e o segundo, do ano de 2015, com 205 dados coletados em uma frequência de 15 em 15 minutos, durante aproximadamente 2 dias. A Tabela 3.4 mostra um resumo destes dados conforme o ano.

Tabela 3.4 - Disponibilidade dos dados de monitorização estrutural

	2011-2012	2015
Quantidade de dados	9692 dados ≈ 13 meses/ 405 dias	205 dados ≈ 2 dias
Frequência de medição	Hora em hora	15 em 15 minutos
Temperatura ambiente	✓	✓
Temperatura do tabuleiro	✓	✓
Temperatura dos pilares	x	✓
Deslocamentos relativos (LVDT's)	✓ (incompleto)	✓
Inclinação dos pilares	x	✓
Flechas	✓	x

Na realização de uma análise prévia dos dados buscou-se observar a existência de relação entre as variáveis observadas. As figuras Figura 3.13 aFigura 3.15 apresentam de forma sucinta o resultado desta análise. Para a obtenção dos valores relativos dos deslocamentos e das rotações foi considerado como valor de referência o registo efetuado às 12 horas do dia 22/03/2012. Para a temperatura uniforme do tabuleiro e para a temperatura uniforme do pilar foram utilizados os valores médios dos vários sensores instalados no elemento respetivo. Além disso, nos gráficos, as séries temporais das diversas grandezas foram ajustados com o delay ótimo entre estas e a temperatura, uma vez que a resposta da estrutura à variação da temperatura não é instantânea.

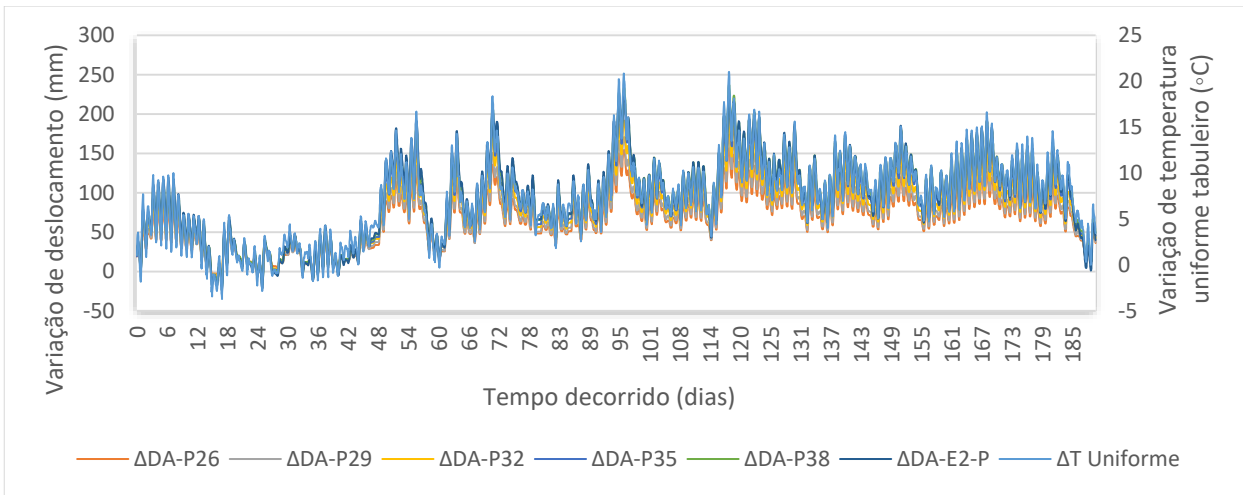


Figura 3.13 - Relação entre variação de temperatura uniforme do tabuleiro e deslocamentos relativos dos pilares – 2011/2012.

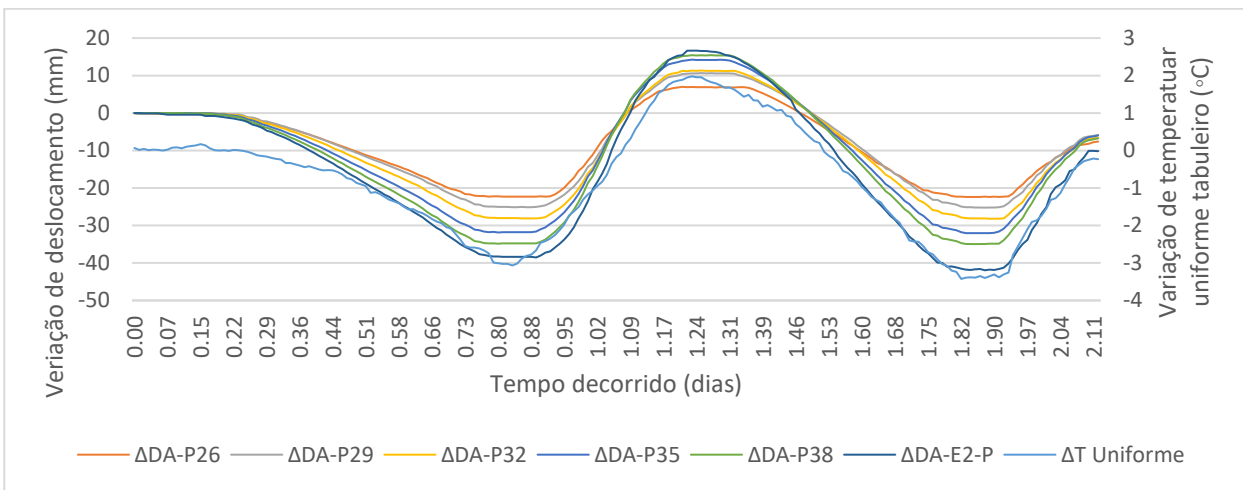


Figura 3.14 - Relação entre variação de temperatura uniforme do tabuleiro e deslocamentos relativos do tabuleiro – 2015.

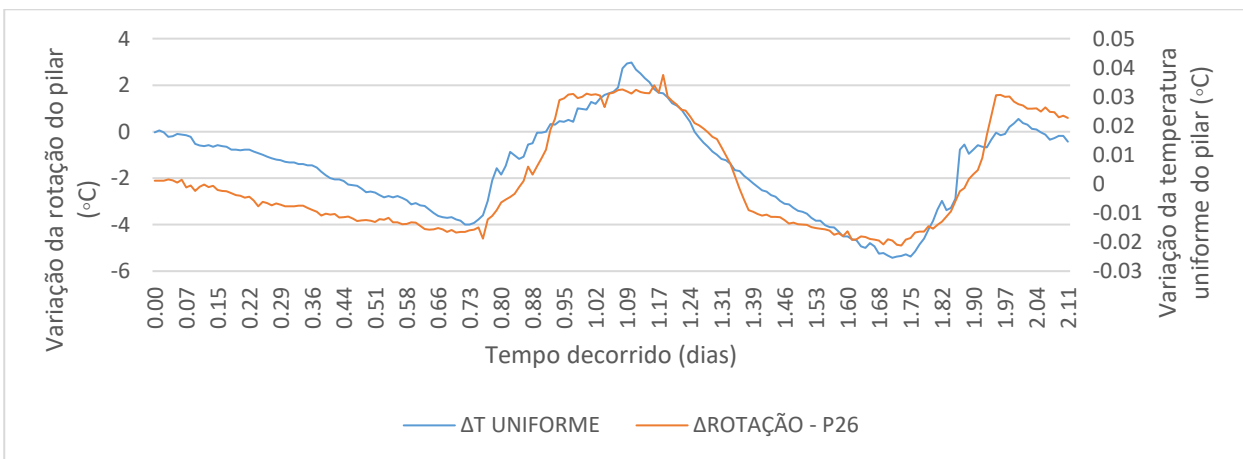


Figura 3.15 - Relação entre variação de temperatura uniforme e rotação do pilar 26 – 2015.

Da análise destas figuras pode-se evidenciar a relação que existe entre as variações de temperatura e os deslocamentos relativos do tabuleiro, e a rotação do pilar P26. Desta forma, espera-se que a imposição de danos na estrutura resulte em uma mudança do comportamento da mesma frente às diferentes variações de temperatura. Verificada esta relação, buscou-se encontrar o melhor conjunto de variáveis para utilização na implementação dos algoritmos de deteção de danos.

É importante notar que o período de calibração de um algoritmo de deteção de danos deve ser suficiente para representar as ações e respostas que possam ocorrer durante a vida útil da estrutura, quanto mais dados para a calibração mais realista e confiável esta será. À vista disso, observa-se que os dados coletados pela monitorização são insuficientes, uma vez que o conjunto de medições mais relevantes (2011-2012) está incompleto enquanto o conjunto do ano de 2015 representa um período curto de observações.

Isto posto, foi realizada uma adaptação dos dados a serem simulados no modelo numérico desenvolvido. Através desta adaptação foram completados os dados do ano de 2011-2012. Realizaram-se duas regressões lineares múltiplas com os dados de 2015, tendo como variáveis dependentes a variação da temperatura uniforme e diferencial dos pilares e ambas utilizando como variáveis independentes as temperaturas ambiente, uniforme e diferencial do tabuleiro. Em outras palavras, as ações de temperatura foram geradas de forma mais realista possível para serem utilizadas no modelo numérico desenvolvido.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi elaborado conforme os projetos de reabilitação da ponte (COBA, 2005), sendo utilizado elementos de barra com diferentes seções para representar a estrutura do tabuleiro, dos pilares e cabos de pré-esforço. Posteriormente, este modelo foi utilizado para simular danos e gerar dados, os quais alimentaram os algoritmos de deteção de danos.

Na modelação numérica da ponte foram utilizados três tipos de tramos: um para cada tramo extremo (tramos que ligam aos encontros) e um intermédio para todos os demais. Além disso, sabendo que a altura do tabuleiro não é constante, estes tramos foram divididos em dezasseis seções para representar adequadamente as características geométricas dos elementos. As Figuras Figura 3.16 a 3.18 representam os tramos do tabuleiro e as divisões dos elementos, conforme descrito. Nestas, os elementos representativos da secção transversal do tabuleiro são numerados de 1 a 16 para melhor descrever suas características.

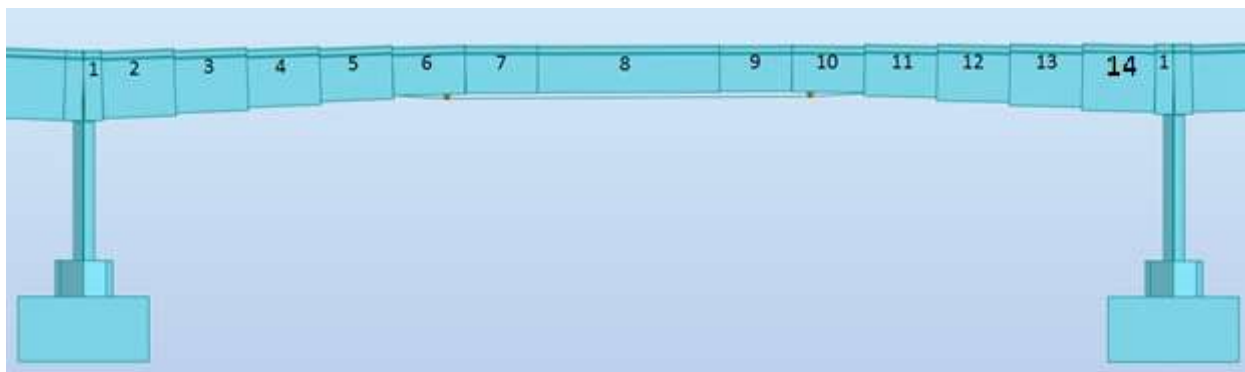


Figura 3.16 - Tramos internos (padrão).

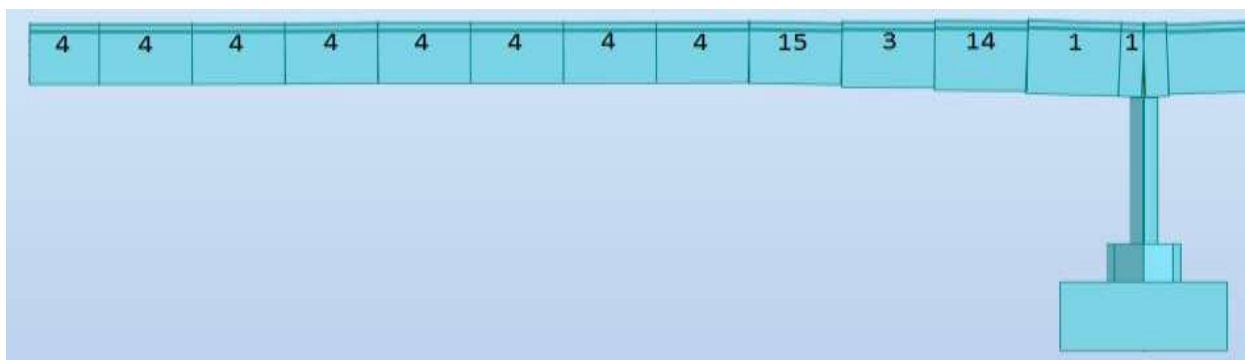


Figura 3.17 - Tramo extremo , encontro fixo.

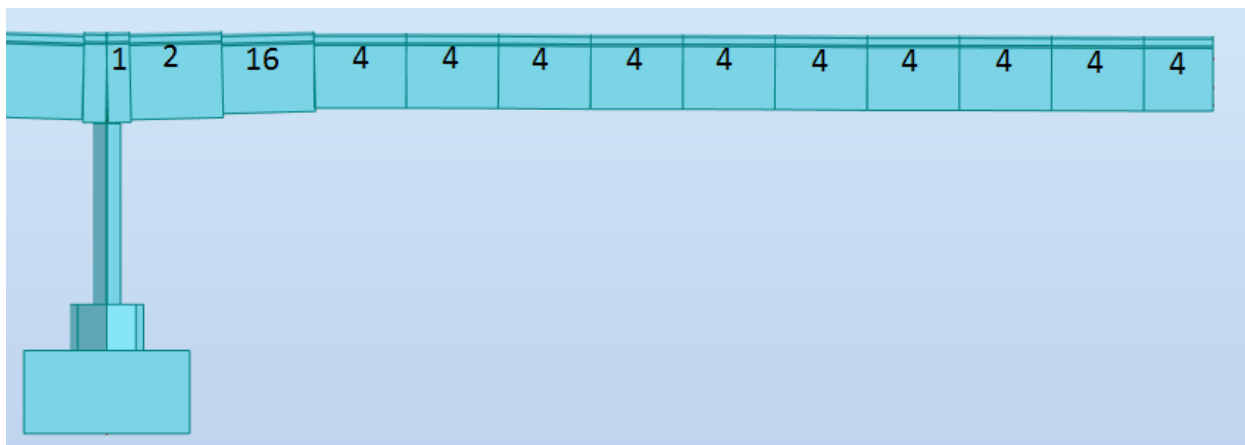


Figura 3.18 - Tramo extremo, encontro móvel.

Todos os elementos possuem o mesmo formato de seção transversal, representado na Figura 3.19, contudo diferem em suas medidas de altura. As características adotadas para cada elemento são as resumidas na Tabela 3.5.

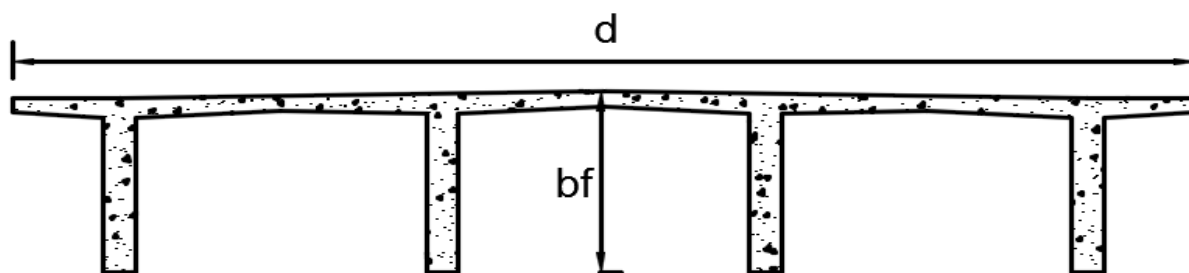


Figura 3.19 - Seção transversal do tabuleiro.

Tabela 3.5 - Características dos elementos dos tramos do tabuleiro

Elemento	Área da seção (Ax) (cm ²)	Inércia (Iy) (cm ⁴)	Altura máxima (bf) (cm)	Largura (d) (cm)	Material
1	40661,00	4306682745,83	196,80	1100,00	C30/37
2	39581,00	4185101745,83	187,80	1100,00	C30/37
3	38141,00	4022993745,83	175,80	1100,00	C30/37
4	36576,50	3848411014,58	162,70	1100,00	C30/37
5	35021,00	3671759745,83	149,80	1100,00	C30/37
6	33461,00	3496142745,83	136,80	1100,00	C30/37
7	33101,00	3455615745,83	133,80	1100,00	C30/37
8	32861,00	3428597745,83	131,80	1100,00	C30/37
9	32501,00	3388070745,83	128,80	1100,00	C30/37
10	32741,00	3415088745,83	130,80	1100,00	C30/37
11	34421,00	3604214745,83	144,80	1100,00	C30/37
12	36101,00	3793340745,83	158,80	1100,00	C30/37
13	37781,00	3982466745,83	172,80	1100,00	C30/37
14	39461,00	4171592745,83	186,80	1100,00	C30/37
15	36941,00	3887903745,83	165,80	1100,00	C30/37
16	37901,00	3995975745,83	173,80	1100,00	C30/37

Conforme é retratado na Figura 3.20, os pilares foram divididos em três partes. A primeira parte (17) representa o pilar da estrutura original da ponte e as outras duas (18 e 19) representam o maciço que foi executado no processo de reabilitação. As alturas da primeira e última partes variam para cada um dos pilares da estrutura, enquanto a seção do meio tem uma altura fixa de 1,00 metro.

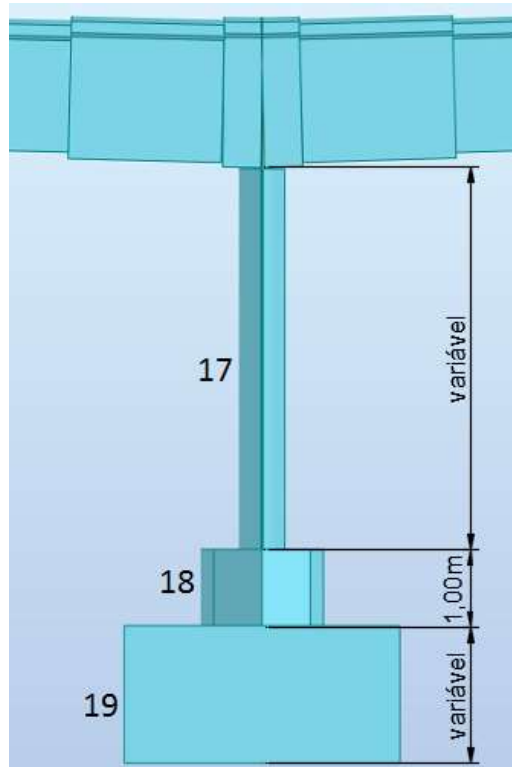


Figura 3.20 - Representação dos pilares.

Outra particularidade do projeto é em relação às seções transversais dos maciços de encabeçamento das estacas (elemento 19), onde os pilares dispostos na zona do leito do rio (elemento 19B) são diferentes dos demais (elemento 19A). As figuras 3.21 a 3.24 dispõem de todas as seções utilizadas no modelo numérico, enquanto a Tabela 3.6 mostra as características de cada uma delas.

