

MONITORIZAÇÃO E ANÁLISE DE PADRÕES ESTRUTURAIS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

BRUNO FILIPE SILVA TEIXEIRA SARMENTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

Coorientador: Professor Doutor António José Coelho Dias Arêde

MARÇO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

“Uma vida não questionada não vale a pena ser vivida”

Platão

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação vai para além de qualquer conquista individual, sendo o seu sucesso resultado do apoio de muitas pessoas. Graças a estas pessoas que passaram na minha vida, pude concluir este capítulo evoluindo sempre a nível pessoal e profissional. Sem elas, não poderia estar onde estou nem ser quem sou.

Primeiramente, gostaria de agradecer e dedicar esta conquista à minha mãe e ao meu pai por me terem fornecido todos os recursos necessários e mais alguns para o meu desenvolvimento tanto pessoal como profissional. Mãe, obrigado por toda a ajuda emocional ao longo da minha vida e por sempre tentares criar um lar onde pudesse crescer e ser feliz. Pai, obrigado por toda a ajuda que me deste no meu conhecimento e desenvolvimento como homem, forçaste-me a ser uma pessoa melhor e, agora, podes descansar. Obrigado por tudo o que fizeram por mim, vocês são a fundação do meu ser.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao meu orientador, professor Dr. José Miguel de Freitas Castro, assim como ao meu coorientador professor Dr. António José Coelho Dias Arêde, pelo apoio incansável na realização desta dissertação, pela disponibilidade em esclarecer todas as minhas dúvidas, mas principalmente pela partilha de sabedoria que permitiu a realização bem fundamentada desta dissertação, assim como o crescimento das minhas competências como profissional.

Um agradecimento especial à minha namorada Rita, por toda a ajuda que me deu durante a realização desta conquista. Obrigado por todo o apoio tanto emocional como prático na realização desta dissertação e foste um ponto chave para a conclusão deste marco. Não poderia pedir melhor companheira de vida para partilhar os meus sucessos. Obrigado, amo-te para sempre.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos, com um foco especial aos laços de amizade que foram criados ao longo deste curso. Um obrigado especial aos “Os Malindos” por toda a contribuição na conclusão deste capítulo da minha vida, assim como um agradecimento pelos momentos de lazer e diversão que tivemos ao longo destes anos. São amizades para a vida.

RESUMO

A presente dissertação centra-se na monitorização do comportamento estrutural de edifícios históricos, utilizando técnicas de análise de dados. Com o crescimento das infraestruturas urbanas e a necessidade de preservação dos patrimónios arquitetónicos, torna-se essencial desenvolver métodos cada vez mais eficazes de avaliar a monitorização da condição estrutural de construções antigas.

Esta investigação tem como foco aplicações de *Structural Health Monitoring* (SHM), para analisar o impacto das obras do Metro do Porto na Estação de S. Bento e outros monumentos históricos da cidade. Através da instalação de sensores, foi possível recolher um vasto conjunto de dados sobre as variações estruturais ao longo do tempo. A análise destes dados permitiu identificar padrões e correlações entre fatores ambientais e estruturais, auxiliando na deteção precoce de anomalias e na prevenção de danos significativos.

Embora o objetivo inicial incluísse a aplicação de inteligência artificial, o tempo disponível levou a uma abordagem mais centrada na análise estatística dos dados obtidos. A utilização de técnicas de processamento de *Big Data* revelou-se fundamental para a interpretação eficiente dos registos obtidos, possibilitando uma avaliação precisa das condições estruturais dos edifícios monitorizados.

Os resultados deste estudo contribuem para a melhoria das estratégias de conservação de património histórico, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisão por parte dos engenheiros responsáveis. Além disso, a investigação reforça a importância da monitorização contínua na gestão de infraestruturas críticas, demonstrando como a tecnologia pode ser utilizada para garantir a preservação de edifícios históricos em áreas urbanas em constante evolução.

PALAVRAS-CHAVE: MONITORIZAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL, EDIFÍCIOS HISTÓRICOS, ANÁLISE DE DADOS, GRANDE VOLUME DE DADOS, SÉRIES TEMPORAIS

ABSTRACT

The focus of this dissertation consists in monitoring the structural behaviour of historic buildings using data analysis techniques. With the growth of urban infrastructures and the need to preserve architectural heritage, it has become essential to develop increasingly effective methods of assessing the structural health of old buildings.

This research focuses on SHM (Structural Health Monitoring) applications to analyse the impact of the Metro do Porto constructions' work on S. Bento Railway Station and other historic monuments in the city. By installing sensors, it was possible to collect a wide range of data on structural variations over time. The analysis of these data made it possible to identify patterns and correlations between environmental and structural factors, helping with the early detection of anomalies and the prevention of significant damage.

Although the initial objective included the application of artificial intelligence, the time available led to an approach more focused on the statistical analysis of the data obtained. The use of Big Data processing techniques proved fundamental to the efficient interpretation of the records obtained, enabling an accurate assessment of the structural conditions of the monitored buildings.

The results of this study contribute to improving historic heritage conservation strategies, providing valuable information for decision-making by the engineers in charge of the work. In addition, the research reinforces the importance of continuous monitoring in the management of critical infrastructures, demonstrating how technology can be used to ensure the preservation of historic buildings in constantly-evolving urban areas.