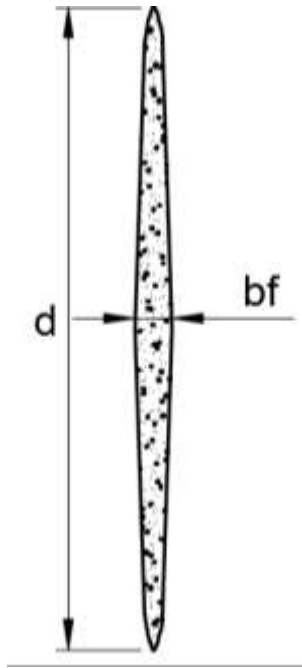


Figura 3.21 - Seção transversal - elemento 17.

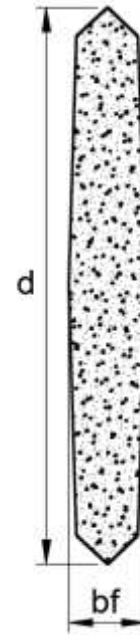


Figura 3.22 - Seção transversal - elemento 18.

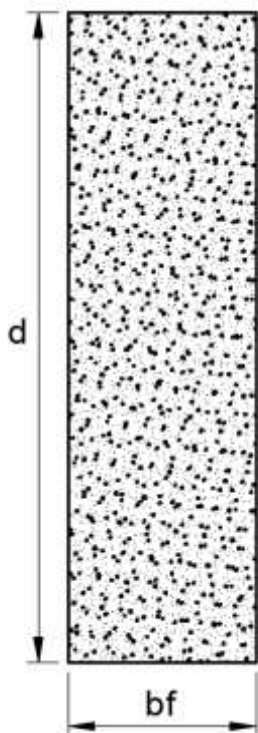


Figura 3.23 - Seção transversal - elemento 19A.

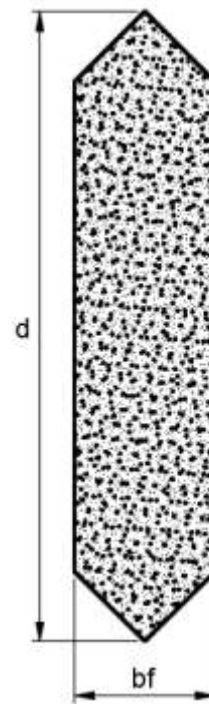


Figura 3.24 - Seção transversal zona do leito do rio - elemento 19B.

Tabela 3.6 - Características dos elementos dos pilares

Elemento	Área da seção - A_x (cm ²)	Inércia - I_y (cm ⁴ cm ⁴)	Altura máxima - b_f (cm)	Largura - d (cm)	Material
17	44115,96	3052988174,41	60,00	1050,00	C25/30
18	157827,00	15240104887,50	160,00	1170,00	C35/45
19A	457200,00	61451490000,00	360,00	1270,00	C35/45
19B	514800,00	89116170000,00	360,00	1610,00	C35/45

Os cabos de pré-esforço foram inseridos no programa de modelação com seção circular de área similar aos 4 cabos de 19 cordões cada, e força de pré-esforço na forma de variação de temperatura. A Figura 3.25 mostra em 2D um esboço dos tramos da ponte com os cabos destacados em vermelho.

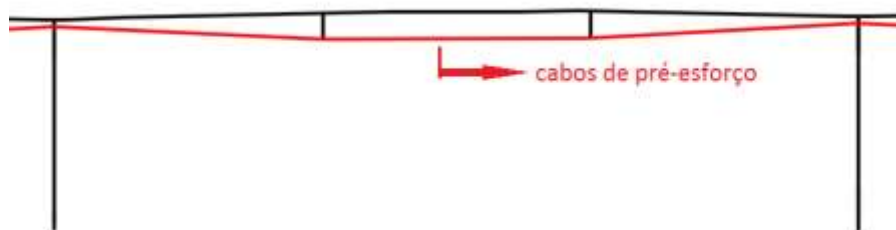


Figura 3.25 - Representação dos cabos de pré-esforço.

Para as ligações entre os pilares e o centro de gravidade do tabuleiro foram utilizadas barras rígidas de forma a representar as carlingas. Já os desviadores dos cabos de pré-esforço representou-se no programa através de ligações rígidas.

Com relação às condições de apoio da estrutura, considerou-se o encastramento perfeito na base de todos os pilares, apoio simples na ligação entre pilares e tabuleiro e no encontro móvel, já para o encontro fixo considerou-se apoio duplo. Ressaltando que todas estas condições são para o plano, uma vez que para fora do plano todos os deslocamentos e rotações estão impedidos. Na Tabela 3.7 é apresentado um resumo das condições de apoio.

Tabela 3.7 - Resumo das condições de apoio da estrutura

	Rotação			Deslocamento		
	RX	RY	RZ	DX	DY	DZ
Base dos pilares	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado
Ligação pilar-tabuleiro	Bloqueado	Livre	Bloqueado	Livre	Bloqueado	Bloqueado
Encontro Fixo	Bloqueado	Livre	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado	Bloqueado
Encontro Móvel	Bloqueado	Livre	Bloqueado	Livre	Bloqueado	Bloqueado

A Figura 3.26 mostra parcialmente o modelo final da Ponte de Lanheses em ambiente ROBOT. Nesta imagem pode-se notar a diferença entre os maciços de encabeçamento de estacas na região do leito do rio com relação aos demais, e também as diferentes seções do tabuleiro representadas por cores.

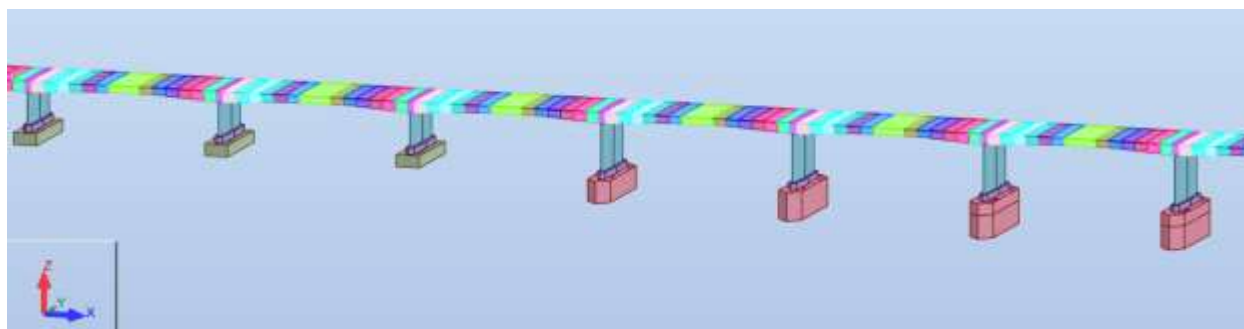


Figura 3.26 - Modelo final da Ponte de Lanheses em ambiente ROBOT.

3.3.1 Validação do modelo numérico

Para validação do modelo numérico utilizou-se como objeto de comparação os dados da monitorização realizada no ano de 2015.

Foram inseridos no modelo as variações de temperatura uniforme e diferencial do tabuleiro e dos pilares e então comparou-se os valores dos deslocamentos relativos de cada um dos seis pilares instrumentados com os valores obtidos através da monitorização estrutural para o mesmo período de tempo. Nas Figura 3.27 e Figura 3.28 é apresentado os resultados desta comparação para o pilar instrumentado P26. Pode-se notar a forte relação entre os dois conjuntos de dados uma vez que o coeficiente de determinação (R^2) o qual explica a relação entre as variáveis é de aproximadamente 96%.

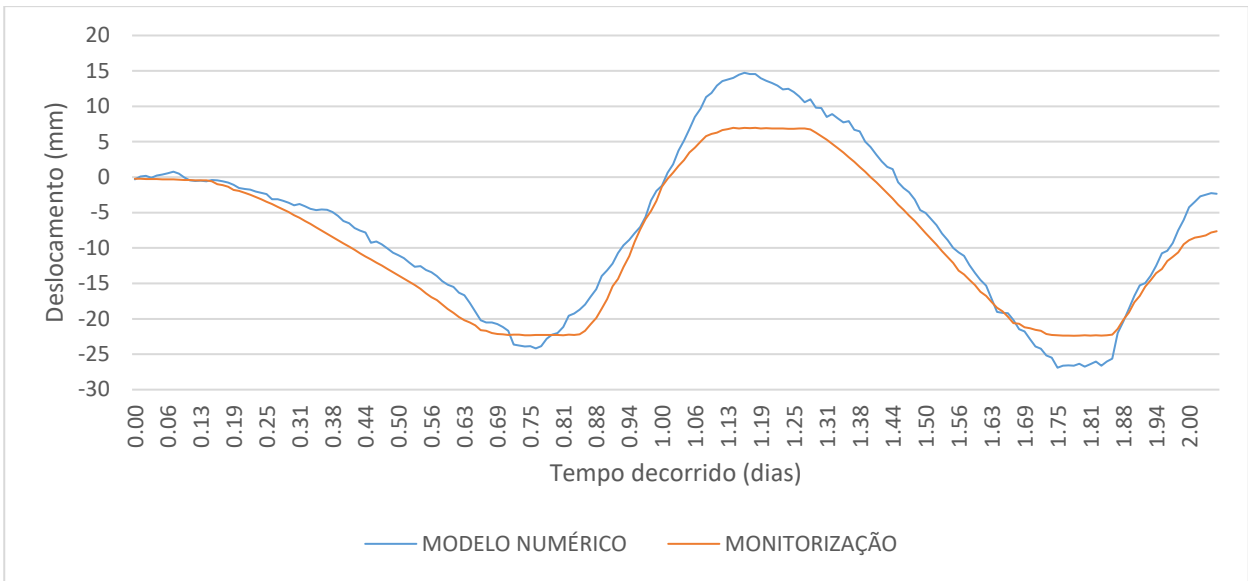


Figura 3.27 - Comparação entre dados da monitorização e do modelo numérico - Pilar P26.

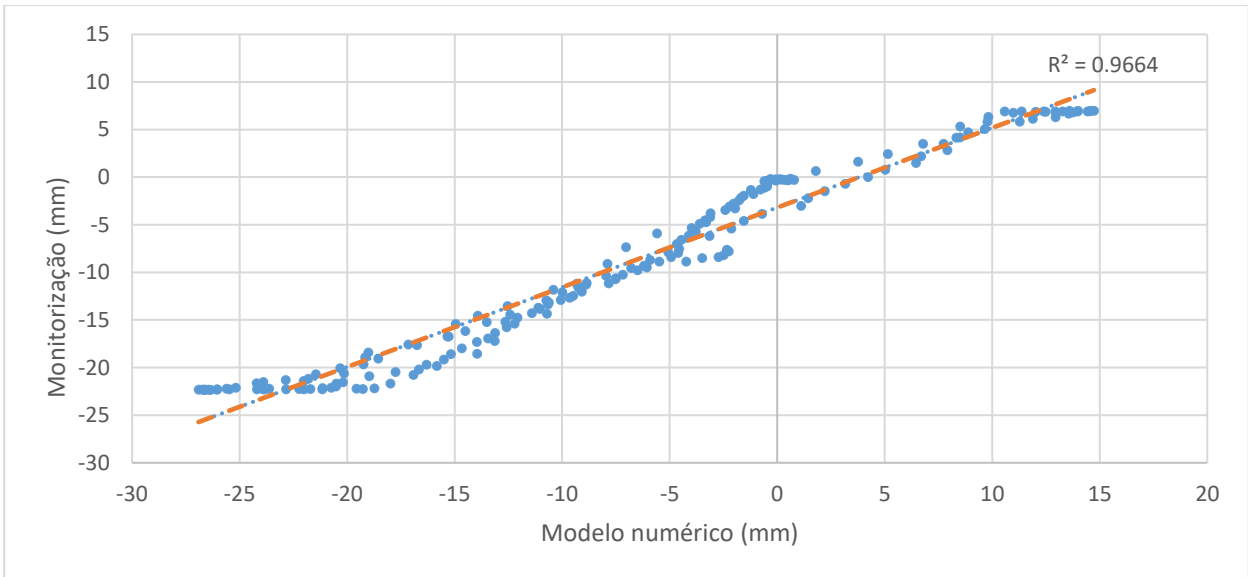


Figura 3.28 - Relação entre os dados da monitorização e do modelo numérico - Pilar P26.

Por meio desta comparação percebe-se que o modelo numérico desenvolvido pode ser utilizado de forma satisfatória para simular o comportamento da Ponte de Lanheses na análise que se segue de comportamento estático da estrutura.

3.3.2 Simulação de danos no modelo

Foram simulados no modelo numérico dezasseis casos de danos, conforme descrito na Tabela 3.8. Buscou-se a inserção dos danos em locais próximos e afastados dos sensores do sistema de monitorização para verificar a efetividade dos métodos nas situações mais favoráveis e desfavoráveis possíveis.

Tabela 3.8 - Casos de danos inseridos no modelo numérico da Ponte de Lanheses

Caso de dano 1	Bloqueio do deslocamento horizontal entre tabuleiro e pilar instrumentado P26.
Caso de dano 2	Bloqueio do deslocamento horizontal entre tabuleiro e pilar não instrumentado P27 (pilar adjacente a um pilar instrumentado).
Caso de dano 3	Bloqueio do deslocamento horizontal entre tabuleiro e pilar não instrumentado P01 (pilar não instrumentado mais afastado).
Caso de dano 4	Bloqueio do deslocamento horizontal no encontro móvel E2.
Caso de dano 5	Bloqueio da rotação entre tabuleiro e pilar instrumentado P29 (Mantido o deslocamento relativo livre).
Caso de dano 6	Bloqueio do deslocamento horizontal entre tabuleiro e pilar instrumentado P26 + alteração da condição de apoio do pilar P26 considerando vínculo duplo na base.
Caso de dano 7	Bloqueio do deslocamento horizontal entre tabuleiro e pilar não instrumentado P01 + alteração das condições de apoio do pilar P01 considerando vínculo duplo na base.
Caso de dano 8	Diminuição da rigidez (-30%) tabuleiro no tramo instrumentado T28.
Caso de dano 9	Diminuição da rigidez (-30%) do tabuleiro no tramo não instrumentado T25 (tramo adjacente a um tramo instrumentado).
Caso de dano 10	Diminuição da rigidez (-30%) do tabuleiro no tramo não instrumentado T01, entre o encontro fixo (E1) e o pilar P01 (tramo não instrumentado mais afastado).
Caso de dano 11	Bloqueio parcial do deslocamento horizontal entre o tabuleiro e o pilar instrumentado P26. Folga de 60mm.
Caso de dano 12	Bloqueio parcial do deslocamento horizontal entre o tabuleiro e o pilar não instrumentado P25. Folga de 60mm.
Caso de dano 13	Bloqueio parcial do deslocamento horizontal entre o tabuleiro e o pilar não instrumentado P01. Folga de 2mm.
Caso de dano 14	Retirada dos cabos de pré-esforço no tramo instrumentado T28.
Caso de dano 15	Diminuição da força de pré-esforço (-30%) no tramo instrumentado T28.
Caso de dano 16	Diminuição da força de pré-esforço (-30%) no tramo não instrumentado T01 (tramo não instrumentado mais afastado).

A escolha dos danos foi baseada sobretudo em casos possíveis e recorrentes encontrados em estruturas de pontes e viadutos, com ressalva aos casos de danos 14, 15 e 16 que dizem a respeito da diminuição considerável da força de pré-esforço a qual foi inserida considerando um caso de dano acidental.

A simulação do bloqueio de rotação, deslocamento horizontal total e parcial dos aparelhos de apoio representa o mal funcionamento das articulações metálicas que compõem o sistema, causados pelo depósito de detritos e corrosão. O uso deste tipo de articulação depende de manutenção cuidadosa e permanente para evitar que causas extrínsecas, principalmente a corrosão, não tornem o funcionamento da peça insatisfatório (Machado & Sartorti, 2010).

A alteração da condição de contorno entre estaca e bloco de coroamento procurou simular o caso de rigidez insuficiente para legitimar o apoio encastrado, que pode ser resultante de uma falha no processo de reabilitação da ponte. O êxito do alargamento da base das fundações depende da correta transmissão das cargas entre a estrutura original e nova. Eventuais falhas nesta transmissão pode ocasionar em condições de apoio diferentes das idealizadas em projeto (Leal, 2001).

Além da corrosão das armaduras, exposição à meios agressivos, e diversos outros fatores, as cargas rodoviárias majoradas tendem a aumentar os efeitos de fissuração nos elementos de betão (Pereira, Miranda, Faintstein, & Carvalho, 2010). Desta maneira, utilizou-se da diminuição da rigidez do elemento para simular os efeitos da fissuração possível de ocorrer no tabuleiro da ponte.

Uma vez que as perdas imediatas e progressivas dos cabos de pré-esforço são contabilizadas ainda em fase de projeto, a diminuição da força de pré-esforço, total ou parcial, buscou explorar eventuais casos de acidente que possam ocorrer durante o funcionamento da ponte, nomeadamente decorrente da rotura de cabos de pré-esforço não aderentes.

3.3.3 Coleta de dados a partir do modelo numérico

Conforme análise dos dados da monitorização, descrito em 3.2.1, foram inseridos no modelo numérico 9692 conjuntos de temperaturas correspondentes às variações uniformes e diferenciais dos pilares e do tabuleiro. Esses dados referem-se a um período de monitorização de hora em hora por aproximadamente 405 dias. A partir do modelo numérico foram coletados os valores das grandezas que seriam medidas conforme o sistema de monitorização, ou seja, referentes aos deslocamentos dos pilares P26, P29, P32, P35 e P38 e do encontro móvel E2, como também as rotações dos pilares P26 e P29 e as flechas dos tramos T26, T28, T30 e T32. O esquema da figura Figura 3.29 exemplifica o processo de inserção e coleta dos dados no modelo numérico.

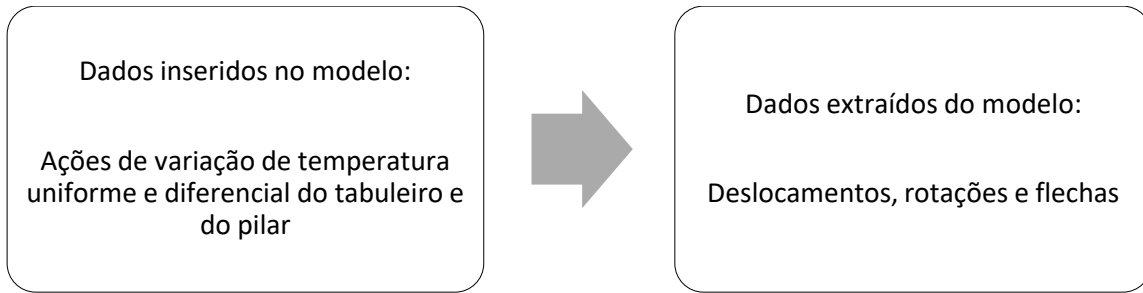


Figura 3.29 - Esquema de inserção e aquisição de dados através do modelo numérico.

É importante destacar que as grandezas medidas foram divididas em 3 partes:

- Desde o primeiro dia até ao dia 270 corresponde ao período de calibração dos modelos;
- Do dia 271 até ao dia 337 corresponde à estrutura sem danos;
- E por último, dos dias 338 ao 405 corresponde à coleta de dados após a inserção de algum dos casos de dano.

Isto feito, obteve-se dados correspondendo a parte da estrutura sem danos e parte danificada, nos quais espera-se que os métodos de deteção sejam capazes de identificar.

Vale ainda salientar que o modelo numérico não tem em consideração os erros de medição que podem ocorrer no sistema de medição real. Para consideração deste efeito foram inseridos ruídos nos dados gerados, conforme será apresentado na seção 3.3.4.