KEYWORDS: STRUCTURAL HEALTH MONITORING, HISTORIC BUILDINGS, DATA ANALYSIS, BIG DATA, TIME SERIES

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XV
 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA.....	2
 2. STRUCTURAL HEALTH MONITORING.....	3
2.1. DEFINIÇÃO	3
2.2. FINALIDADE DA MONITORIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS	4
2.2.1. ESTRATÉGIAS E MÉTODOS DE SHM	5
2.3. MÚLTIPLAS ABORDAGENS	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
2.3.1. MÉTODOS DE ENSAIO DESTRUTIVOS.....	6
2.3.2. MÉTODOS DE ENSAIO SEMI-DESTRUTIVOS	8
2.3.3. MÉTODOS DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVOS	9
2.4. INSTRUMENTOS, MEDIÇÕES E METODOLOGIA PARA SHM	10
2.5. IOT- INTERNET DAS COISAS	11
2.6. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA ESTRUTURAL	11
2.6.1. MACHINE LEARNING EM SHM	13
2.6.1.1. Algumas abordagens de ML em SHM.....	13
 3. CASO DE ESTUDO	14
3.1. METRO DO PORTO	14
3.1.1. ESTAÇÃO DE S. BENTO	15
3.2. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO	17
3.2.1. EQUIPAMENTOS DE MONITORIZAÇÃO	17
3.2.1.1. Sensores de nível	18
3.2.1.2. Sensores de deslocamento.....	18

3.2.1.3. Sensor de rotação - Clinómetros	18
3.2.1.4. Sensores de temperatura.....	19
3.2.1.5. Acelerómetro.....	19
3.2.1.6. Módulo de aquisição e registo de dados analógicos gerais.....	20
3.2.1.7. Módulo de agregação de dados e de saída (Gateway)	20
3.2.1.8. Router de transmissão remota de dados.....	21
3.2.2. ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO	22
3.2.3. ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS	25
3.3. EXPLORAÇÃO DE RELAÇÕES E PADRÕES ENTRE VARIÁVEIS DISTINTAS.....	26
3.3.1. - RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E A INCLINAÇÃO.....	27
3.3.1.1. Vetor e ângulo resultante das inclinações	32
3.3.1.2. Análise e discussão	53
3.3.2. VERIFICAÇÃO DOS VALORES DE ASSENTAMENTO	54
3.3.2.1. Estudo dos assentamentos das fachadas	55
3.3.2.2. Análise e discussão	Erro! Marcador não definido.
3.3.2.3. Análise e discussão	58
3.3.2.4. Análise da avaliação do comportamento do solo sem a necessidade da utilização de sensores de nível.....	Erro! Marcador não definido.
3.3.2.5. Mapa topográfico	61
3.3.3. RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E OS FISSURÓMETROS	63
3.3.3.1. Análise e discussão	73
3.3.4. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	73
3.3.4.1. Análise e discussão	75
 4. CONCLUSÕES	 76
4.1. CONCLUSÕES FINAIS	76
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estratégias de SHM para estruturas de engenharia civil [2]	5
Figura 2.2 - Diferentes métodos de aplicação SHM	6
Figura 2.3 - Máquina de extração e ensaio; Ensaio de arrancamento de varões	7
Figura 2.4 - Câmara boroscópica; Humidímetros; Macacos Planos; Ensaio de Arrancamento	8
Figura 2.5 - Termografia; Ensaio de ultra-sons e tomografia	9
Figura 2.6 - Radar de Prospeção Geotécnica; Estetoscopia	9
Figura 2.7 - Arquitetura de IoT para SHM	11
Figura 2.8 - Fluxograma de um processo de dimensionamento estrutural	12
Figura 2.9 - Análise de risco estrutural	12
Figura 2.10 - Exemplo de deteção de anomalias através das frequências da torre de San Frediano [7]	13
Figura 3.1 - Propostas das novas linhas de metro do Porto – Linha Rosa e Linha Amarela, respetivamente	15
Figura 3.2 - Estação de S. Bento	15
Figura 3.3 - (a) Visão superior da Estação de S. Bento. (b) Configuração simétrica em “U” da Estação de S. Bento. (c) Interior do vestíbulo. (d) Vista da fachada Norte e Oeste da Estação de S. Bento....	16
Figura 3.4 - Localização das obras do Metro do Porto	17
Figura 3.5 - Sensor de Nível	18
Figura 3.6 – Fissurómetro	18
Figura 3.7 - Clinómetro.....	18
Figura 3.8 - Sonda de temperatura Pt100 e Transmissor de temperatura	19
Figura 3.9 - Nó de Acelerómetro	19
Figura 3.10 - Módulo de aquisição de dados de Tensão	20
Figura 3.11 - Agregador de dados ou Gateway	20
Figura 3.12 - Router de transmissão de dados.....	21
Figura 3.13 - Zonas de instalação de sensores de monitorização e sistema de referência global	22
Figura 3.14 - Disposição da localização dos sensores utilizados relativos ao nível associado. (a) Representação do alçado exterior da fachada Oeste. (b) Representação do alçado interior da fachada Oeste	23
Figura 3.15 - Representação dos eixos tridimensionais (x, y e z) assim como as direções medidas pelos clinómetros (A e B). Rotação em torno do eixo y e rotação em torno do eixo x respetivamente.	25
Figura 3.16 - Ilustração de todas as etapas para a monitorização	25

Figura 3.17 - Variação de T_07 e T_09 ao longo do tempo. (a) Pontos indesejados na monitorização. (b) Intervalo de tempo definido para a monitorização	26
Figura 3.18 - Variação dos valores registados do par Temperatura-Clinómetro no decorrer de um ano. (a) Variação de T_07 ao longo do tempo. (b) Variação de CL1X e CL1Y ao longo do tempo	27
Figura 3.19 - Bibliotecas utilizadas	28
Figura 3.20 - <i>Dataframe</i> CL1	28
Figura 3.21 - Algoritmo para o gráfico da inclinação em função da temperatura	28
Figura 3.22 - Gráfico de CL1X e CL1Y em função da temperatura, respetivamente	29
Figura 3.23 - Algoritmo utilizado na correção de CL_1X.....	30
Figura 3.24 - Gráfico de CL1X corrigido em função da temperatura	30
Figura 3.25 - Variação do CL_1X corrigido e CL_1X ao longo do tempo	31
Figura 3.26 - Gráfico de CL1X e CL1Y não corrigidos agregados à hora em função da temperatura, respetivamente	31
Figura 3.27 - Gráfico de CL1X agregado à hora corrigido em função da temperatura.....	31
Figura 3.28 - Variação do CL_1X corrigido e CL_1X com agregação à hora ao longo do tempo.....	32
Figura 3.29 - <i>Dataframe</i> CL1.....	33
Figura 3.30 - Algoritmo utilizado no cálculo da norma e do ângulo do vetor resultante	33
Figura 3.31 - <i>Dataframe</i> Resultante _CL1.....	34
Figura 3.32 - Gráficos da norma e do ângulo em função ao tempo (a) Variação da norma do vetor CL1X não corrigido ao longo do tempo. (b) Variação de CL1 $\angle$ Resultante ao longo do tempo.....	34
Figura 3.33 - Gráficos da norma e do ângulo, através valores de inclinação corrigidos, em função ao tempo (a) Variação da norma do vetor CL1 corrigido ao longo do tempo. (b) Variação de CL1 $\angle$ Resultante corrigida ao longo do tempo.....	35
Figura 3.34 - Algoritmo utilizado para a representação do campo vetorial.....	36
Figura 3.35 - Representação gráfica dos vetores resultantes num campo vetorial. (a) Campo vetorial CL_01 não corrigidos. (b) Campo vetorial CL_01 corrigidos	36
Figura 3.36 - Vetor médio de todos os vetores resultantes do clinómetro CL_01 (a) Representação do vetor médio no campo vetorial. (b) Representação do vetor médio na Estação de S. Bento	37
Figura 3.37 - Representação esquemática da resposta dos sensores de inclinação.....	53
Figura 3.38 - Representação esquemática de distorção entre os sensores de nível	54
Figura 3.39 - Representação dos setores a serem estudados	54
Figura 3.40 - Algoritmo utilizado no cálculo das diferenças entre os assentamentos de SN_03 e SN_06	55
Figura 3.41 - Comprimentos entre os sensores de nível	55

Figura 3.42 - Variação dos ângulos de distorção provocado pelos sensores SN_03 e SN_06 e variação do clinómetro associado (CL_5X) ao longo do tempo.	55
Figura 3.43 - Variação dos ângulos de distorção provocado pelos sensores SN_03 e SN_06 e variação corrigida do clinómetro associado (CL_05X) ao longo do tempo	56
Figura 3.44 - Representação do referencial a ser utilizado	59
Figura 3.45 - Variação do ângulo de distorção gerado por SN_03 e SN_01 e os vetores resultantes no novo referencial. (a) Variação do ângulo de distorção e os vetores resultantes em torno do eixo m. (b) Variação do ângulo de distorção e os vetores resultantes em torno do eixo f	59
Figura 3.46 - Variação do ângulo de distorção entre SN_04 e SN_03 e CL_5X ao longo do tempo. (a) Variação do ângulo de distorção e CL_5X ao longo do tempo. (b) Variação do ângulo de distorção e CL_5X (* -1) ao longo do tempo.....	60
Figura 3.47 - Algoritmo utilizado na geração de mapas topográficos.....	61
Figura 3.48 - Disposição dos sensores em planta.....	64
Figura 3.49 - Variação dos fissurómetros 1 ao longo do tempo	64
Figura 3.50 - Variação do sensor de temperatura T_09 ao longo do tempo	64
Figura 3.51 - Gráfico de FS_1A e FS_1B em função da temperatura, respetivamente	65
Figura 3.52 - Gráfico de FS_1A e FS_1B corrigidos em função da temperatura, respetivamente	65
Figura 3.53 - Variação dos fissurómetros 1 corrigidos ao longo do tempo.....	66
Figura 3.54 - Algoritmo utilizado no cálculo do coeficiente de dilatação térmica linear (α).....	74
Figura 3.55 - Resultado do estudo do coeficiente de dilatação térmica linear	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de sensores utilizados na Estação de S. Bento	17
Tabela 2 - Nomenclatura e posição respetiva dos sensores utilizados	24
Tabela 3 - Evolução do mapa topográfico da Estação de S. Bento	62
Tabela 4 - Pares de sensores de temperatura e fissurómetros e zona de medição dos mesmos	63
Tabela 5 - Coeficientes de dilatação térmica das paredes da Estação de S.Bento	75

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α	- Coeficiente de Dilatação Térmica Linear [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
$\Delta\varepsilon$	- Variação da extensão linear de um elemento
ΔL	- Variação do comprimento de um elemento linear [m]
ΔT	- Variação da temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
ε	- Extensão linear de um elemento
CL	- Sensor Clinómetro
DL	- Deep Learning
DT	- Destructive Tests
FEUP	- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FS	- Fissurómetro
IA	- Inteligência Artificial
IoT	- Internet of Things
L_0	- Comprimento inicial de uma secção [m]
MDT	- Minor Destructive Tests
ML	- Machine Learning
NDT	- Non-Destructive Tests
PGA	- Peak Ground Acceleration
RNA	- Rede Neural Artificial
SHM	- Structural Health Monitoring
SN	- Sensor de Nível
T	- Sensor de Temperatura
VPN	- Virtual Private Network

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Com a evolução das tecnologias do mundo moderno é essencial que o ser humano utilize ferramentas tecnológicas de modo a melhorar a sua qualidade de vida e o seu desenvolvimento. Na engenharia civil não é diferente. O avanço tecnológico tem permitido uma avaliação mais precisa da condição estrutural. O *Structural Health Monitoring* (SHM) é uma área da engenharia dedicada à monitorização e análise do estado de integridade de estruturas como edifícios e pontes. Esta monitorização permite aos engenheiros responsáveis avaliarem em tempo real a condição da estrutura. Com estes avanços tecnológicos, a monitorização do estado de uma estrutura pode ser realizada com cada vez menos invasão à estrutura, o que proporciona um estudo mais realista da estrutura.

Juntamente com estes avanços surgiram as técnicas de Big Data, que englobam a obtenção, o processamento e a análise de grandes volumes de dados. Estas técnicas são fundamentais para lidar com conjuntos de dados massivos e complexos, extraindo informações relevantes e padrões ocultos que podem ser utilizados para a tomada de decisões informadas. No contexto do SHM, a aplicação de Big Data revela-se essencial, uma vez que as infraestruturas modernas são frequentemente monitorizadas por um grande número de sensores distribuídos. Estes sensores geram um fluxo contínuo de dados que pode incluir medições de vibração, tensão, temperatura, deslocamento e outras variáveis físicas. Uma análise eficaz destes dados permite identificar um variado conjunto de informações como identificação de padrões anómalos, prever falhas e até correlacionar variáveis com fatores ambientais.