3.3.4 Estimativa dos ruídos

Nos dados coletados a partir do modelo numérico foram inseridos ruídos com distribuição normal e amplitude de acordo com a precisão dos equipamentos de monitorização. Na falta de informação de fabricante ou modelo do aparelho utilizado, buscou-se a precisão de aparelhos similares. Na Tabela 3.9 é mostrado a amplitude utilizada para estes ruídos.

Tabela 3.9 - Amplitude dos ruídos

Aparelho / dados	Amplitude do ruído
Termómetros / temperatura	± 0.1 graus celcius
LVDT's / deslocamentos	± 2.5 mm
Inclinómetros / rotação	± 0.5 graus
Sensores de pressão / flechas	± 1 mm

Foram gerados 12 diferentes conjuntos de ruídos: 6 para os dados provenientes dos LVDT's, 2 para os dados dos inclinômetros e 4 para os dados dos sensores de pressão. Utilizou-se os mesmos ruídos para todos os 16 casos de dano.

Com os ruídos somados ao dados extraídos do modelo numérico finalizou-se os conjuntos de dados gerados para serem analisados. Destaca-se a incapacidade de identificar os danos somente pela análise visual destes dados (Figura 3.30 e Figura 3.31) e por isso justifica-se a aplicação dos métodos de detecção de danos aplicados a seguir.

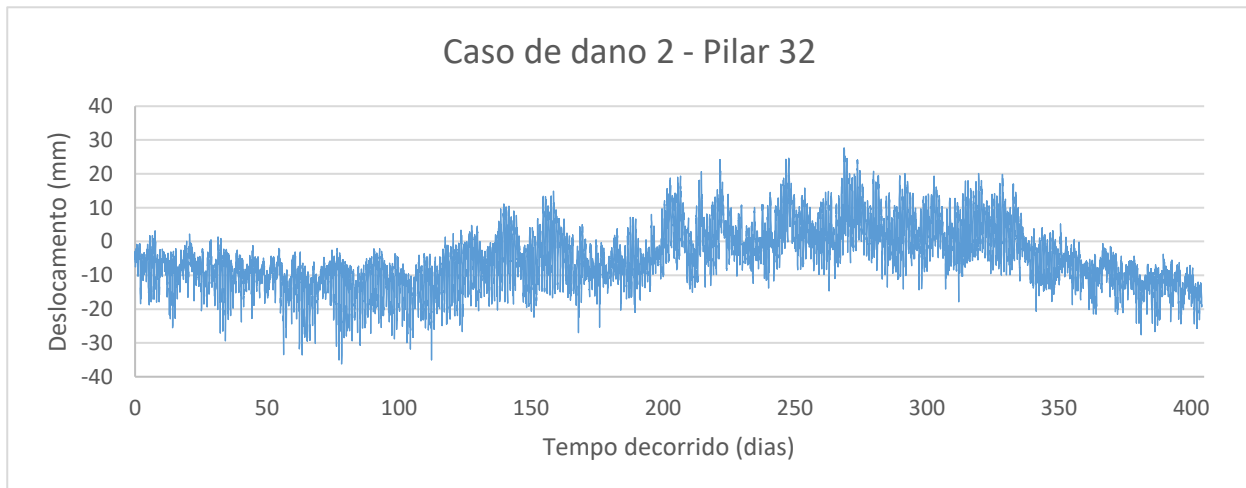


Figura 3.30 – Dados do modelo numérico somado o ruído - temperatura vs. deslocamento caso de dano 2 – pilar 32

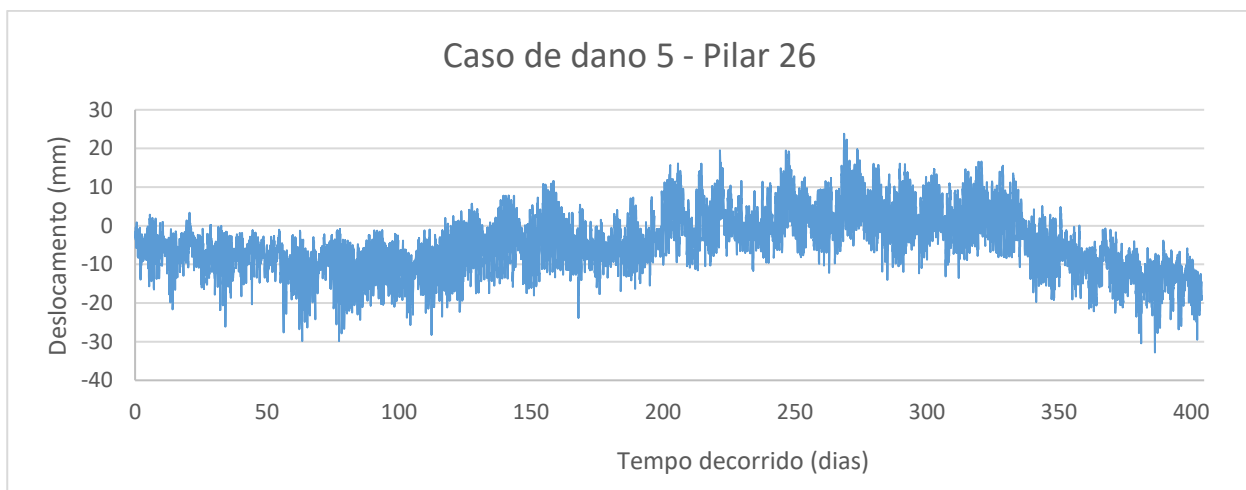


Figura 3.31 - Dados do modelo numérico somado o ruído - temperatura vs. deslocamento caso de dano 5 – pilar 26

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETEÇÃO DE DANOS AO ESTUDO DA PONTE DE LANHESES

Buscando a análise dos dados gerados e identificação dos danos inseridos foram aplicados dois métodos de detecção de danos: o método da regressão linear múltipla (Rodrigues, 2015) e o método da análise de componentes principais (Amorim, 2017), também foi estudada uma combinação destes dois. Neste capítulo será abordada a aplicação deste dois métodos e analisados os resultados obtidos.

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

De posse dos conjuntos de dados da ação da temperatura e da resposta da estrutura, somados aos respectivos ruídos calculados, realizou-se a regressão linear múltipla para o comportamento de cada um dos sensores de monitorização.

Os valores dos deslocamentos, rotações e flechas foram inseridos como variável dependente na equação, e as quatro ações de temperatura (uniforme e diferencial do tabuleiro e do pilar) como variáveis independentes, todas estas referente ao período de calibração.

Após gerados os modelos de regressão, foi verificada a representatividade de cada um deles, através do valor de R^2 . Para as regressões representativas calculou-se as previsões de comportamento para todo o conjunto de dados e então, foram calculados os resíduos de acordo com a expressão:

$$R_{ij} = Y_{ij} - \bar{Y}_{ij} \quad (4.1)$$

Onde R_{ij} representa o resíduo, Y_{ij} o valor previsto no modelo de regressão e \bar{Y}_{ij} o valor medido no modelo numérico somado ao ruído, correspondente ao sensor i no conjunto j .

Os resíduos foram normalizados e então foi aplicada a estatística de controle T^2 para o controle das variáveis em conjunto. A normalização foi realizada conforme a equação:

$$\bar{R}_{ij} = \frac{R_{ij} - \bar{R}_{ref}}{\sigma R_{ref}} \quad (4.2)$$

Onde $\overline{R_{ij}}$ e R_{ij} correspondem ao resíduo normalizado e ao resíduo do sensor i no conjunto j enquanto $\overline{R_{ref}}$ e σR_{ref} são respectivamente à média e o desvio padrão dos resíduos no período de calibração.

O fluxo de atividades adotado na realização da análise de regressão linear deu-se da seguinte maneira: (i) Considerando o período de calibração e com base nas variáveis preditoras (variações de temperatura) e nas variáveis de resposta da estrutura (deslocamentos, rotações e flechas) desenvolveu-se o modelo de regressão linear, (ii) fez-se a previsão de todo o conjunto de dados através do modelo de regressão calculado, (iii) calcularam-se os resíduos e foi feita a normalização dos mesmos, por fim, (iv) de posse dos resíduos normalizados foi desenvolvido o gráfico de controle T^2 (Amorim, 2017).

O resultado da regressão linear múltipla para o deslocamento no pilar P26 é apresentado na Tabela 4.1, enquanto o resultado completo extraído pelo programa para cada um dos 12 sensores encontra-se exposto no Anexo A.

Tabela 4.1 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 26.

Variáveis independentes	Intersecção	x1	x2	x3	x4
Valores calculados	0.047231	6.0641	-0.43188	2.1	2.3758

A Tabela 4.2 resume o valor do coeficiente R^2 ajustado para cada uma das regressões realizadas. Nota-se que entre os valores encontrados para o R^2 ajustado de cada uma das doze regressões realizadas dois deles não se mostraram satisfatórios, os quais correspondem à medição de inclinação dos pilares e são destacados em vermelho.

Tabela 4.2 - Valor de R^2 ajustado de cada uma das regressões lineares

Sensor	R^2	Sensor	R^2
DA-P26	0.998	ST-P26	0.00471
DA-P29	0.999	ST-P29	0.00268
DA-P32	0.999	DV-T26	0.942
DA-P35	0.999	DV-T28	0.942
DA-P38	0.999	DV-T30	0.939
DA-E02	0.999	DV-T32	0.935

No modelo proposto, a inclinação dos pilares durante a fase saudável da estrutura (fase de calibração do modelo) resulta unicamente da dilatação térmica do betão causada pela variação de temperatura diferencial. Isso nos leva a resultados de inclinação muito pequenos uma vez que a variação diferencial

de temperatura também é pequena. A dimensão do ruído para estes sensores é de ± 0.5 graus enquanto os valores da inclinação são em torno de dez vezes menores. Logo, acredita-se que estes resultados se mostraram insatisfatórios devido ao fato de que a regressão linear não ter sido capaz de identificar os ruídos inseridos.

Isto posto, na realização da análise de resíduos normalizados através do gráfico de controle multivariado de Hotelling empregou-se apenas as 10 variáveis que apresentaram um valor de R^2 satisfatório.

É esperado que o resultado do gráfico se mostre dentro do limite superior para os primeiros 337 dias, correspondentes ao período de calibração e fase sem danos. Para os demais dias, é expectado que apresente valores fora do limite superior, mostrando assim uma alteração do comportamento dos dados, que no caso deste estudo, representa o comportamento diferenciado da estrutura. No seguinte conjunto de figuras (ver Figura 4.1 a 4.16), são apresentados os gráficos de controle para cada um dos casos de dano analisados (consultar Tabela 3.8).

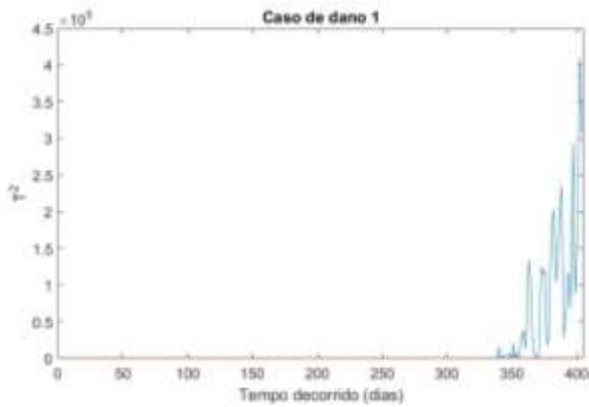


Figura 4.1 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

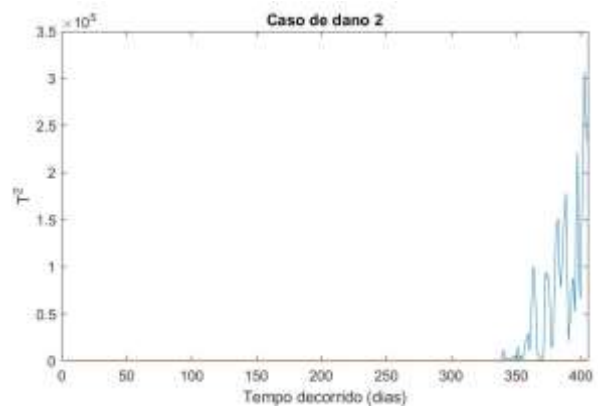


Figura 4.2 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 2.

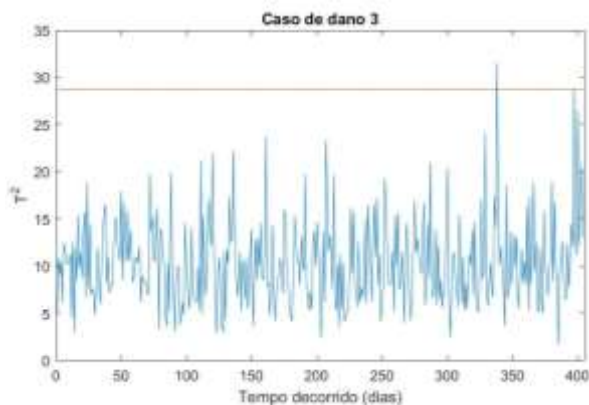


Figura 4.3 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 3.

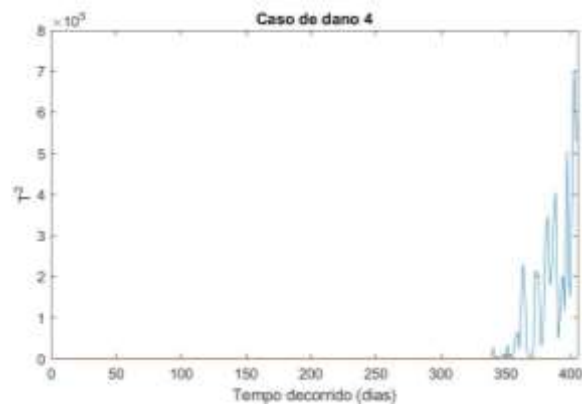


Figura 4.4 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 4.

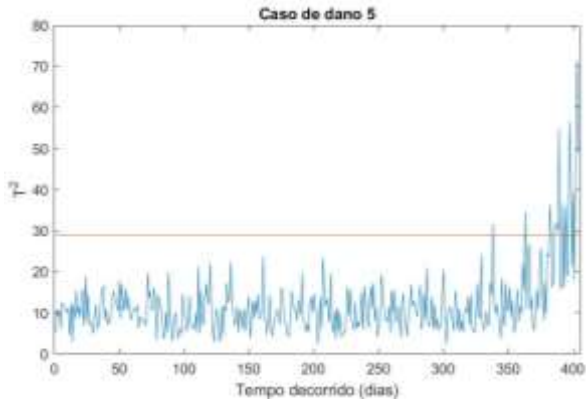


Figura 4.5 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 5.

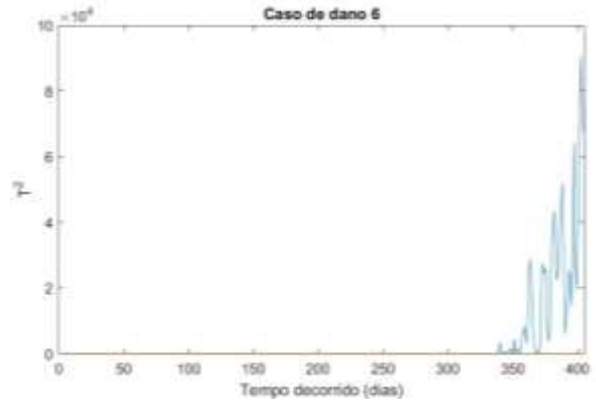


Figura 4.6 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 6.

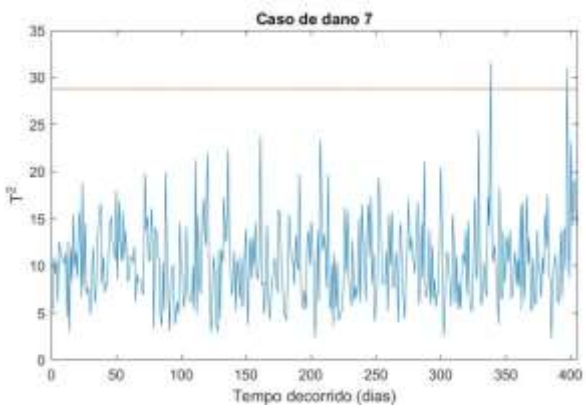


Figura 4.7 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 7.

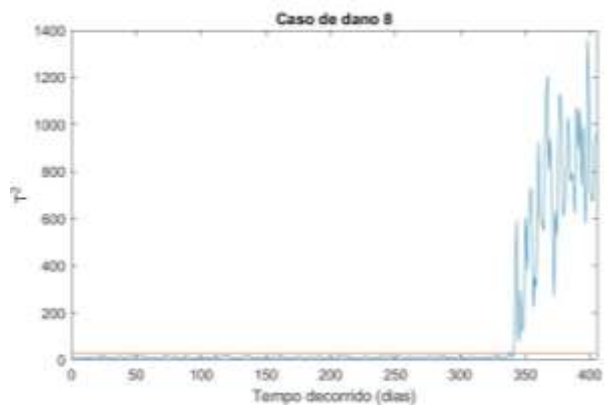


Figura 4.8 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 8.

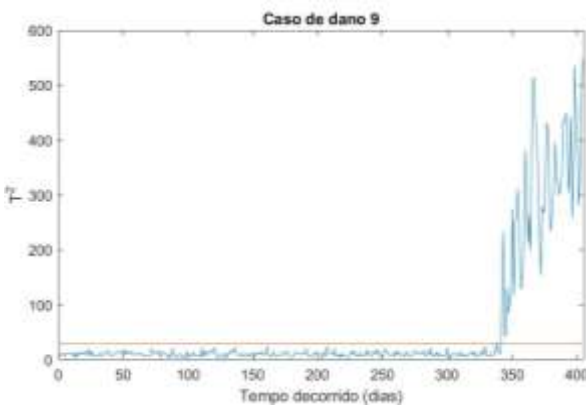


Figura 4.9 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 9.

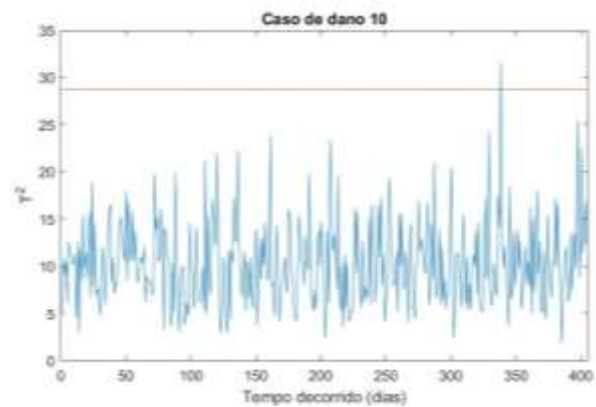


Figura 4.10 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 10.

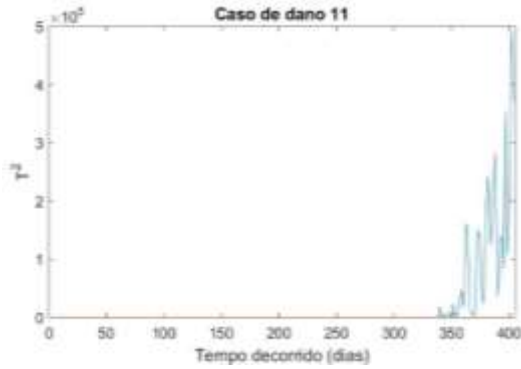


Figura 4.11 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 11.