A utilização de técnicas avançadas, como inteligência artificial e análise estatística avançada contribui para a melhoria contínua dos modelos de monitorização e para a deteção antecipada de anomalias que poderão passar despercebidas em análises convencionais. Assim, o Big Data não só facilita a monitorização contínua das estruturas, mas também melhora significativamente a capacidade de resposta e a eficiência na manutenção de infraestruturas críticas.

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação pretende explorar o mundo do *Structural Health Monitoring* (SHM), com especial enfoque na aplicação de técnicas de *Big Data* à análise de dados obtidos por sensores instalados em diversos monumentos históricos da cidade do Porto, no âmbito de um projeto desenvolvido pela equipa da FEUP. Estes sensores têm como finalidade monitorizar a integridade estrutural das construções, especialmente face à potencial influência das obras de expansão do Metro do Porto.

O principal objetivo desta dissertação consiste em identificar e analisar padrões de comportamento entre os diferentes sensores, de forma a compreender melhor a resposta das estruturas às variações ambientais e a possíveis perturbações externas. Para isso, é realizada uma análise temporal dos dados recolhidos ao longo de vários meses, utilizando métodos estatísticos e computacionais com o intuito de correlacionar os sinais provenientes dos diferentes sensores

Através do desenvolvimento de modelos que permitem corrigir a influência de fatores externos nas leituras, pretende-se obter medições mais fidedignas da movimentação estrutural real. Com este estudo, ambiciona-se assim contribuir para uma monitorização mais precisa e eficaz das estruturas analisadas, proporcionando maior segurança aos engenheiros responsáveis e facilitando uma tomada de decisão mais informada no contexto da conservação e manutenção do património construído.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA

O presente documento está organizado em quatro capítulos distintos, cada um com objetivos específicos e estrutura própria.

Como resultado, são abordados aspetos essenciais para fornecer ao leitor informação imprescindível, permitindo-lhe interpretar de forma clara e detalhada os conteúdos desta dissertação.

Este capítulo introduz, de forma geral, o tema a desenvolver, estabelecendo um enquadramento dos objetivos propostos e da organização do documento.

O segundo capítulo é dedicado ao "Estado da Arte", cujo objetivo é contextualizar o leitor sobre a definição de SHM, os seus objetivos e os diferentes meios de monitorização, garantindo que esteja familiarizado com o tema nos capítulos seguintes, uma vez que este constitui a base da dissertação.

No terceiro capítulo, apresenta-se o caso de estudo, situado na zona metropolitana do Porto, onde a Metro do Porto deu início à construção de novas linhas de metro. A equipa da FEUP foi contratada para monitorizar alguns monumentos históricos da cidade, com o objetivo de controlar a sua condição estrutural. Este capítulo explora padrões e relações entre os dados recolhidos pelos diversos sensores instalados na Estação de S. Bento, contribuindo para a monitorização das estruturas em análise.

Finalmente, o quarto capítulo é dedicado às "Conclusões". Nele, são avaliados os pontos mais relevantes abordados ao longo do trabalho, apontando, por fim, algumas questões e sugestões para investigações futuras.

2

**STRUCTURAL HEALTH
MONITORING****2.1. DEFINIÇÃO**

Monumentos históricos fazem parte do património de qualquer país e, assim como qualquer outra construção, é necessário preservar a condição estrutural desses monumentos. Assim sendo, a sua conservação é imperativa, exigindo dos engenheiros uma atenção especial. Essa necessidade de salvaguardar e proteger esses edifícios históricos confere um papel fundamental para a cultura de um país e foi precisamente essa necessidade que levou à implementação de técnicas de Structural Health Monitoring (SHM).

O SHM de um edifício refere-se à abordagem global da monitorização, avaliação e gestão do estado das estruturas ao longo de todo o seu ciclo de vida [1]. Este método de prevenção de danos estruturais baseia-se na instalação de sensores de monitorização, de forma a obter dados em tempo real do comportamento estrutural de uma estrutura e produzir um diagnóstico do estado da estrutura analisando os valores medidos. SHM é um processo essencial na manutenção e deteção de anomalias, melhorando a capacidade de monitorização das infraestruturas civis através da reparação e gestão de desastres de estruturas [2]. Uma estratégia SHM consiste em variados componentes importantes, incluindo a rede de sensores, o processamento e a análise de dados, a avaliação dos danos e a tomada de decisões [3]. A SHM tem um grande potencial para oferecer benefícios económicos e de segurança de vida significativos. Apesar de este estudo se focar apenas no estado da condição estrutural de uma estrutura, SHM poderá ser aplicado para diversas finalidades como em aeronaves, turbinas eólicas entre outros exemplos.

As infraestruturas civis vão-se deteriorando gradualmente, seja devido ao seu uso contínuo, seja devido a agentes externos (diferenças de temperatura, humidade, vento, Etc.) e, por essa razão, é que uma gestão da condição estrutural de uma estrutura é um assunto tão importante na engenharia civil para a preservação do mesmo.[4] Num evento extremo, como um terramoto ou uma carga de explosão imprevista, a SHM é utilizada para uma rápida avaliação do estado e, caso necessário, uma intervenção.

Numa perspetiva geral, um dano é puramente definido como uma mudança num sistema que poderá afetar o futuro comportamento do mesmo. Para que esta definição faça sentido, é necessário comparar dois estados distintos desse sistema: um sistema inicial não danificado e um sistema danificado. Sendo assim, a definição de dano será relacionada com alterações nos materiais da estrutura e/ou alterações geométricas que afetam negativamente o desempenho atual ou futuro da estrutura.

2.2. FINALIDADE DA MONITORIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS

A SHM utiliza sistemas de sensores de monitorização assim como *software* e *hardware* especializado para a monitorização do desempenho da estrutura em estudo.[5] Esta monitorização não é algo que se possa realizar de forma imediata, mas sim por meio da observação dos valores de resposta de uma estrutura, cujos dados foram registados ao longo do tempo, com medições realizadas periodicamente através de um conjunto de sensores que monitorizam a resposta estrutural.[5] No caso de uma monitorização a longo prazo, este processo irá resultar em inúmeros dados registados, sendo possível ao observador definir previamente o intervalo de tempo em que estes sensores registam os valores. A título de exemplo, o observador pode definir que o sensor registre dados durante um minuto a cada cinco minutos. Deste modo, o resultado será uma informação periódica atualizada sobre a capacidade da estrutura para desempenhar a função pretendida. Adicionalmente, o SHM a longo prazo é uma excelente técnica para uma avaliação rápida do estado da estrutura, de modo a fornecer informações imediatas sobre a integridade da estrutura após eventos extremos, como um sismo ou uma carga de explosão [3]. Através destes dados adquiridos pelos sensores instalados, os objetivos de uma monitorização da condição estrutural de uma estrutura podem ser traçados nos cinco níveis seguintes [3]:

- Nível 1.** Detecção de dano – Indica qualitativamente onde poderão estar os danos na estrutura.
- Nível 2.** Localização do dano – Informa a posição do possível dano.
- Nível 3.** Classificação do dano – Indica o tipo de dano.
- Nível 4.** Avaliação do dano – Fornece uma estimativa da extensão do dano.
- Nível 5.** Prognóstico do dano – Produz informação sobre a segurança da estrutura.

Estes níveis encontram-se ordenados e o aumento dos mesmos indica um aumento do conhecimento do dano sendo que, usualmente, para cada nível é necessária informação dos níveis precedentes. Para serem obtidos os dois primeiros níveis, seria necessário utilizar métodos de deteção de danos baseados em vibrações a partir de medições da resposta dinâmica da estrutura [3]. De forma a classificar o tipo de dano, devem estar disponíveis dados de estruturas com os tipos específicos de danos para comparação com os dados obtidos. Após identificar o tipo de dano, juntamente com modelos analíticos, é então efetuada a avaliação e o prognóstico dos mesmos. Para cumprir este último nível é necessário estimar as cargas futuras, juntamente com modelos de previsão da deterioração [3].

O desenvolvimento de métodos de SHM bem sucedidos depende de dois fatores-chave: a tecnologia de deteção e os algoritmos de análise/ interpretação de sinais associados [3]. Ambos são essenciais para uma monitorização eficaz, pois não podem ser aplicados isoladamente e devem coexistir para garantir o funcionamento adequado. Um sistema SHM é constituído por vários componentes-chave, no qual estão incluídos os sensores, aquisição de dados, transmissão de dados, processamento de dados, gestão de dados, avaliação da condição estrutural e tomada de decisões. Todos estes componentes são essenciais para a avaliação de uma estrutura, e o processo será explicado com mais detalhe mais à frente.

A monitorização de pontes é o principal foco de aplicação de sistemas SHM devido ao seu tamanho e à sua complexidade estrutural. Neste sentido, pode-se tomar como referência o processo aplicado à monitorização da condição estrutural de uma ponte. Este processo envolve a recolha e análise de dados, enquadrando-se nas seguintes quatro categorias:

1. **Observação** – recolha, tratamento, análise e comunicação de todos os dados medidos dos sensores instalados.
2. **Avaliação** – análise do desempenho em tempo real da estrutura sob monitorização.
3. **Classificação** – classificação e estabelecimento de prioridades de componentes estruturais e programação de atividades de inspeção e/ou manutenção.
4. **Gestão** – armazenamento sistemático e recuperação rápida de todos os dados de observação.

2.2.1. ESTRATÉGIAS E MÉTODOS DE SHM

Para o bom funcionamento e uma avaliação adequada de uma estrutura, é essencial definir uma estratégia específica para cada caso de gestão. Sendo assim, é possível classificar as estratégias de SHM em dois grupos distintos: globais e locais. Por norma, estes dois grupos providenciam diferentes tipos de informação e apoiam diferentes tipos de análise. Na figura seguinte, apresenta-se uma perspetiva visual da estratégia a utilizar, assim como os tipos de informação recolhida e as medições associadas [3].

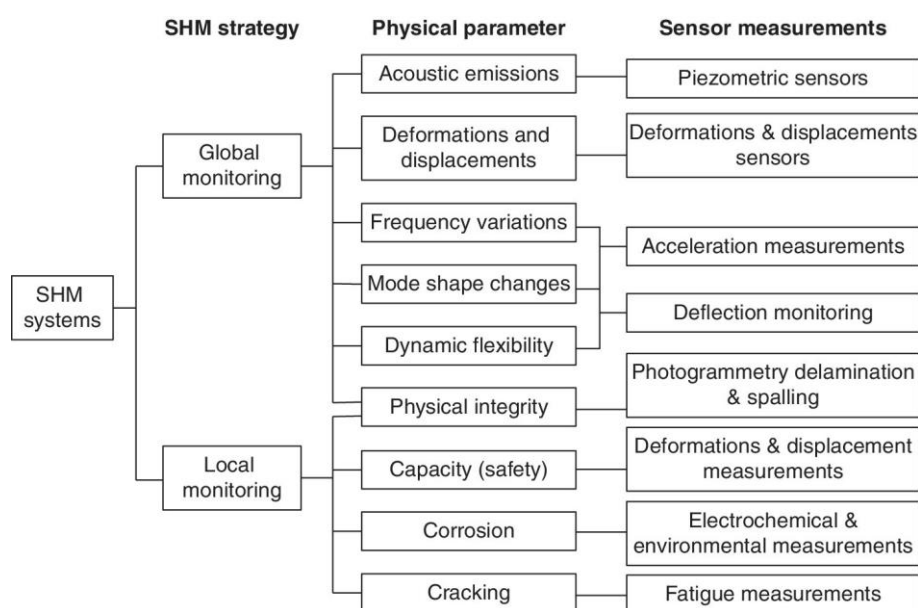


Figura 2.1 - Estratégias de SHM para estruturas de engenharia civil [3]

A seleção da estratégia a utilizar depende, em grande parte, da estrutura em si, do tipo de análise a ser efetuada, ou até mesmo de ambas. Por exemplo, para uma estrutura complexa em que seja impossível a análise local, seja devido ao impedimento por falta de alcance, seja por impedimento por danos à estrutura, uma abordagem global terá de ser a opção mais rentável para este caso. Porém, uma análise de monitorização local poderá ser a melhor opção caso se esteja a estudar um mecanismo de falha estrutural numa determinada área, como fissuras ou fadiga.