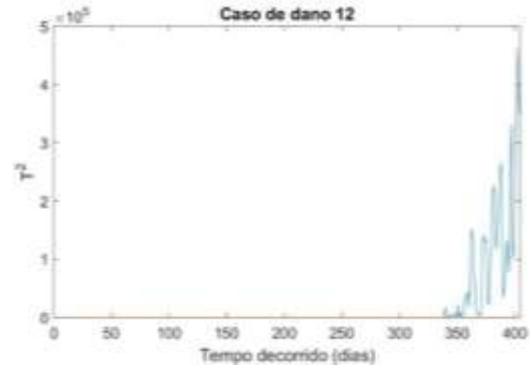


Figura 4.12 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 12.

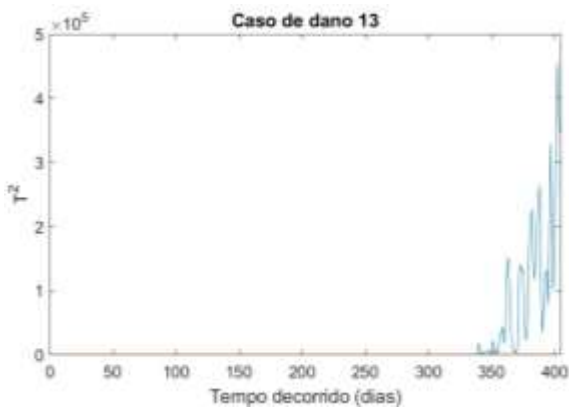


Figura 4.13 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 13.

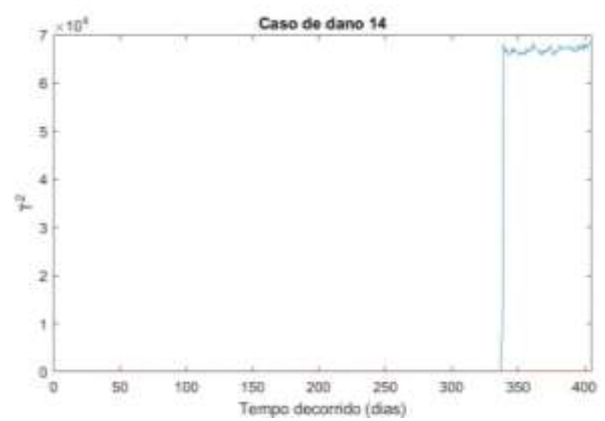


Figura 4.14 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 14.

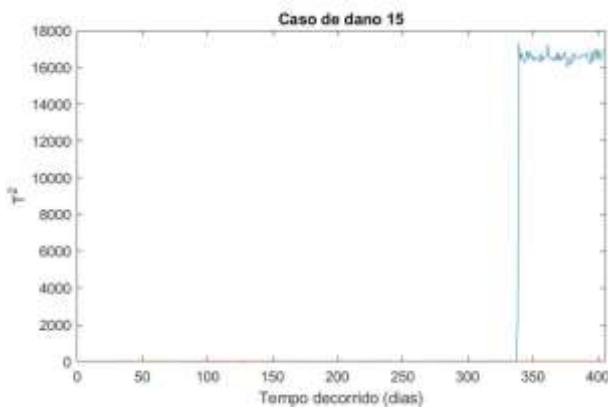


Figura 4.15 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 15.

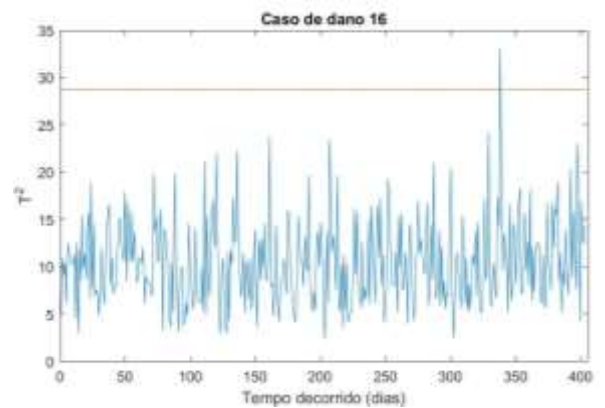


Figura 4.16 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 16.

Dos 403 dias de medição dos dados, considerou-se apenas 395 dias, uma vez que 8 deles mostraram dados incompletos e foram excluídos para o cálculo de T^2 . Assim, o limite superior de controle foi calculado conforme a fórmula apresentada em 2.5, considerando 395 conjuntos com 24 dados cada para 10 as variáveis em controle ($m = 395$, $n = 24$ e $p = 10$). O LSC resultou no valor de 28.77331 e foi representado por uma linha horizontal em vermelho nos gráficos apresentados.

Destaca-se que o valor de T^2 , para alguns casos de danos, apresentou valores tão superiores aos valores correspondentes à estrutura saudável que a linha do limite superior de controle se mostra imperceptível na escala apresentada.

Evidencia-se que os danos localizados próximos dos sensores (danos 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14 e 15) foram facilmente identificados pelo gráfico de controle, através dos *outliers* sequenciais que surgiram, o que retrata a efetividade do algoritmo de regressão linear múltipla para tratamento dos dados e identificação de danos nestes casos. Entretanto, os gráficos correspondentes aos casos mais afastados (danos 3, 7, 10 e 16) não apresentaram a alteração esperada (com exceção ao caso de dano 13). Contudo, eles mostram *outliers* no dia inicial de inserção dos danos.

Os *outliers* são consideradas observações atípicas, dentro de um conjunto de dados, e apresentam um grande afastamento das demais observações, tornando-se inconsistente com o restante do agrupamentos (Júnior, 2013). Destaca-se que no processo multivariado, um outlier representa uma observação com diversas variações que não são necessariamente anormais quando analisadas separadamente mas são incomuns quando interpretadas em conjunto (Raykov & Marcoulides, 2009). Estas variações podem corresponder a causas naturais provindas de pequenas perturbações admissíveis, mas também podem ser devidas a um problema ou operação anormal do processo e devem ser estudadas. Os *outliers* podem ser benéficos uma vez que podem indicar algumas características do agrupamento os quais não seriam perceptíveis durante a análise, ou seja, podem estar de fato mostrando um problema, mas por outro lado podem se mostrar problemáticos quando não representam o conjunto de dados e acabam por comprometer os testes realizados (Júnior, 2013).

Aponta-se que no caso estudado sabe-se que se tratam de *outliers* benéficos pois estão representando uma característica que não está sendo retratada nos demais dados como é expectável. Ou seja, podemos dizer que eles estão avisando que algo está suspeito no processo. Porém, durante o funcionamento normal da estrutura, não -se pode concluir que todos os *outliers* separadamente representem algum dano, e sim deve ser realizado um estudo mais aprofundado. Neste trabalho não será desenvolvido o estudo dos *outliers* isolados.

Com base nos resultados analisados, constata-se que a regressão linear múltipla para o sistema de monitorização instalado é um método ineficaz de detecção para danos afastados dos sensores.

Ainda, para o método da regressão linear múltipla, simulou-se uma redistribuição dos sensores de monitorização com o intuito de verificar o efeito da diminuição da distância entre os sensores e os danos mais afastados. Alteraram-se então os sensores de deslocamento dos pilares P32 e P35 para os pilares P11 e P13, e os sensores de pressão para a medição das flechas dos tramos T26 e T28 para os tramos T09 e T11. Desta forma, foi gerado um novo conjunto de dados e repetido todo o processo. Os resultados para as regressões lineares e para os gráficos de controle são apresentados nos Anexos B e C.

É verificado que a realocação dos sensores não teve grande influência nos resultados com relação aos anteriores. Nota-se assim que a alteração da resposta da estrutura frente aos danos mais afastados não foi captada pelo método da RLM.

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

Na aplicação da análise de componentes principais utilizou-se como dados de entrada as variáveis correspondentes à resposta da estrutura. Inicialmente foi verificada a correlação entre essas as variáveis, uma vez que para a aplicação da ACP esta correlação deve ser forte. Os dados foram normalizados conforme o período de calibração e então foi aplicado o método. A resposta calculada através do ACP foi renormalizada para realização do cálculo dos resíduos, com estes resíduos gerou-se então o gráfico de controle T^2 (Amorim, 2017).

As variáveis de resposta foram numeradas de 1 a 12, onde as seis primeiras correspondem aos deslocamentos provenientes dos LVDT's, as variáveis 7 e 8 às rotações dos pilares, e as últimas quatro são as flechas. Na Figura 4.17 pode-se notar a fraca correlação entre as variáveis de rotação com as demais, onde apresentaram um máximo de 40% de correlação, portanto na aplicação do método da ACP foram excluídas estas variáveis.

Var.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.8549	0.8504	0.848	0.8455	0.8436	-1.97E-03	0.0988	-0.73	-0.6726	-0.6224	-0.622
2	0.8549	1	0.9722	0.9742	0.9754	0.9755	0.3088	0.1119	-0.6309	-0.7551	-0.7707	-0.7694
3	0.8504	0.9722	1	0.9774	0.9789	0.9798	0.3219	0.1156	-0.6385	-0.7676	-0.7846	-0.7834
4	0.848	0.9742	0.9774	1	0.9816	0.9824	0.3301	0.1198	-0.6446	-0.7777	-0.7956	-0.7946
5	0.8455	0.9754	0.9789	0.9816	1	0.9842	0.3366	0.1211	-0.6436	-0.7796	-0.7988	-0.7977
6	0.8436	0.9755	0.9798	0.9824	0.9842	1	0.3415	0.1252	-0.6573	-0.7941	-0.813	-0.812
7	-1.97E-03	0.3088	0.3219	0.3301	0.3366	0.3415	1	0.0639	-0.0636	-0.3216	-0.4078	-0.4065
8	0.0988	0.1119	0.1156	0.1198	0.1211	0.1252	0.0639	1	-0.2115	-0.2224	-0.2183	-0.2193
9	-0.73	-0.6309	-0.6385	-0.6446	-0.6436	-0.6573	-0.0636	-0.2115	1	0.912	0.8471	0.8477
10	-0.6726	-0.7551	-0.7676	-0.7777	-0.7796	-0.7941	-0.3216	-0.2224	0.912	1	0.9787	0.9788
11	-0.6224	-0.7707	-0.7846	-0.7956	-0.7988	-0.813	-0.4078	-0.2183	0.8471	0.9789	1	0.9894
12	-0.622	-0.7694	-0.7834	-0.7946	-0.7977	-0.812	-0.4065	-0.2193	0.8477	0.9788	0.9894	1

Figura 4.17 - Correlação entre as 12 variáveis - Caso 1.

A partir das dez variáveis consideradas, aplicou-se as componentes principais. A Figura 4.18 apresenta o resultado da ACP para a variância explicada por cada uma das componentes principais no caso de dano 1. Nota-se que as duas primeiras componentes explicam mais de 90% da variância total dos dados. Os demais casos de danos apresentaram a mesma proporção de informação para as duas componentes iniciais.

CP	Variância explicada
1	84.7737
2	10.1640
3	3.7703
4	0.2790
5	0.2424
6	0.2105
7	0.1807
8	0.1515
9	0.1155
10	0.1124

Figura 4.18 - Variância explicada nos CPs - Caso1.

Destaca-se que foram analisadas todas as componentes principais para cada um dos casos de dano de forma a verificar qual o menor número de componentes a ser utilizado em uma boa identificação no gráfico de controle. As figuras 4.19 a 4.22 ilustram os resultados do estudo das quatro primeiras componentes principais, para o caso de dano 1.

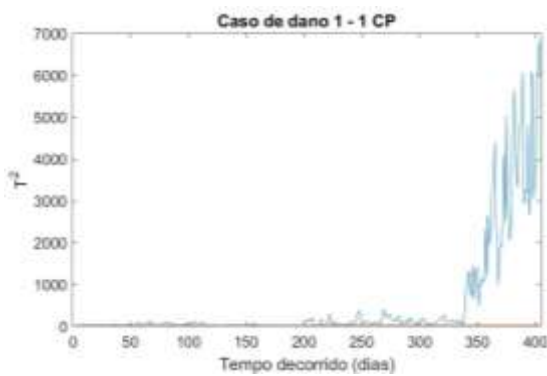


Figura 4.19 – PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

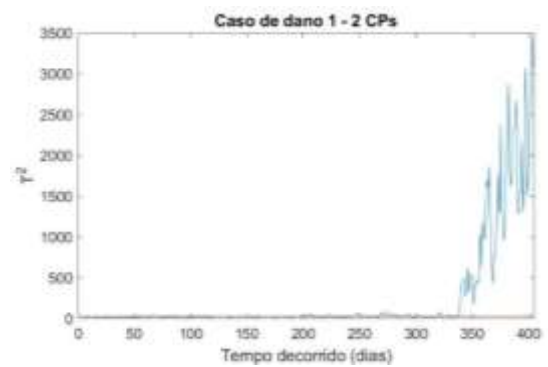


Figura 4.20 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

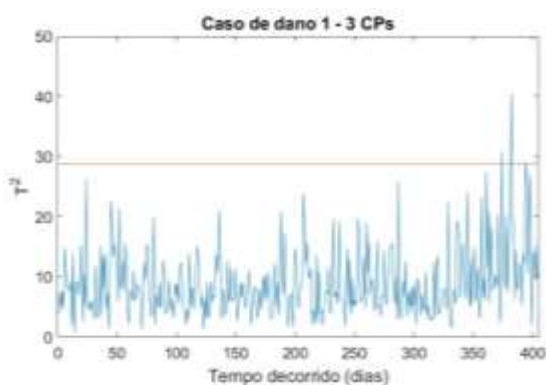


Figura 4.21 - PCA - 3 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

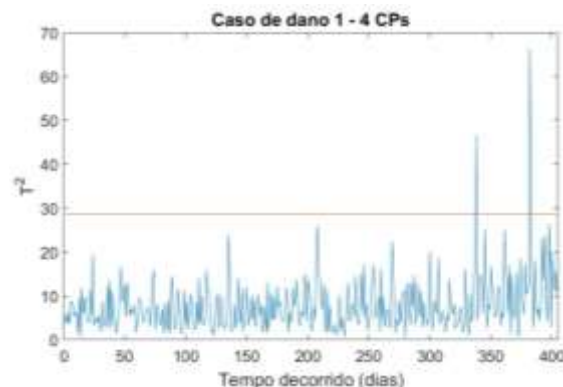


Figura 4.22 - PCA - 4 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.

Nota-se que para este caso de dano, o que também se estendeu para todos os demais casos, a variância das informações contida nas duas primeiras componentes principais são as que buscamos. É nestas componentes que se encontram a maior parte das informações da resposta da estrutura, o que também se pode perceber que corresponde em torno de 90% a 95% da variância dos dados. A contar da terceira componente principal podemos notar que o dano já não é percebido. Isto posto, leva a concluir que a partir de 95% de variância, já começam a ser incluídos grande parcela dos ruídos, o quais possuem a maioria de suas informações contidas dentro dos últimos 5% e que dificultam na identificação do dano através deste método.

O resultado da ACP, correspondente às duas primeiras componentes principais de todos os casos de danos, é apresentada no Anexo D. Não foram apresentadas todas as componentes principais de cada caso devido ao grande volume de dados. Analisados os resultados, concluiu-se que todos eles apresentaram comportamento semelhante, tendo-se optado por apresentar apenas as duas primeiras componentes de cada um, pois nelas estão contidos os resultados procurados.

Analisando no Anexo D cada um dos casos de danos, pode-se notar que a ACP, assim como a RLM, foi capaz de detetar os danos próximos aos sensores. Porém ela não foi tão efetiva nesta detecção, uma vez que apresentou muitos pontos fora do controle para os dias em que a estrutura se encontrava saudável. Isso que faz com que os resultados apresentados gerem dúvidas com relação a estes pontos e tornem o método inconfiável para utilização neste sistema de monitorização.

Ainda, é interessante destacar que o caso de dano 3, o qual não era identificado pelo método RLM, foi perceptível utilizando a ACP, porém os demais danos afastados dos sensores não foram identificados.

A diferença entre o caso de dano 3 para os demais casos de danos afastados (danos que foram inseridos longe dos sensores de monitorização) é o fato de que este considera uma alteração na condição de apoio da estrutura e não nas características mecânicas dos elementos estruturais. Uma alteração na condição

de apoio implica diretamente no resultado de deslocamento, enquanto a alteração da rigidez, por exemplo, pode não ter alteração efetiva nos deslocamentos da estrutura devido a capacidade de redistribuição de esforços que esta possui. Assim, a perda de rigidez de um elemento pode ser compensada por outro sem os deslocamentos da estrutura sofrerem grandes alterações. Acredita-se que foi por este motivo que os demais casos de danos afastados não foram identificados por este método de detecção.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RLM E ACP

Na busca de um refinamento dos dados aplicou-se a junção dos dois métodos anteriores. De posse das variáveis preditoras e de resposta do período de calibração, foi aplicada a regressão linear múltipla para encontrar a equação de previsão para cada uma das variáveis. Calculou-se em seguida a previsão de todo o conjunto de dados e aplicou-se o método ACP nos resíduos normalizados. Os resíduos gerados pela ACP foram aplicados no gráfico de controle multivariado para então diagnosticar se houve ou não a identificação do dano inserido (Amorim, 2017). Utilizando estes dois métodos espera-se que as componentes principais sejam capazes de remover os fatores não explicados pela regressão linear.

De modo semelhante ao modelo de RLM, as duas variáveis de rotação foram excluídas do estudo pois apresentaram um valor de R^2 insignificante.

O Anexo E apresenta o resultado da aplicação das técnicas RLM e ACP, que para o caso de dano 1 podem ser observadas nas Figura 4.23 e Figura 4.24. Foram mostradas apenas as duas componentes principais por estas serem as mais relevantes e apresentarem uma variância explicada de aproximadamente 95%, semelhante ao uso do ACP sozinho.

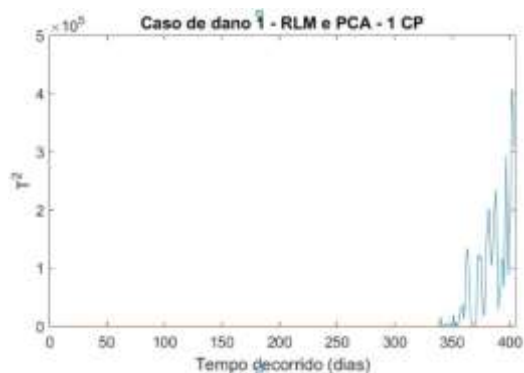


Figura 4.23 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

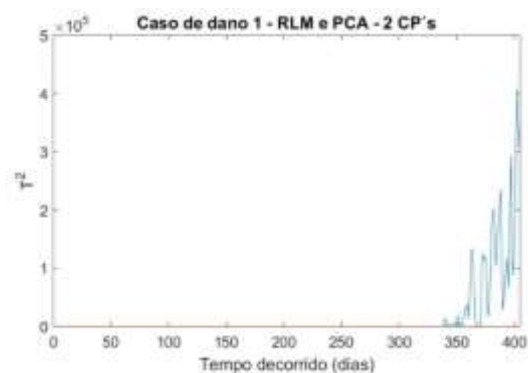


Figura 4.24 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

Analisando os resultados através dos gráficos de controle, observa-se que foram semelhantes ao método da RLM, o que nos faz concluir que a conjugação dos métodos também não foi capaz de identificar as alterações ocorridas nos sensores mais distantes do dano.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Tão importante quanto monitorizar uma estrutura é relacionar o resultado proveniente desta monitorização com as técnicas de deteção de danos. Através destas técnicas é que se faz possível o tratamento e análise dos dados coletados a fim de identificar situações em que o comportamento estrutural não está dentro da normalidade.