2.3. MÉTODOS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS

Garantir a segurança, fiabilidade e longevidade de uma estrutura requer a aplicação de métodos adequados de inspeção e diagnóstico. Estes métodos permitem monitorizar o estado estrutural e apoiar a tomada de decisões de manutenção ao longo do ciclo de vida das construções.

Com esta finalidade, existem diversas abordagens, sendo que uma das mais relevantes é o SHM, onde enquadra-se na inspeção de estruturas através de métodos não destrutivos (NDTs - *Non-Destructive Testing*). O SHM recorre a sensores para monitorizar continuamente as condições estruturais, permitindo a deteção precoce de anomalias e a otimização da manutenção.

Além do SHM, existem outros métodos de inspeção e diagnóstico, cada um adequado a diferentes contextos e necessidades. A ilustração seguinte identifica três abordagens principais, que podem ser seleccionadas conforme as características e requisitos específicos de cada estrutura.

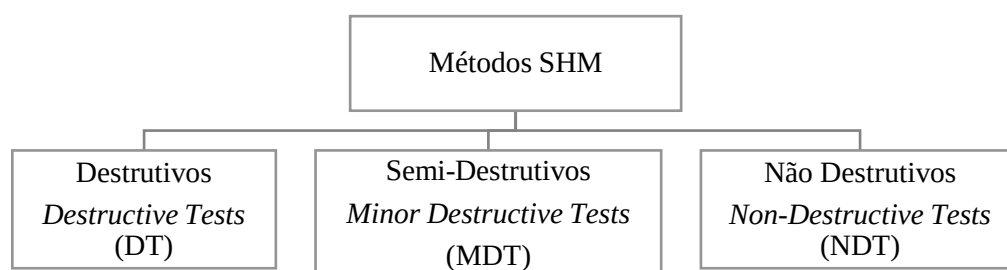


Figura 2.2 - Diferentes métodos de aplicação SHM

2.3.1. MÉTODOS DE ENSAIO DESTRUTIVOS

No caso de uma proposta de SHM em que o edifício em estudo seja uma estrutura de património cultural, não é possível utilizar métodos destrutivos, de forma a minimizar as intervenções e alcançar o equilíbrio entre as necessidades estruturais e a preservação do património e da sua autenticidade. Estes ensaios permitem a observação do interior do elemento estrutural. Os principais métodos de ensaio destrutivos são [6]:

- **Extração de Carotes;**
- **Arrancamento de varões previamente selados nas paredes.**



Figura 2.3 - Máquina de extração e ensaio; Ensaio de arrancamento de varões

2.3.2. MÉTODOS DE ENSAIO SEMI-DESTRUTIVOS

Estes ensaios são implementados mediante perturbações nos elementos como pequenos rasgos ou orifícios, permitindo obter informações exatas e detalhadas sobre o interior da parede [6]. Para este método, podem ser escolhidos os seguintes ensaios:

- **Inspeção com câmara boroscópica;**
- **Humidade Superficial;**
- **Arrancamento;**
- **Macacos Planos;**
- **Dilatómetro.**



Figura 2.4 - Câmara boroscópica; Humidímetros; Macacos Planos; Ensaio de Arrancamento

2.3.3. MÉTODOS DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos são classificados por não serem invasivos ou destrutivos nos elementos em estudo. Estes permitem obter parâmetros qualitativos a fim de caracterizar o comportamento do material e até mesmo identificar anomalias ocultas que só poderiam ser detetadas por métodos mais invasivos [6].

Os principais métodos não destrutivos são:

- **Termografia;**
- **Ultra-sons e tomografia sónica;**
- **Radar de prospeção;**
- **Estetoscopia.**



Figura 2.5 - Termografia; Ensaio de ultra-sons e tomografia

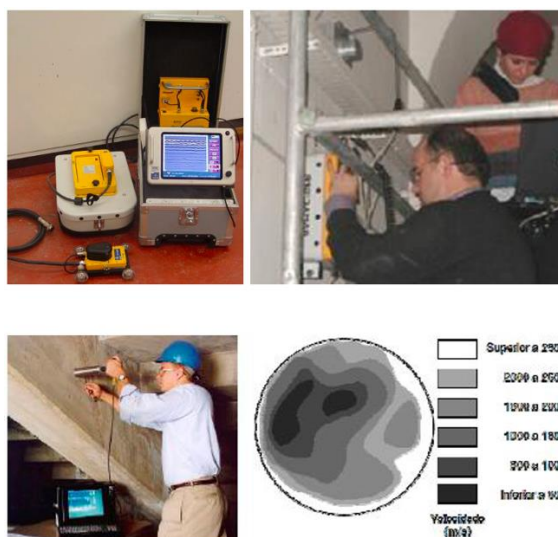


Figura 2.6 - Radar de Prospeção Geotécnica; Estetoscopia

A implementação de SHM em estruturas de património cultural é uma mais-valia para compreender o comportamento estrutural, avaliar a necessidade de reforço, monitorizar o avanço dos danos e verificar a eficácia das intervenções de reforço [1].

Os diferentes métodos podem ser aplicados em várias ocasiões. Porém, esta dissertação irá focar-se nos métodos não destrutivos, sendo o caso de estudo apresentado, realizado através dessa mesma técnica. Na predominância dos artigos investigados, terão sido aplicados métodos NDT em edifícios de alvenaria e no património cultural, o que contribuirá para o desenvolvimento desta dissertação.

2.4. INSTRUMENTOS, MEDIÇÕES E METODOLOGIA PARA SHM

Para a monitorização de uma estrutura é necessário uma série de instrumentos de medição, tanto para os elementos estruturais quanto para os agentes naturais. Os instrumentos consistem em sensores de medição que coletam informações durante intervalos de tempo e períodos determinados. Por exemplo, é possível recolher um minuto de dados a cada cinco minutos.

Os sensores a utilizar variam de estrutura para estrutura, de modo a satisfazer as necessidades do objetivo que esteja a ser explorado em cada caso. Para monitorizar uma estrutura, os engenheiros podem optar por diversos sensores. Para analisar e avaliar os elementos estruturais, os seguintes sensores podem ser indicados.

- **Clinómetro** – Medição de inclinações e variações angulares;
- **Acelerómetro** – Medição de acelerações em diferentes direções;
- **Sensores de nível** – Medição de variações de nível altimétrico ao longo do tempo;
- **Sensores de deslocamento** – Medição de mudanças de posição em uma estrutura ou componente estrutural ao longo do tempo;
- **Fissurómetros** – Medição de possíveis aberturas de fissuras.

Por outro lado, caso seja necessário acompanhar simultaneamente alguns agentes externos à estrutura, os sensores mencionados a seguir poderão ser alguns dos adequados.

- **Sensores de temperatura** – Medição da variação térmica do ambiente;
- **Sensores de humidade** – Medição da humidade relativa do ar;
- **Pluviómetros** – Medição da quantidade de precipitação;
- **Sismógrafos** – Detecção de movimentos sísmicos no solo;
- **Anemómetros** – Medição da velocidade e direção do vento.

A implementação de um sistema de monitorização estrutural (SHM) envolve a instalação adequada dos sensores, a definição dos intervalos de medição, a transmissão dos dados para uma central de processamento e a análise dos resultados para avaliar a integridade estrutural.

2.5. IOT- INTERNET DAS COISAS

A Internet das Coisas (IoT) é um sistema com uma arquitetura robusta, cuja aplicabilidade depende da qualidade da infraestrutura. Um sistema IoT para SHM consiste em cinco camadas diferentes, como é possível observar na Figura 2.7. No âmbito do SHM, o IoT desempenha um papel fundamental ao conectar sensores e dispositivos para monitorizar a integridade das estruturas em tempo real. Esses sensores recolhem dados como vibrações, tensões, temperaturas e danos estruturais. Esses dados são transmitidos em tempo real para análise, permitindo identificar anomalias antes que causem acidentes ou altos custos de reparação, planejar intervenções com base nas condições reais da estrutura e gerar alertas automáticos. Assim, o IoT torna-se uma mais-valia para um sistema de SHM, com a finalidade de ser mais eficiente, reduzindo custos e aumentando a segurança. [7]



Figura 2.7 - Arquitetura de IoT para SHM

2.6. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Em edifícios classificados como património cultural, é fundamental aplicar um rigor acrescido para preservá-los, sem descurar o objetivo final. Neste sentido, é possível afirmar que a utilização de métodos não destrutivos será o método mais benéfico para ambas as vertentes. Com o avanço do conhecimento tecnológico, surge também a necessidade de estudar cada vez mais a condição estrutural de edifícios através da utilização de outros métodos não destrutivos. Com o auxílio de sensores instalados em edifícios históricos, é assim permitida a análise e recolha de dados físicos da estrutura em estudo. A utilização dessas técnicas modernas de monitorização estrutural, que se baseiam na análise e interpretação de dados recolhidos por sensores, tem sido impulsionada também pelo aumento do interesse na preservação e proteção do património arquitetónico.

A inteligência artificial (IA) é uma nova tecnologia que está cada vez mais a impulsionar o mundo em diversas áreas com aplicações importantíssimas no intuito de facilitar a espécie humana. No caso da engenharia estrutural, a IA é uma aplicação que chega para prestar auxílio em variadas áreas como: [8]

- **Processo de Conceção Estrutural**

A Figura 2.8 ilustra um fluxograma que mostra o processo normal de um projeto estrutural. O processo começa com os planos arquitetónicos e segue com o pré-dimensionamento dos elementos estruturais, análise estrutural e de desempenho. Esta aplicação facilita o processo através da criação de iterações automáticas, enquanto o processo convencional é demorado, reiterativo e computacionalmente exaustivo.

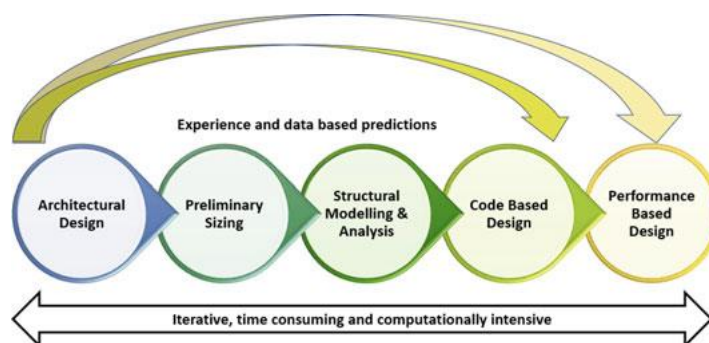


Figura 2.8 - Fluxograma de um processo de dimensionamento estrutural

- **Análise do risco sísmico**

A análise probabilística do risco sísmico aborda incertezas como magnitude, localização e hora do sismo, sendo que o cálculo do pico de aceleração do solo, ou *peak ground acceleration* (PGA), e da aceleração espectral é essencial na avaliação do risco sísmico. Recorrendo à Figura 2.9 é possível analisar uma ilustração esquemática do treino de uma rede neural artificial (RNA) para prever o PGA de movimentos do solo utilizando conjuntos de dados de movimentos fortes.