Ao decorrer deste trabalho explicou-se de forma sucinta as duas formas de resposta estrutural: estática e dinâmica, e então concentrou-se o estudo nos métodos de deteção de danos baseados na resposta estática da estrutura. Como objeto de estudo, buscou-se a aplicação de alguns dos métodos mostrados para o caso da Ponte de Lanheses, a qual possui um sistema de monitorização permanente instalado.

Uma vez que os dados obtidos com a monitorização da Ponte de Lanheses estavam incompletos para aplicação dos métodos de identificação de danos, foram gerados novos conjuntos de dados baseados nos que estavam disponíveis. Além disso, criou-se um modelo numérico da ponte para que neste fossem simulados danos a serem detectados pelos algoritmos criados.

As metodologias identificadoras de danos escolhidas para este trabalho foram a regressão linear múltipla e a análise das componentes principais, também foi realizada uma junção destes dois buscando melhores resultados. O gráfico de controlo multivariado de hotelling (T^2) foi aplicado para cada um dos resultados destes métodos buscando o controlo das variáveis em conjunto.

A regressão linear múltipla se mostrou eficiente na identificação de danos próximos aos sensores de monitorização, porém foi ineficaz para danos afastados dos sensores. Foi realizado um estudo alterando a posição dos sensores de forma a minimizar a distância entre estes e os danos mais afastados, mas o mesmo apresentou resultados similares aos do posicionamento original.

A análise das componentes principais não apresentou resultados satisfatórios. Mesmo sendo efetiva para alguns casos, mostrou muitos *outliers* tanto no período sem danos quanto com danos o que tornou os resultados não confiáveis e duvidosos com relação a presença de danos.

A junção das duas técnicas: feita através da utilização da regressão linear múltipla e método das componentes principais aplicada na análise de resíduos mostrou resultados não distintos aos encontrados através da utilização da RLM sozinha.

A Tabela 5.1 mostra um resumo de todos os métodos utilizados e sua efetividade em detetar o dano em cada um dos casos. Se destacam a verde quando se conseguiu detectar o dano sem dúvidas, a amarelo quando tal deteção suscitou algumas dúvidas e a vermelho quando não foi possível a identificação do dano.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultado dos métodos de deteção de danos aplicados

Caso de Dano	Método de deteção utilizado			
	RLM	RLM (realocação de sensores)	ACP	RLM e ACP
1	sim	sim	Não confiável	sim
2	sim	sim	Não confiável	sim
3	não	não	sim	não
4	sim	sim	Não confiável	sim
5	Não confiável	Não confiável	sim	Não confiável
6	sim	sim	não	sim
7	não	não	não	não
8	sim	sim	Não confiável	sim
9	sim	não	Não confiável	sim
10	não	não	não	não
11	sim	sim	sim	sim
12	sim	sim	não	sim
13	sim	sim	não	sim
14	sim	sim	Não confiável	sim
15	sim	sim	Não confiável	sim
16	não	não	não	não

Pode-se notar que o método ACP, por ser mais sensível, conseguiu realizar a identificação dos casos de danos 3 e 5, os quais não foram possíveis através dos outros métodos. Porém, justamente por ter essa sensibilidade elevada, este não foi efetivo para os outros casos de danos, uma vez que apresentou gráficos inconsistentes, com diversos *outliers* no período saudável da estrutura.

De um modo geral, todos os três algoritmos criados conseguiram realizar a deteção de alguns dos casos de danos. Porém, nota-se que a combinação do sistema de monitorização instalado com os métodos de

deteção utilizados não foram completamente eficientes para identificar os danos que causam a redistribuição de esforços ao longo da estrutura. Pode-se estimar que ao alcance do ponto de leitura do sensor o efeito destes danos tenham sido dissipados pelos demais elementos estruturais, como é o caso onde foi diminuída a rigidez dos elementos. Nestes casos, quando o dano está muito afastado do sensor pode-se sugerir que a estrutura consiga absorver os efeitos causados pelo dano, que quando da posição do sensor não são sentidos de forma significativa.

Considerando a posição atual dos sensores e o fato de que a ponte é bastante extensa, com quase um quilômetro e meio, os equipamentos de monitoração podem se encontrar afastados quase um km dos elementos onde ocorrem algum tipo de falha. Essa distância pode ocasionar a redistribuição de esforços e dissipação da resposta da estrutura, e então fazer com que não sejam sentidos as diferenças dos deslocamentos nos pontos monitorados. Todavia, podemos notar que os danos que causam interferência imediata nos deslocamentos foram identificados, como é o caso dos danos em que é feito o travamento total ou parcial dos aparelhos de apoio.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

É sugerido para desenvolvimento de trabalhos futuros explorar outros métodos estatísticos de deteção de danos baseados na resposta estática da estrutura. De entre outros, pode-se aplicar o método autorregressivo apresentado neste trabalho e realizar uma comparação dos resultados obtidos neste método com os aqui apresentados.

Visto que neste trabalho foram exploradas as técnicas de deteção de danos baseadas em análise estatística de dados de monitorização estrutural, é sugerido também o estudo e investigação das técnicas baseadas em modelo numérico para o caso de estudo da Ponte de Lanheses. Para tal deverá ser considerada uma nova coleta de dados completa envolvendo os deslocamentos e temperaturas do pilares e tabuleiro para realizar a calibração do modelo numérico. O resultado satisfatório desta calibração traduz a confiança de que o modelo representa de forma relevante a ponte real. Isto posto, novos dados de monitorização deverão ser adquiridos para o estudo da saúde e integridade da estrutura, que se dará a partir da comparação e atualização do modelo numérico calibrado com os novos dados coletados.

Também é sugerido explorar as técnicas de deteção de danos a partir da resposta dinâmica da estrutura. Pode-se buscar em trabalhos futuros a simulação de uma monitorização dinâmica na estrutura da Ponte de Lanheses utilizando o modelo numérico. Com esta simulação seria interessante avaliar se a implementação de uma monitorização dinâmica seria eficiente na identificação de danos próximos e afastados dos sensores a fim de comparar a aplicação deste método com o método estático apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, V. N. (Universidade F. de O. P. (2016). Técnicas de anormalidade aplicadas à detecção de danos estruturais.
- Amorim, O.; Pimentel, M.; Figueiras, J.; Rodrigues, C. Avaliação de metodologias para deteção de alterações no comportamento estrutural com base na resposta da estrutura sob ações ambientais. Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2017
- Araújo, W. O., & Coelho, C. J. (2009). *Análise de Componentes Principais (PCA)*. [https://doi.org/RT - MSTMA_003-09](https://doi.org/RT-MSTMA_003-09)
- Balageas, D. (2010). Introduction to Structural Health Monitoring, (January 2006), 17.
- Carvalho, C. L. de (Redes neurais artificiais-U. (2006). Redes Neurais Artificiais - Inteligência Artificial.
- Chen, J., & Liu, J. (1999). Mixture principal component analysis models for process monitoring. *Ind Eng Chem.*
- COBA (2005) - EN 305 – Ponte de Lanheses sobre o Rio Lima. Reabilitação e reforço estrutural. Projecto de execução.
- Costa, J. B. S. (Soares da C. (2005). EN 305 - Ponte de Lanheses sobre o rio Lima - Reabilitação e reforço estrutural. Execução da obra métodos e soluções. Soares da Costa.
- Faria, R. de, Félix, C., & Figueiras, J. (2011). Sistema de monitorização estrutural da Ponte de Lanheses sobre o Rio Lima - EN305. FEUP - LABEST / NewMENSUS.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>
- Fatemi, A. A., & Tabrizian, Z. (n.d.). Non-destructive static damage detection of structures using Genetic Algorithm.
- Félix, Carlos et. all (2015). GNSS and accelerometers data fusion in large structures monitoring. PTDC/ECM-EST/2131/2012, FCOMP-01-0124-FEDER-028861. Technical report. Porto: FEUP - LABEST.

- Gomes, H. M., & Santos, N. R. (2006). Algoritmos genéticos para detecção de dano estrutural, (1), 7–21.
- Goulart, D. A., Tacla, M. A., Marback, P. M. F., Solé, D., Paranhos, A., Perez, H. B., ... Sato, E. H. (2006). Redes neurais artificiais aplicadas no estudo de questionário de varredura para conjuntivite alérgica em escolares. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 69(5), 707–713.
<https://doi.org/10.1590/S0004-27492006000500017>
- Grosso, A. Del. (n.d.). Monitoring of Bridges with Static Strain and Displacement Data. *Ewshm2012.Com*, 1–8. Retrieved from <http://www.ewshm2012.com/Portals/98/BB/tu2b2.pdf>
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2011). *Econometria básica*. Porto Alegre: AMGH.
- Henriques, C. (2011). ~ Linear Simples e M ultipla An alise de Regress ao ´ Introduc , ao, 1–44.
- Júnior, J. A. (2013). Detecção de outliers como Suporte para Controle Estatístico do Processo Multivariado. *Dissertação*.
- Leal, U. (2001). Tecnologia, recuperação por baixo. *Revista Técnica, Edição 57*.
- Lopes, P. da S. (Universidade F. de I. (2007). Detecção de danos em estruturas por meio de técnicas de redes neurais artificiais e algoritmos genéticos.
- Lowry, C. A., & Montgomery, D. C. (1995). A review of multivariate control charts. *IIE Transactions*.
- Machado, R. N., & Sartorti, A. L. (2010). Pontes : Patologias dos Aparelhos de Apoio. *VI Congreso Internacional Sobre Patología Y Recuperación de Estructuras*.
- Maia, R. A. (UnB-U. de B., & Doz, G. N. (UnB-U. de B. (2016). Detecção de dano estrutural em pórticos planos utilizando redes neurais artificiais. *XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*.
- Mason, R. L., & Young, J. C. (2002). *Multivariate statistical process control with industrial applications*. Philadelphia: SIAM.
- Neves, S., Santo, S., & Félix, C. (2015). Monitorização e análise do comportamento estrutural da Ponte de Lanheses. PTDC/ECM-EST/2131/2012, FCOMP-01-0124-FEDER-028861. Relatório Técnico. Porto: FEUP - LABEST.
- Olson, L. D. (2005). Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring. *Office of Infrastructure Research and Development*, (September), 216. Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/geotechnical/03089/chapt7.cfm>
- Pereira, J. L. M. (Engesur), Miranda, M. L. (Engesur), Faintstein, A. (Engesur), & Carvalho, C. L. (Engesur). (2010). Manual de recuperação de pontes e viadutos rodoviários. *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, 159. Retrieved from <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e>

- manuais/manuais/documentos/744_manual_recuperacao_pontes_viadutos.pdf
- Pinho, J. (COBA). (2010). EN 305 - Ponte de Lanheses sobre o Rio Lima - Reabilitação e reforço estrutural. Lisboa: Consultores de engenharia e ambiente, COBA.
- Posenato, D. (2009). Model-free data interpretation for continuous monitoring of complex structures, *4481*, 1–153. Retrieved from http://ac.els-cdn.com/S1474034607000183/1-s2.0-S1474034607000183-main.pdf?_tid=2aad360c-8909-11e3-b7cf-00000aab0f01&acdnat=1391016001_44f93a26806911a995d9125d5016b7ae
- Pozo, A., Cavalheiro, A. D. F., Ishilda, C., Spinosa, E., & Rodrigues, E. M. (2011). Computação Evolutiva. *Departamento de Informática, UFP*, 61. Retrieved from <http://www.inf.ufpr.br/aurora/tutoriais/Ceapostila.pdf>
- Ranalli, M. (PennState). (2017). Autoregressive Models. The Pennsylvania State University, Departamento de estatística.
- Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice* (Fourth). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Raykov, T., & Marcoulides, G. A. (2009). *An introduction to applied multivariate analysis*. (S. Puntanen, Ed.). https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2009.00074_18.x
- Ribeiro, E. M. S. (Universidade de S. P. D. de administração). (2016). ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS, ANÁLISE FATORIAL: Exemplos em STATA., (8), 1–9.
- Rodrigues, C. F. G. (2011). Em Soluções De Fibra Óptica. *Dissertação Para Obtenção Do Grau de Doutor*.
- Rodrigues, C.; Figueiras, H.; Félix, C.; Figueiras, J.; "SHMmensur: Monitorização da Integridade Estrutural via Aplicação Web"; CBC2015, 57º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON); 2015.
- Rytter, A. (1993). *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Fracture and Dynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.06.047>
- Sassi, C. P., Perez, F. G., Myazato, L., Ye, X., & Francisco, P. H. F. (n.d.). MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA UTILIZANDO OS SOFTWARES R E STATISTICA : UMA APLICAÇÃO A DADOS DE CONSERVAÇÃO DE FRUTAS Resumo, 1–20.
- Silva, R. Y. R. C. (2015). Monitoramento E Identificação Numérico E Experimental De Danos Em Vigas E Pontes De Aço E Concreto Utilizando Transformadas De Wavelet, 237.
- Souza, A. M. (2000). Monitorização e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Tafner, M. A. (Universidade E. de C. N. de informática B. (1998). Redes neurais artificiais: aprendizado e

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

plasticidade.

Tavares, P. S. (Universidade F. de S. C. (2003). O GRÁFICO DE CONTROLE MULTIVARIADO T2 DE HOTELLING COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE DA QUALIDADE NUMA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO.

Vicini, L., & Mendonça Souza, A. (2005). Análise multivariada da teoria à prática. *Monografia*, 215.
<https://doi.org/10.5700/rege373>

Vitola, J., Vejar, M. A., & Vejar, A. (n.d.). World's largest Science , Technology & Medicine Open Access book publisher Data-Driven Methodologies for Structural Damage Methodologies Based Learning Applications Detection Based on Machine Learning Applications.

Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H., & Yao, Z. H. (2001). Structural damage identification using static test data and changes in frequencies. *Engineering Structures*, 23(6), 610–621.
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00086-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00086-9)

ANEXO A – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Neste anexo são apresentados os resultados da regressão linear múltipla para cada uma das 12 variáveis envolvidas, sendo elas: os seis deslocamentos relativos entre o tabuleiro e os pilares P26, P29, P32, P35, P38 e encontro E02, os valores das duas rotações dos pilares P26 e P29 e a flechas dos tramos T26, T28, T30 e T32. Salienta-se que a variável x_1 , x_2 , x_3 e x_4 correspondem as temperaturas uniforme e diferencial do tabuleiro e uniforme e diferencial dos pilares, respectivamente.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.047231	0.030779	1.5345	0.12495
x1	6.0641	0.14628	41.455	0
x2	-0.43188	0.050559	-8.5422	1.6234e-17
x3	2.1	0.18459	11.377	1.0431e-29
x4	2.3758	0.22511	10.554	7.8744e-26

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495
 Root Mean Squared Error: 1.51
 R-squared: 0.998, Adjusted R-Squared 0.998
 F-statistic vs. constant model: 1.07e+06, p-value = 0

A.1 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 26.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tstat	pValue
(Intercept)	0.030904	0.030473	1.0141	0.31055
x1	6.8224	0.14483	47.107	0
x2	-0.51068	0.050057	-10.202	2.9559e-24
x3	2.2855	0.18275	12.506	1.7758e-35
x4	2.5522	0.22287	11.451	4.4901e-30

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495
 Root Mean Squared Error: 1.5
 R-squared: 0.999, Adjusted R-Squared 0.999
 F-statistic vs. constant model: 1.37e+06, p-value = 0

A.2 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 29.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.027787	0.031156	0.89185	0.37251
x1	7.8228	0.14807	52.831	0
x2	-0.46737	0.051179	-9.132	8.8225e-20
x3	2.1522	0.18685	11.518	2.0993e-30
x4	2.4248	0.22787	10.641	3.154e-26

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.53

R-squared: 0.999, Adjusted R-Squared 0.999

F-statistic vs. constant model: 1.6e+06, p-value = 0

A.3 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 32.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.043336	0.031282	-1.3853	0.166
x1	8.2192	0.14867	55.284	0
x2	-0.65465	0.051386	-12.74	9.7568e-37
x3	2.7976	0.18761	14.912	1.8007e-49
x4	3.1621	0.22879	13.821	7.6758e-43

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.54

R-squared: 0.999, Adjusted R-Squared 0.999

F-statistic vs. constant model: 1.9e+06, p-value = 0

A.4 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 35.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.024245	0.031452	-0.77085	0.44082
x1	9.376	0.14948	62.724	0
x2	-0.49431	0.051665	-9.5675	1.5181e-21
x3	2.455	0.18863	13.015	3.0089e-38
x4	2.8467	0.23004	12.375	8.7655e-35

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.55

R-squared: 0.999, Adjusted R-Squared 0.999

F-statistic vs. constant model: 2.22e+06, p-value = 0

A. 5 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 38.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.030502	0.031779	-0.95982	0.33718
x1	9.47	0.15103	62.701	0
x2	-0.81965	0.052202	-15.701	1.4756e-54
x3	3.3882	0.19059	17.778	4.4585e-69
x4	4.0021	0.23243	17.219	5.2529e-65

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.56

R-squared: 0.999, Adjusted R-Squared 0.999

F-statistic vs. constant model: 2.51e+06, p-value = 0

A.6 - Regressão linear da variável de deslocamento do encontro móvel E02.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.001053	0.0011815	-0.89126	0.37282
x1	-0.0034735	0.0056152	-0.61859	0.53621
x2	-0.00034955	0.0019408	-0.1801	0.85708
x3	0.0043713	0.0070858	0.61691	0.53731
x4	0.010609	0.0086413	1.2277	0.21959

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0581

R-squared: 0.00533, Adjusted R-Squared 0.00471

F-statistic vs. constant model: 8.69, p-value = 5.38e-07

A.7 - Regressão linear da variável de rotação do pilar 26.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.00091738	0.0011687	0.78496	0.4325
x1	-0.0058126	0.0055543	-1.0465	0.29537
x2	-0.0012282	0.0019197	-0.63975	0.52236
x3	0.0073362	0.0070089	1.0467	0.29528
x4	0.012896	0.0085475	1.5088	0.1314

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0575

R-squared: 0.0033, Adjusted R-Squared 0.00268

F-statistic vs. constant model: 5.37, p-value = 0.000257

A.8 - Regressão linear da variável de rotação do pilar 29.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.00013532	0.0011764	0.11503	0.90843
x1	0.020151	0.0055911	3.604	0.00031565
x2	-0.090205	0.0019325	-46.679	0
x3	0.027283	0.0070554	3.867	0.00011127
x4	-0.024784	0.0086042	-2.8805	0.0039838

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0579

R-squared: 0.942, Adjusted R-Squared 0.942

F-statistic vs. constant model: 2.63e+04, p-value = 0

A.9 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 26.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.00096676	0.0011771	0.82131	0.4115
x1	0.020429	0.0055943	3.6517	0.00026257
x2	-0.090146	0.0019336	-46.622	0
x3	0.026965	0.0070594	3.8197	0.00013487
x4	-0.024628	0.008609	-2.8608	0.0042399

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0579

R-squared: 0.942, Adjusted R-Squared 0.942

F-statistic vs. constant model: 2.64e+04, p-value = 0

A.10 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 28.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.0018737	0.001178	1.5905	0.11177
x1	0.018187	0.0055988	3.2484	0.0011665
x2	-0.090171	0.0019351	-46.597	0
x3	0.027759	0.007065	3.9291	8.6134e-05
x4	-0.021298	0.0086159	-2.4719	0.013466

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0579

R-squared: 0.939, Adjusted R-Squared 0.939

F-statistic vs. constant model: 2.5e+04, p-value = 0

A.11 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 30.

Estimated Coefficients:

	<u>Estimate</u>	<u>SE</u>	<u>tStat</u>	<u>pValue</u>
(Intercept)	0.00025093	0.0011825	0.21221	0.83195
x1	0.017789	0.0056198	3.1654	0.0015561
x2	-0.09141	0.0019424	-47.061	0
x3	0.025934	0.0070915	3.6571	0.00025713
x4	-0.022438	0.0086482	-2.5945	0.0094946

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0581

R-squared: 0.935, Adjusted R-Squared 0.935

F-statistic vs. constant model: 2.35e+04, p-value = 0

A.12 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 32.

ANEXO B – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (REALOCAÇÃO DOS SENSORES)

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.61948	0.12285	-5.0424	4.7214e-07
x1	2.0352	0.21429	9.4978	2.9446e-21
x2	0.79441	0.13927	5.7041	1.2214e-08
x3	0.27371	0.048493	5.6442	1.7294e-08
x4	-1.1823	0.17596	-6.7192	1.9829e-11

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.47

R-squared: 0.774, Adjusted R-Squared 0.774

F-statistic vs. constant model: 5.56e+03, p-value = 0

B.1 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 11.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.89678	0.12073	-7.4281	1.2431e-13
x1	2.1535	0.21058	10.227	2.3062e-24
x2	1.0796	0.13686	7.8886	3.5613e-15
x3	0.32019	0.047654	6.719	1.9848e-11
x4	-1.545	0.17291	-8.9351	5.2211e-19

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.44

R-squared: 0.836, Adjusted R-Squared 0.836

F-statistic vs. constant model: 8.28e+03, p-value = 0

B.2 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 13.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-1.9702	0.12413	-15.872	1.0994e-55
x1	4.1235	0.21652	19.045	9.8385e-79
x2	2.3641	0.14072	16.8	4.903e-62
x3	0.68987	0.048998	14.08	2.2681e-44
x4	-3.1258	0.17779	-17.581	1.2406e-67

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.48

R-squared: 0.956, Adjusted R-Squared 0.956

F-statistic vs. constant model: 3.55e+04, p-value = 0

B.3 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 26.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-2.266	0.1246	-18.186	3.982e-72
x1	4.6178	0.21733	21.248	6.4187e-97
x2	2.5959	0.14125	18.378	1.3996e-73
x3	0.71282	0.049181	14.494	7.1026e-47
x4	-3.363	0.17845	-18.845	3.5735e-77

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.49

R-squared: 0.965, Adjusted R-Squared 0.965

F-statistic vs. constant model: 4.51e+04, p-value = 0

B.4 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 29.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-2.8836	0.12586	-22.912	8.6674e-112
x1	6.1734	0.21953	28.122	2.6821e-164
x2	3.4218	0.14268	23.983	7.324e-122
x3	1.0076	0.049679	20.282	9.9664e-89
x4	-4.3268	0.18026	-24.003	4.6943e-122

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.5

R-squared: 0.98, Adjusted R-Squared 0.98

F-statistic vs. constant model: 7.95e+04, p-value = 0

B.5 - Regressão linear da variável de deslocamento do pilar 38.

Estimated Coefficients:

	<u>Estimate</u>	<u>SE</u>	<u>tStat</u>	<u>pValue</u>
(Intercept)	-3.2455	0.12734	-25.487	1.2026e-136
x1	6.3367	0.22212	28.528	9.2935e-169
x2	3.7462	0.14436	25.95	2.3479e-141
x3	1.0689	0.050265	21.266	4.5362e-97
x4	-4.6264	0.18239	-25.366	1.9836e-135

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 1.52

R-squared: 0.982, Adjusted R-Squared 0.982

F-statistic vs. constant model: 9.03e+04, p-value = 0

B.6 - Regressão linear da variável de deslocamento do encontro E02.

Estimated Coefficients:

	<u>Estimate</u>	<u>SE</u>	<u>tStat</u>	<u>pValue</u>
(Intercept)	-0.002903	0.0048611	-0.59719	0.5504
x1	-0.0032446	0.0084789	-0.38266	0.70198
x2	0.0022731	0.0055107	0.41249	0.68
x3	0.0013363	0.0019188	0.69644	0.48618
x4	0.0020157	0.0069624	0.28951	0.7722

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0581

R-squared: 0.0678, Adjusted R-Squared 0.0673

F-statistic vs. constant model: 118, p-value = 1.78e-97

B.7 - Regressão linear da variável de rotação do pilar 26.

Estimated Coefficients:

	<u>Estimate</u>	<u>SE</u>	<u>tStat</u>	<u>pValue</u>
(Intercept)	0.0052786	0.0048082	1.0978	0.27232
x1	0.0075827	0.0083866	0.90414	0.36596
x2	-0.0050901	0.0054507	-0.93385	0.35042
x3	-0.00079507	0.0018979	-0.41892	0.67529
x4	0.010915	0.0068866	1.585	0.11302

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0575

R-squared: 0.0579, Adjusted R-Squared 0.0573

F-statistic vs. constant model: 99.8, p-value = 1.38e-82

B.8 - Regressão linear da variável de rotação do pilar 29.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.019401	0.0048611	-3.9911	6.6479e-05
x1	-0.031409	0.0084789	-3.7044	0.00021368
x2	-0.074037	0.0055107	-13.435	1.3053e-40
x3	0.050481	0.0019188	26.309	4.8285e-145
x4	-0.027503	0.0069624	-3.9503	7.8886e-05

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0581

R-squared: 0.987, Adjusted R-Squared 0.987

F-statistic vs. constant model: 1.25e+05, p-value = 0

B.9 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 09.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.012255	0.0048465	-2.5286	0.011476
x1	-0.021474	0.0084534	-2.5403	0.011098
x2	-0.079248	0.0054941	-14.424	1.8929e-46
x3	0.052352	0.001913	27.366	3.7695e-156
x4	-0.020964	0.0069414	-3.0202	0.0025363

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0579

R-squared: 0.987, Adjusted R-Squared 0.987

F-statistic vs. constant model: 1.26e+05, p-value = 0

B.10 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 11.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.024896	0.0048316	-5.1528	2.6421e-07
x1	-0.041167	0.0084275	-4.8848	1.06e-06
x2	-0.066687	0.0054773	-12.175	9.795e-34
x3	0.051919	0.0019072	27.223	1.2591e-154
x4	-0.036533	0.0069202	-5.2792	1.3394e-07

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495

Root Mean Squared Error: 0.0578

R-squared: 0.987, Adjusted R-Squared 0.987

F-statistic vs. constant model: 1.26e+05, p-value = 0

B.11 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 30.

```

Estimated Coefficients:

```

	<u>Estimate</u>	<u>SE</u>	<u>tStat</u>	<u>pValue</u>
(Intercept)	-0.0074198	0.0048444	-1.5316	0.12566
x1	-0.01117	0.0084498	-1.3219	0.18624
x2	-0.086027	0.0054918	-15.665	2.5773e-54
x3	0.048388	0.0019122	25.305	8.1018e-135
x4	-0.01244	0.0069385	-1.7928	0.073047

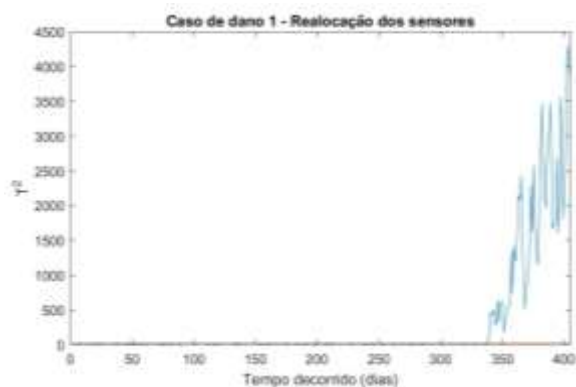
```

Number of observations: 6500, Error degrees of freedom: 6495
Root Mean Squared Error: 0.0579
R-squared: 0.987, Adjusted R-Squared 0.987
F-statistic vs. constant model: 1.26e+05, p-value = 0

```

B.12 - Regressão linear da variável correspondente a flecha do tramo 32.

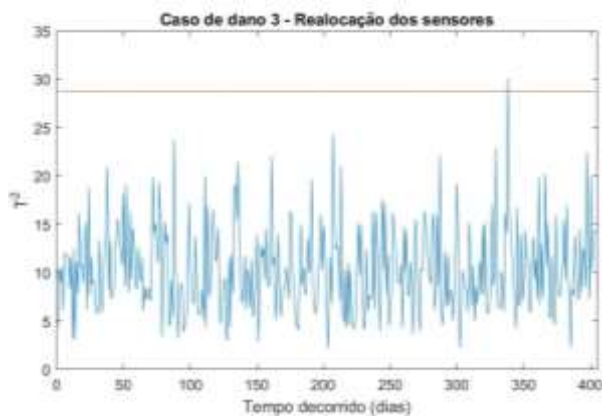
ANEXO C – GRÁFICO DE CONTROLE MULTIVARIADO – T^2 (REALOCAÇÃO DOS SENSORES) - RLM



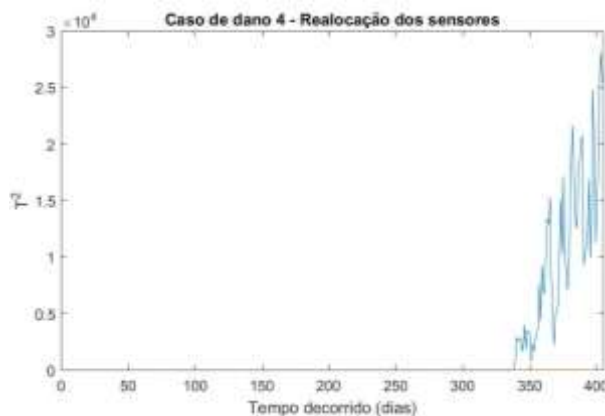
C.1 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 1 (sensores realocados).



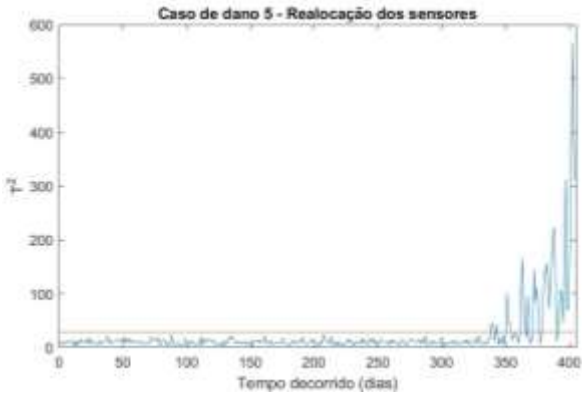
C.2 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 2 (sensores realocados).



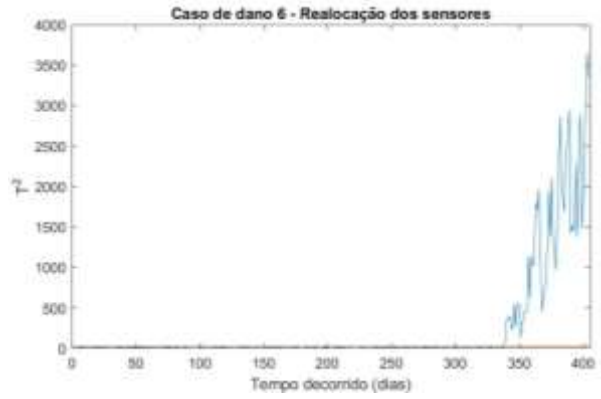
C.3 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 3 (sensores realocados).



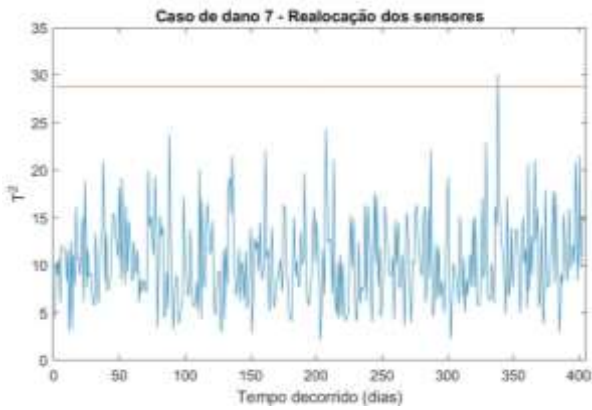
C.4 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 4 (sensores realocados).



C.5 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 5 (sensores realocados).



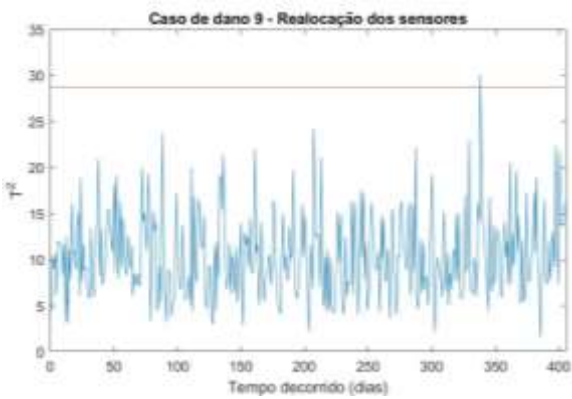
C.6 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 6 (sensores realocados).



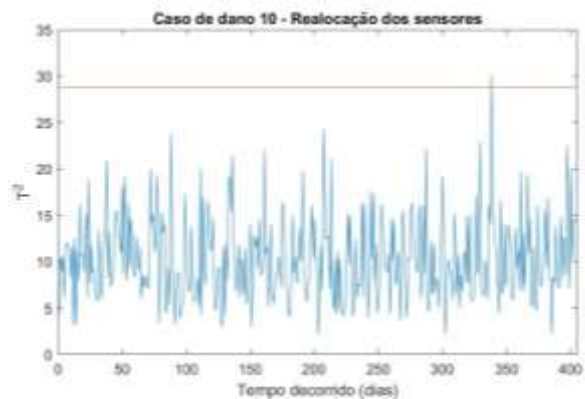
C.7 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 7 (sensores realocados).



C.8 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 8 (sensores realocados).



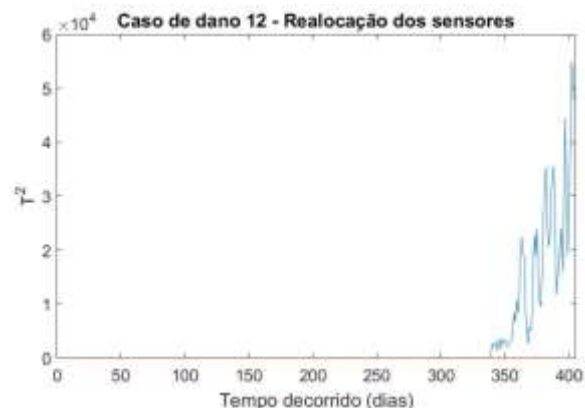
C.9 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 9 (sensores realocados).



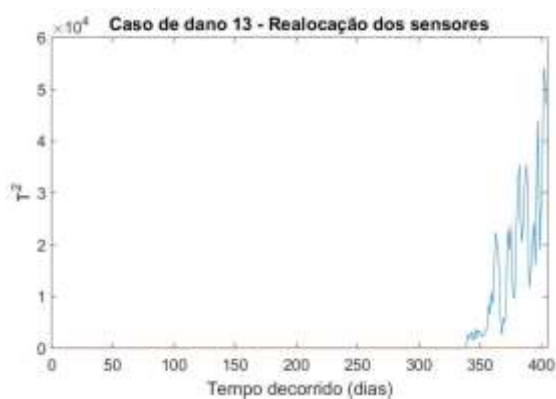
C.10 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 10 (sensores realocados).



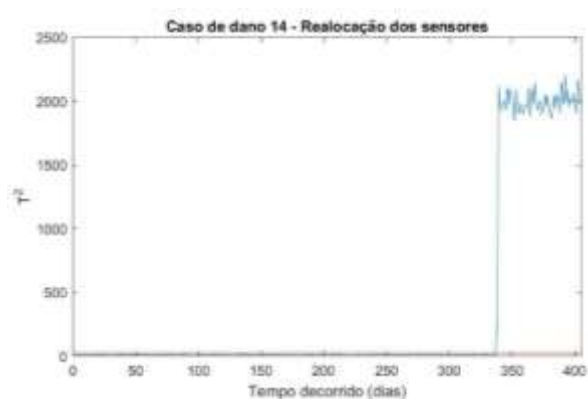
C.11 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 11 (sensores realocados).



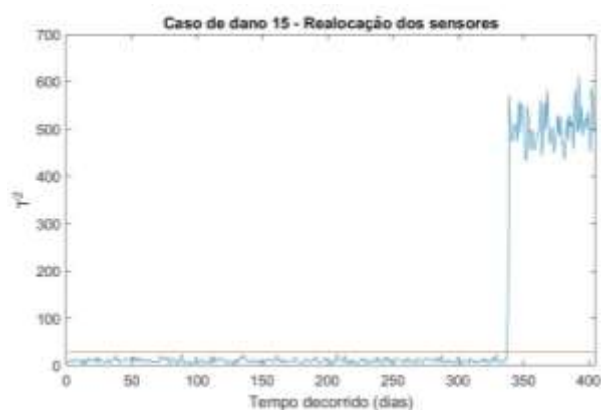
C.12 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 12 (sensores realocados).



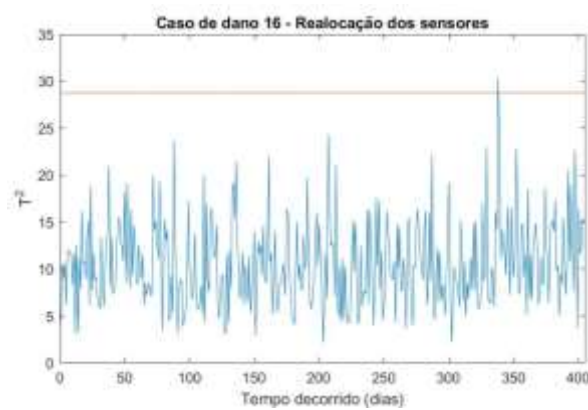
C.13 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 13 (sensores realocados).



C.14 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 14 (sensores realocados).

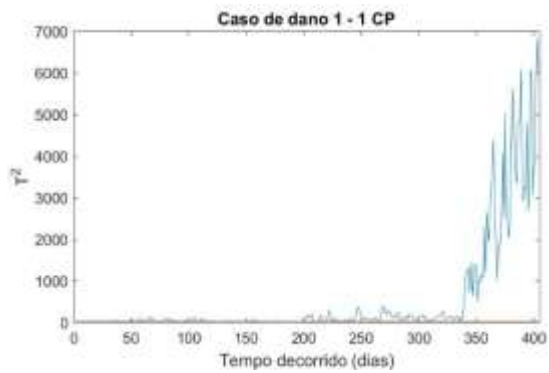


C.15 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 15 (sensores realocados).

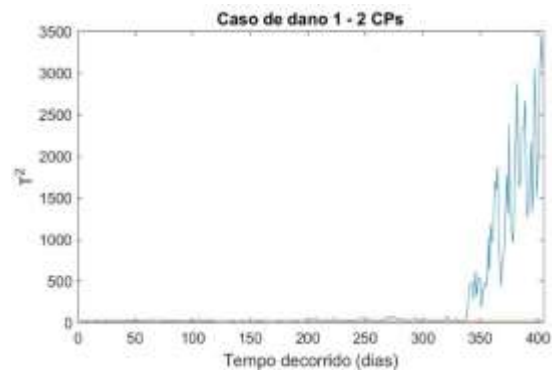


C.16 - RLM Gráfico T^2 - Caso de dano 16 (sensores realocados).

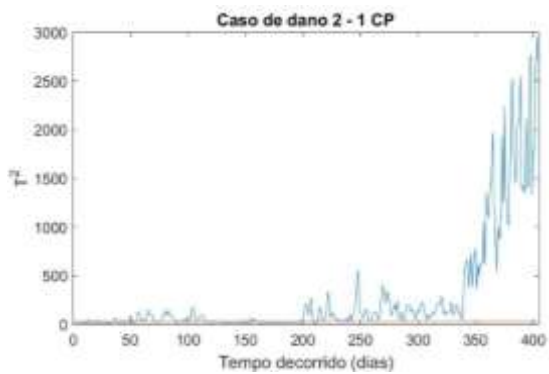
ANEXO D – GRÁFICO DE CONTROLE MULTIVARIADO – T^2 (PCA)



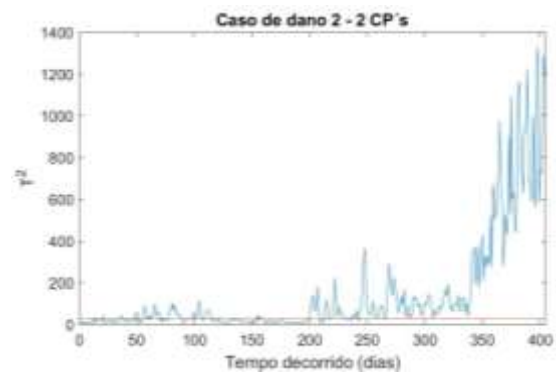
D.1 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.



D.2 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.

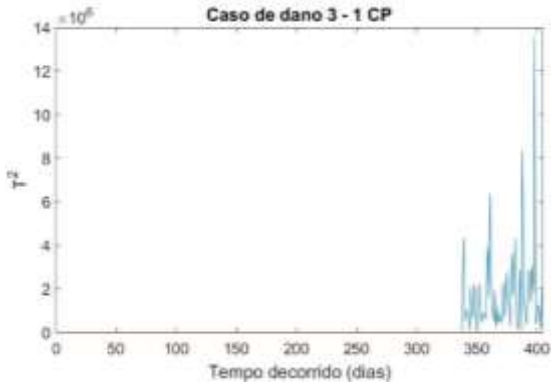


D.3 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 2.



D.4 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 2.

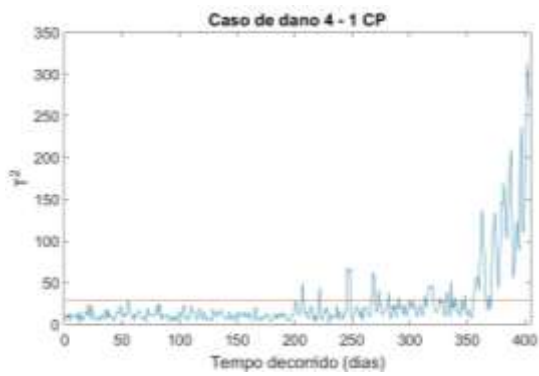
ANEXO D



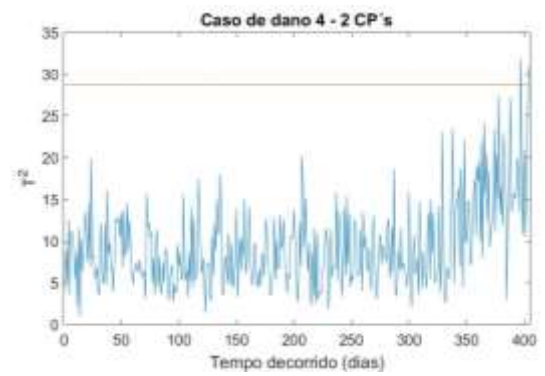
D.5 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 3.



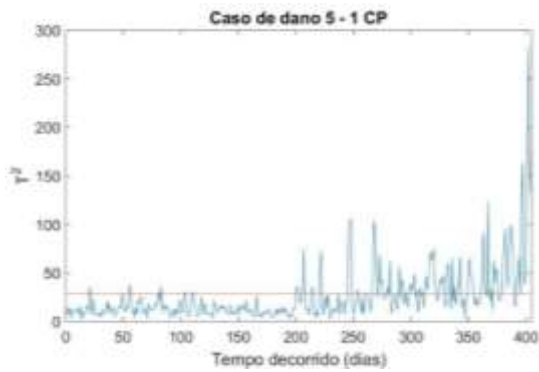
D.6 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 3.



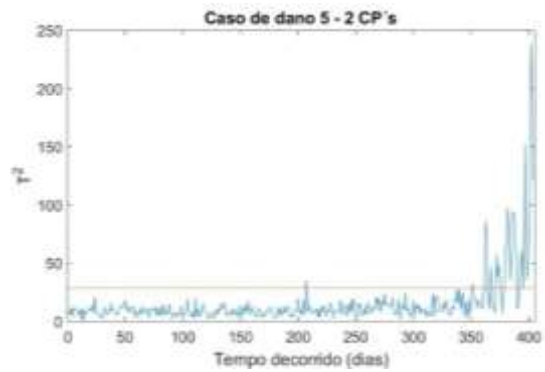
D.7 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 4.



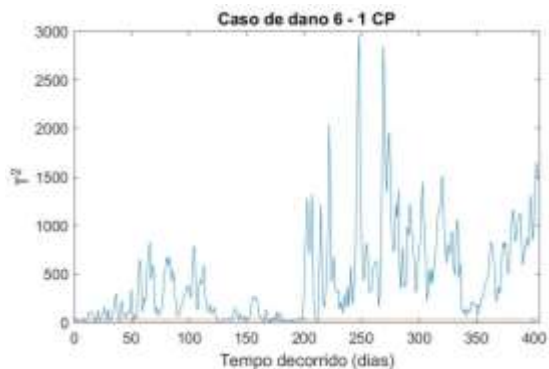
D.8 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 4.



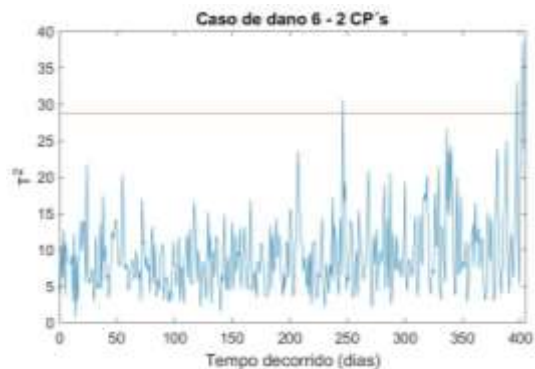
D.9 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.



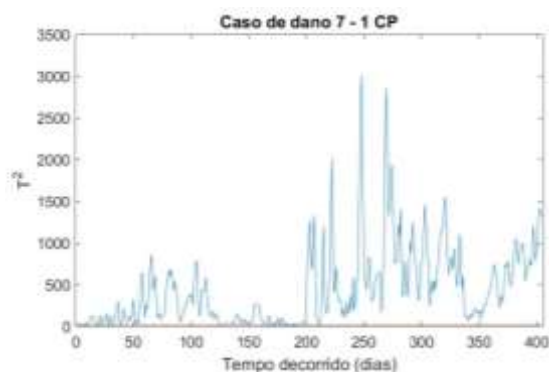
D.10 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.



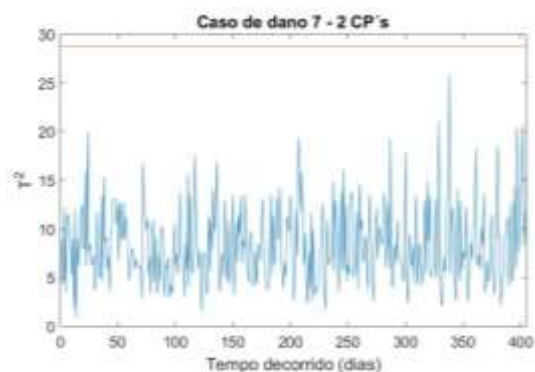
D.11 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 6.



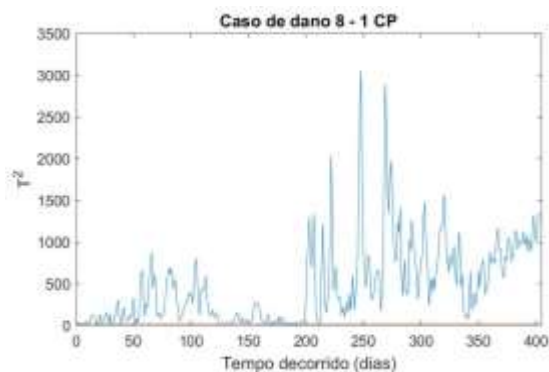
D.12 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 6.



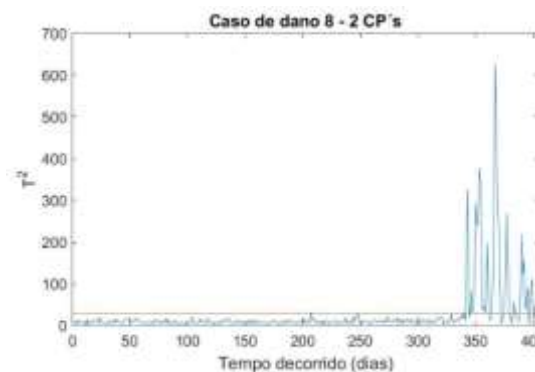
D.13 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 7.



D.14 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 7.



D.15 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 8.

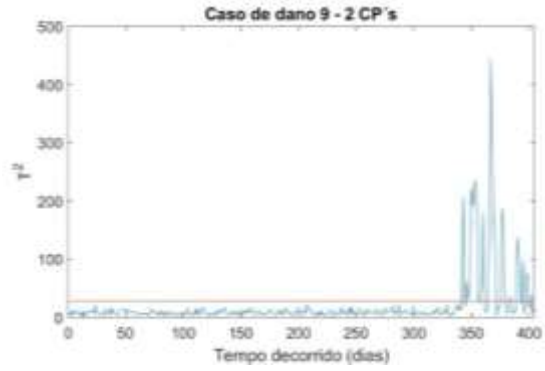


D.16 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 8.

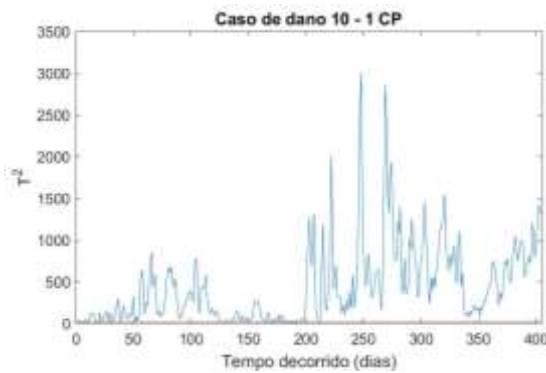
ANEXO D



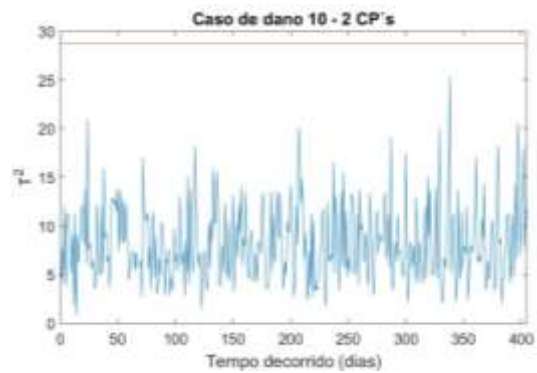
D.17 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 9.



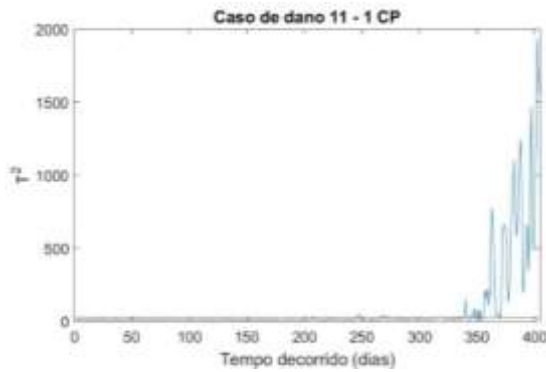
D.18 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 9.



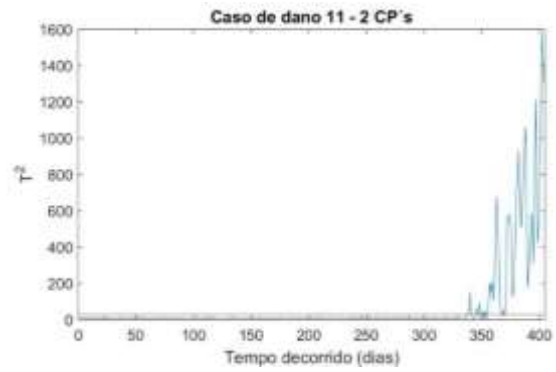
D.19 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 10.



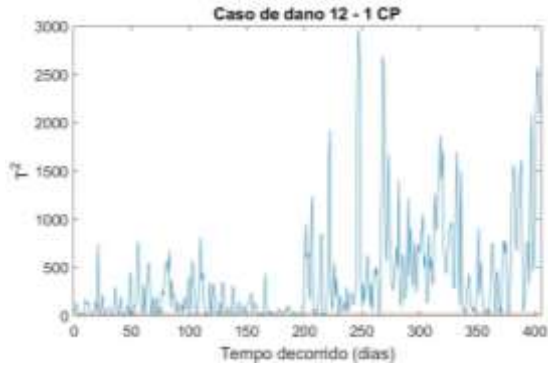
D.20 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 10.



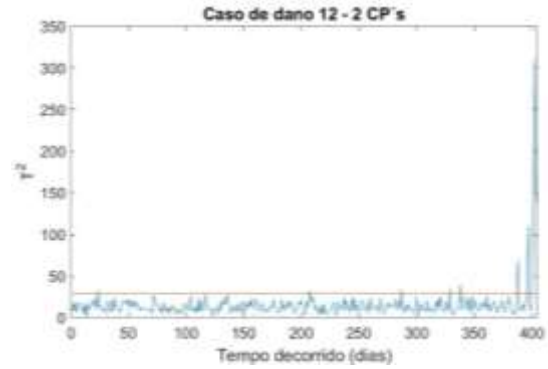
D.21 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 11.



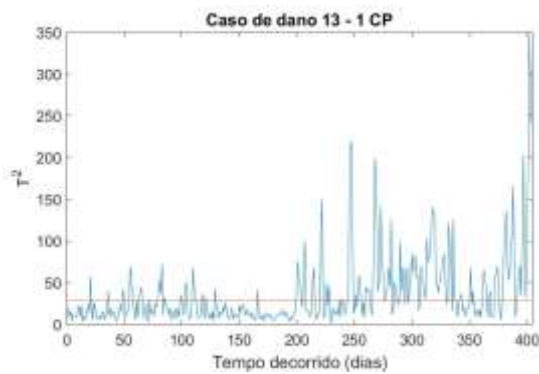
D.22 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 11.



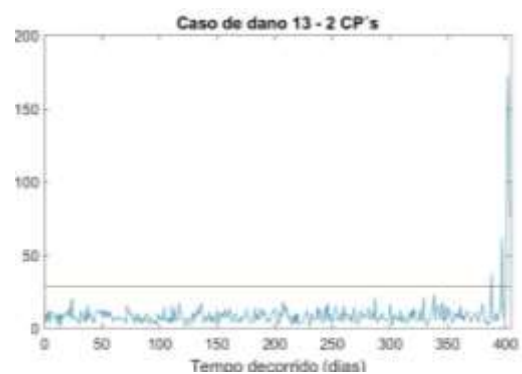
D. 23 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 12.



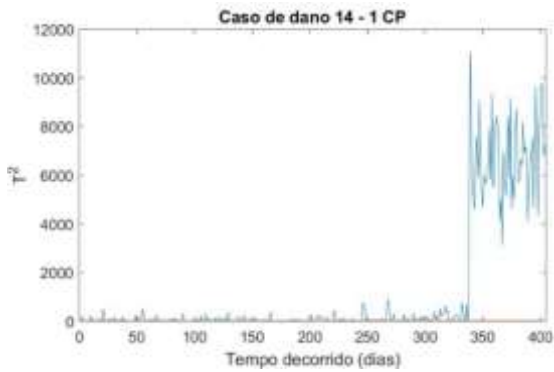
D. 24 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 12.



D. 25 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 13.



D. 26 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 13.

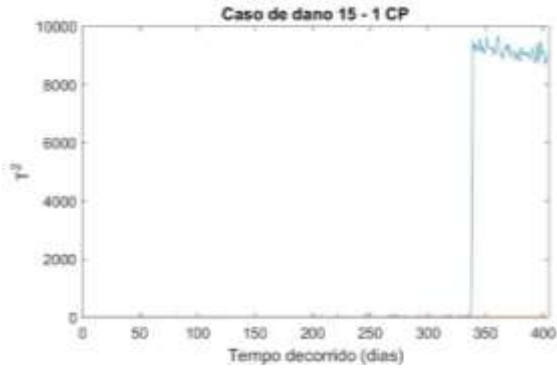


D.27 - PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 14.

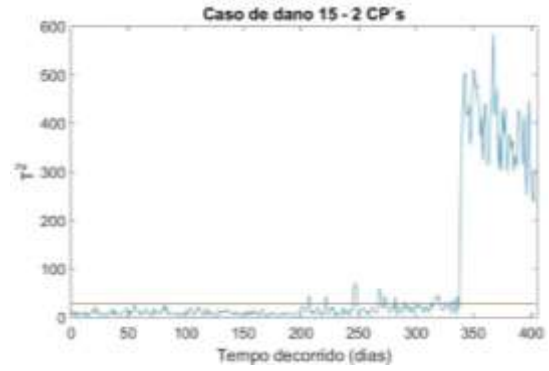


D. 28 - PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 14.

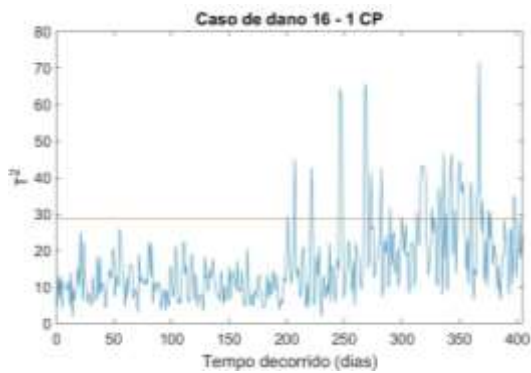
ANEXO D



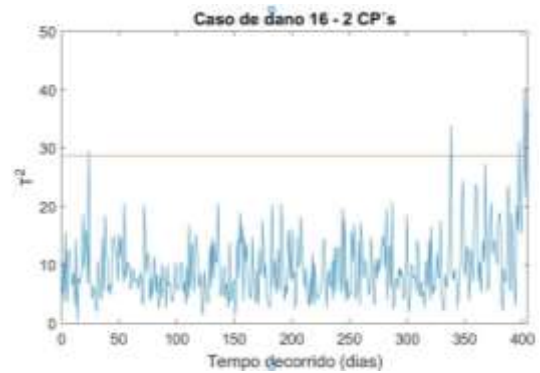
D.29 - PCA - 1 CP, Gráfico T² - Caso de dano 15.



D.30 - PCA - 2 CP's, Gráfico T² - Caso de dano 15.

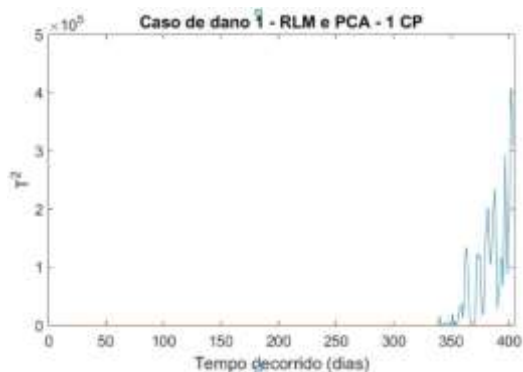


D.31 - PCA - 1 CP, Gráfico T² - Caso de dano 16.

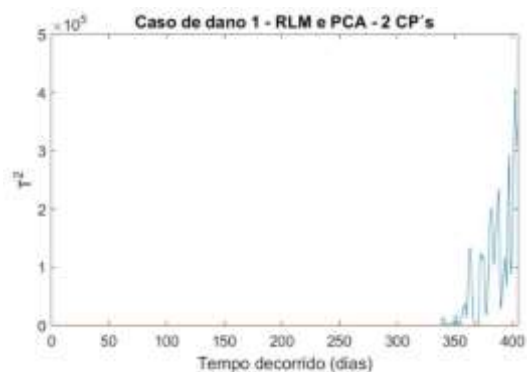


D.32 - PCA - 2 CP's, Gráfico T² - Caso de dano 16.

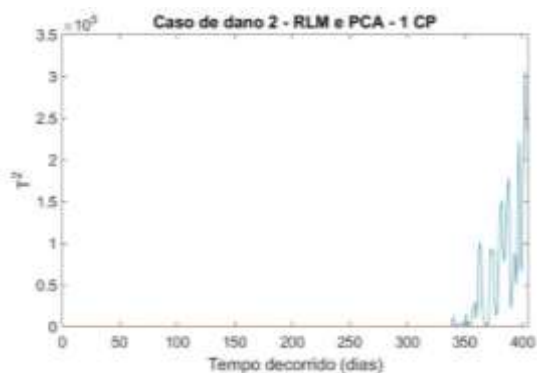
ANEXO E – GRÁFICO DE CONTROLE MULTIVARIADO – T^2 (RLM - PCA)



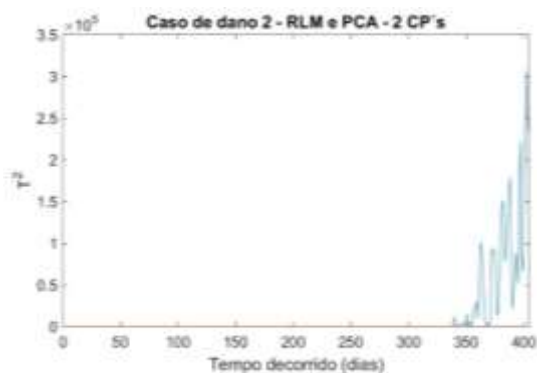
E.1 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.



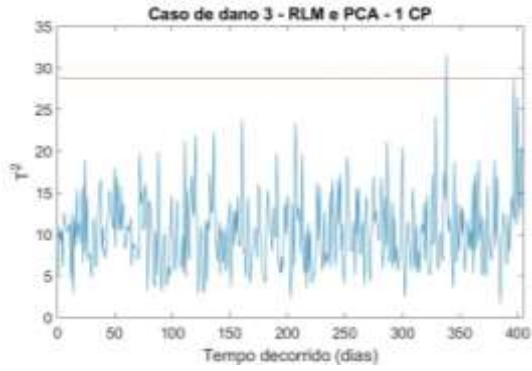
E.2 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 1.



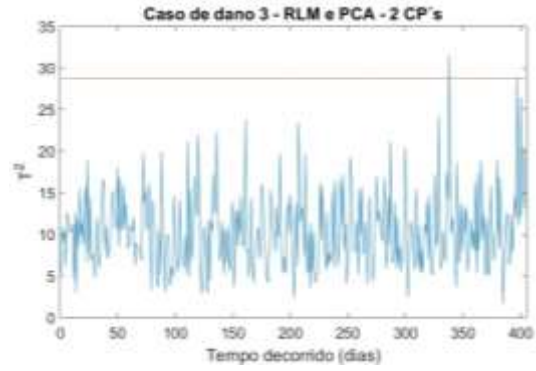
E.3 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 2.



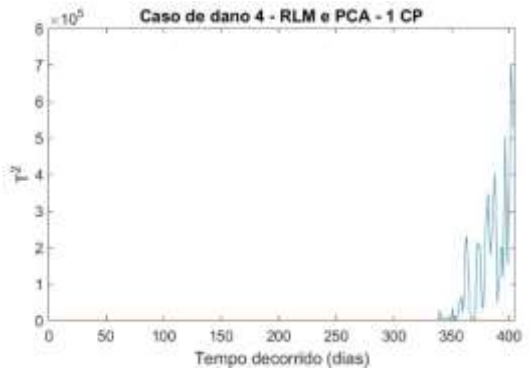
E.4 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 2.



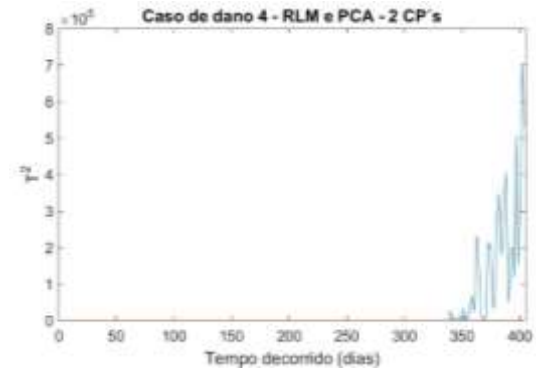
E.5 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 3.



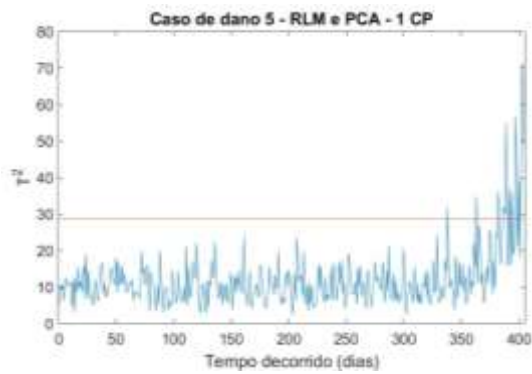
E.6 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 3.



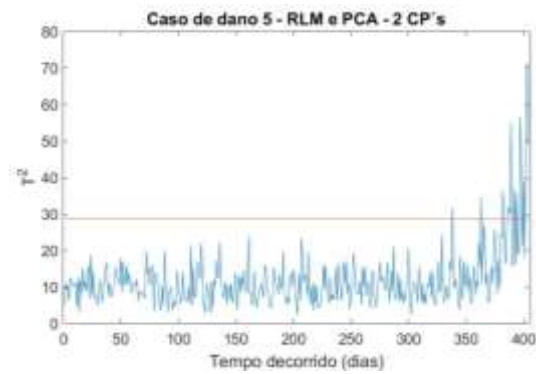
E.7 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 4.



E.8 - RLM e PCA - CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 4.



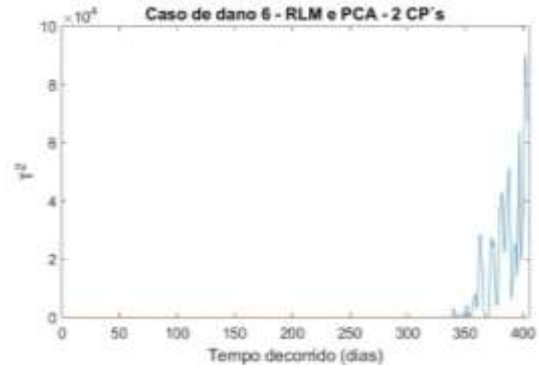
E.9 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.



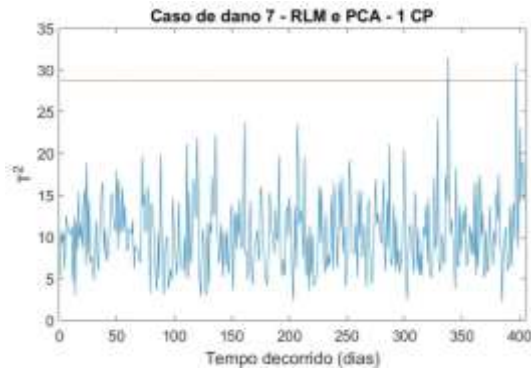
E.10 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 5.



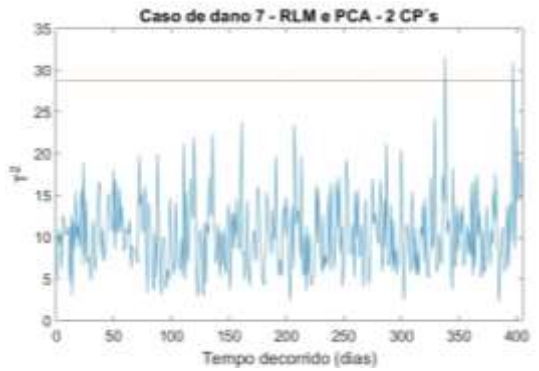
E.11 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 6.



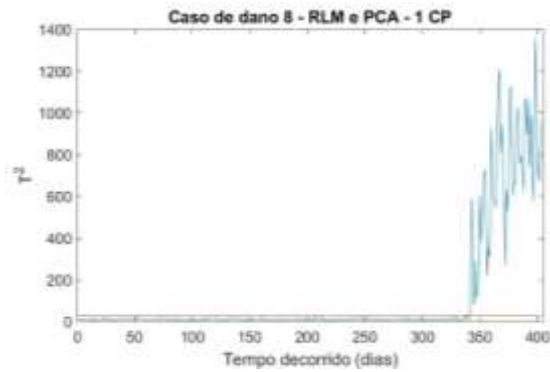
E.12 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 6.



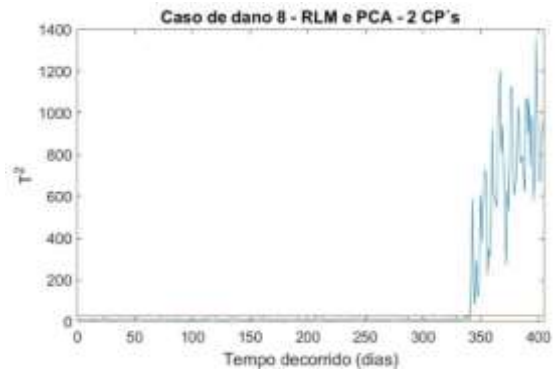
E.13 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 7.



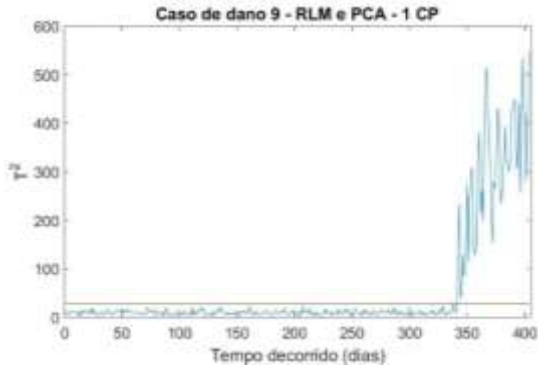
E.14 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 7.



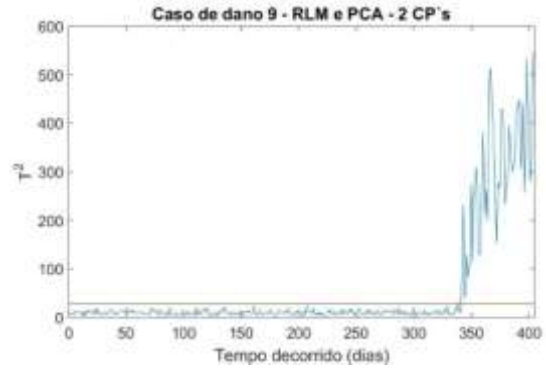
E.15 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 8.



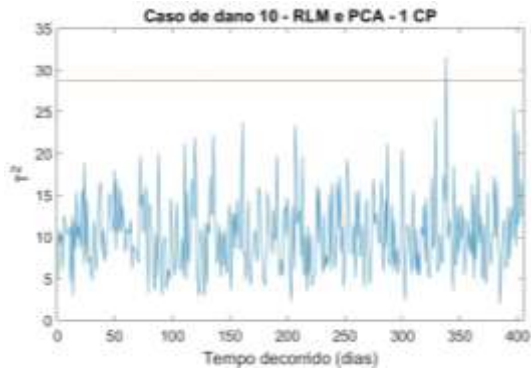
E.16 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 8.



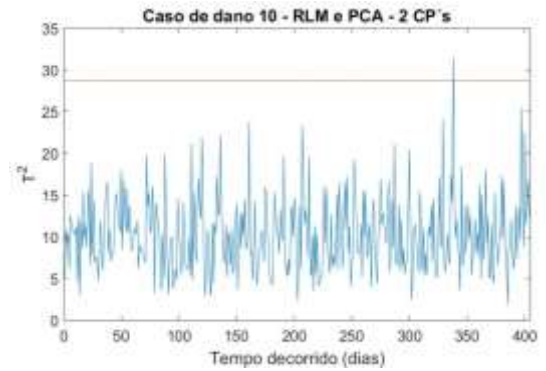
E.17 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 9.



E.18 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 9.



E.19 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 10.



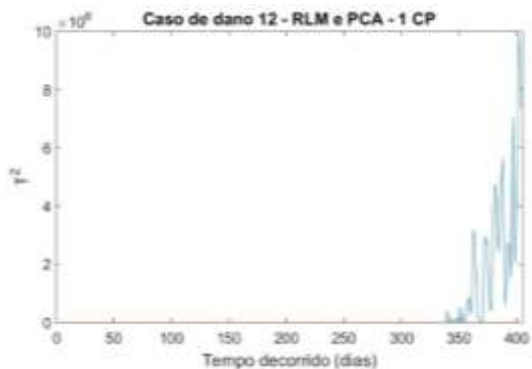
E.20 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 10.



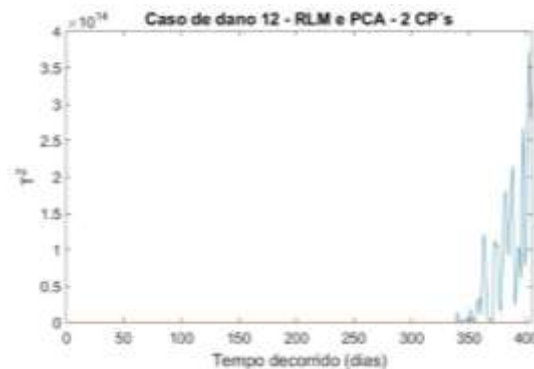
E.21 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 11.



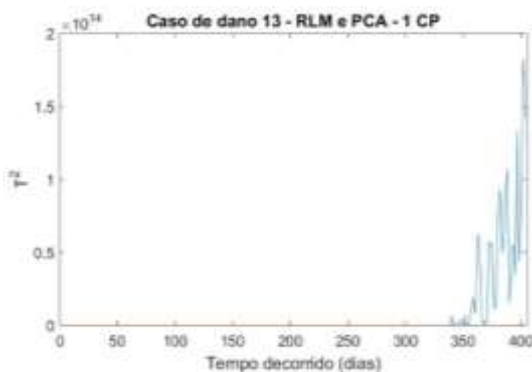
E.22 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 11.



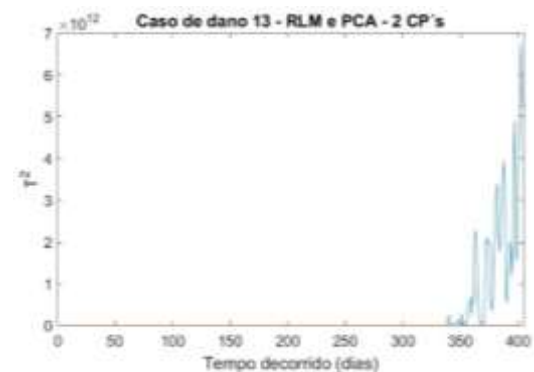
E. 23 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 12.



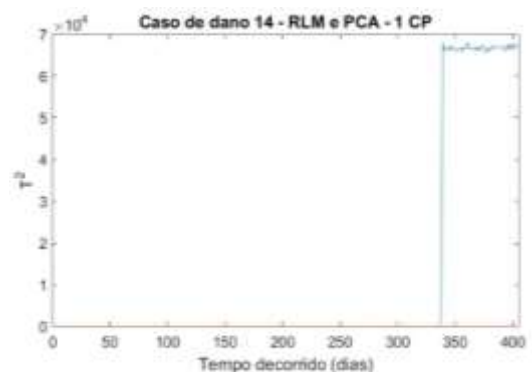
E. 24 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 12.



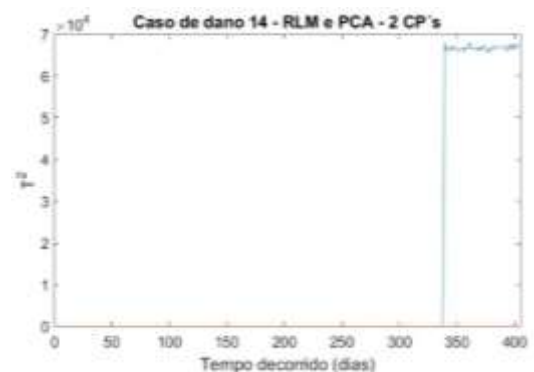
E. 25 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 13.



E. 26 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 13.

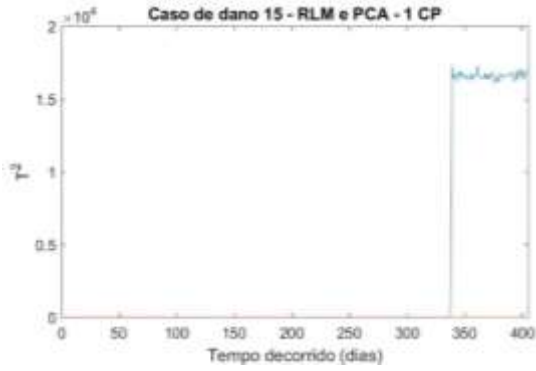


E.27 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 14.



E.28 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 14.

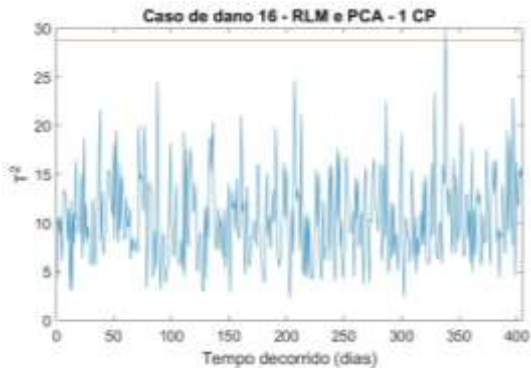
ANEXO E



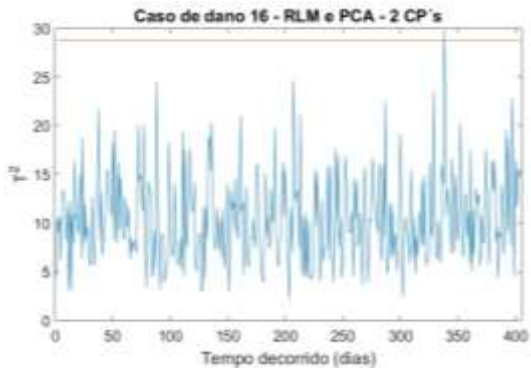
E.29 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 15.



E.30 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 15.



E.31 - RLM e PCA - 1 CP, Gráfico T^2 - Caso de dano 16.



E.32 - RLM e PCA - 2 CP's, Gráfico T^2 - Caso de dano 16.