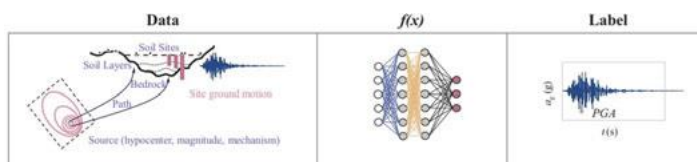


Figura 2.9 - Análise de risco estrutural

- **Análise de Fragilidade Sísmica**

A fragilidade sísmica refere-se à propensão dos elementos estruturais falharem sob atividade sísmica, sendo avaliada através de métricas como curvas de vulnerabilidade e matrizes de probabilidade de dano. A ML tem sido aplicada de modo a prever os efeitos sísmicos.

- **Otimização de elementos estruturais**

A otimização estrutural visa melhorar a eficiência, a eficácia económica e a sustentabilidade ambiental dos edifícios construídos. Novos estudos vêm apresentar uma nova abordagem de otimização estrutural através de métodos de *Deep Learning* (DL), por exemplo, estruturas de treliças.

- **Previsão de resistências do betão**

A resistência do betão é um parâmetro extremamente importante na avaliação do desempenho do mesmo em estados limites últimos e de serviço. As abordagens estatísticas, como regressão linear e não linear, são usadas para avaliar a resistência do betão, mas frequentemente produzem resultados inadequados. Algoritmos de ML têm ganho destaque por lidarem eficazmente com análises multivariáveis.

- **Monitorização do Estado Estrutural (SHM)**

A utilização de ML no tema de SHM é uma técnica recente que vem aprimorar ou facilitar o estudo da condição estrutural de uma estrutura. Através da inteligência artificial é possível aplicar técnicas de ML em inúmeras áreas do SHM.

2.6.1. MACHINE LEARNING EM SHM

As ferramentas de *machine learning* (ML) são as principais estratégias de tratamento de dados na engenharia civil, tendo se tornado cada vez mais populares e utilizadas neste campo. Estas técnicas têm vindo a ser aplicadas na monitorização do estado estrutural de uma estrutura à sua capacidade de interpretar dados computacionais e multivariados, algo que é difícil de compreender e analisar em grandes quantidades.

Esta seção descreve algumas abordagens de SHM e a deteção de anomalias em estruturas de património cultural usando técnicas de *deep learning* (DL).

2.6.1.1. Algumas abordagens de ML em SHM

A IA em SHM é um tema em ascensão e uma técnica que os investigadores procuram implementar para diferentes cenários. Com base em artigos analisados, é possível apresentar algumas aplicações de ML que foram realizadas neste domínio.

- **Previsão de falhas ou anomalias** – A previsão de falhas e anomalias representa a previsão de algum fator, utilizando registos anteriormente recolhidos de múltiplas variáveis através da sua análise. Esta previsão poderá ser aplicada em diferentes dados de acordo com o objetivo do estudo em questão;

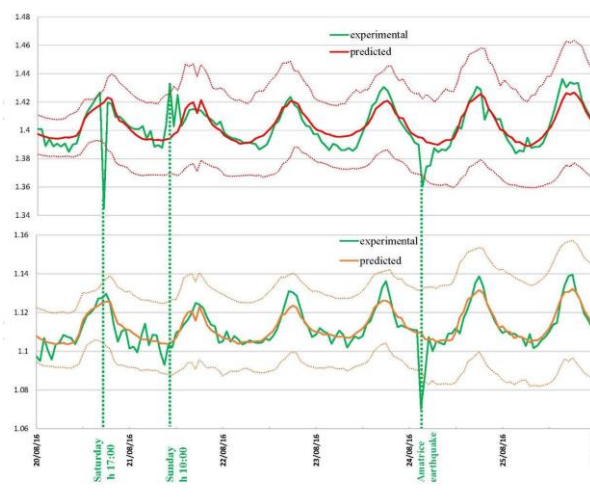


Figura 2.10 - Exemplo de deteção de anomalias através das frequências da torre de San Frediano [9]

- **Correlação entre variáveis ambientais e o comportamento da estrutura** – A correlação entre variáveis ambientais e o comportamento estrutural consiste na análise da influência entre fatores. A influência de fatores externos, como temperatura, humidade e vento, na integridade e desempenho das infraestruturas, é uma análise recorrentemente utilizada em SHM. Estes fatores podem causar deformações, fissuras ou degradação ao longo do tempo, afetando a segurança e a durabilidade das construções [10].

3

CASO DE ESTUDO

Com o objetivo de otimizar a monitorização do estado de condicionamento estrutural de um conjunto de edifícios históricos da cidade do Porto, a Metro do Porto contratou a Universidade do Porto, mais especificamente à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), para implementar medidas e tecnologias necessárias à correta análise do comportamento dessas estruturas face às obras das novas linhas de metro. O projeto envolve a monitorização de vários edifícios históricos da cidade, como a Estação de S. Bento, a Torre dos Clérigos, o Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular e a Igreja dos Congregados.

Para preservar este património edificado, foram aplicados métodos de monitorização não destrutivos, evitando danos nas estruturas e possibilitando a sua monitorização à distância.

Este projeto prevê a utilização de sistemas avançados de monitorização contínua em tempo real, permitindo uma avaliação mais dinâmica e acessível do comportamento das estruturas permitindo a deteção rápida de anomalias.

3.1. METRO DO PORTO

Em 1994, foi lançado o Concurso Público Internacional de Pré-Qualificação para a conceção, construção, equipamento e operação do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto. No entanto, apenas a 7 de dezembro de 2002 foi inaugurada ao público a primeira linha do metro, a linha A (azul).

O Metro do Porto é uma rede de transporte público ferroviário na cidade Metropolitana do Porto, composta por seis linhas de metropolitano e um total de 85 estações, servindo mais de 1 milhão de habitantes.

Apesar deste serviço ser utilizado por milhares de pessoas, sentiu-se a necessidade de expandir e desenvolver novas linhas. Este desenvolvimento visa melhorar a acessibilidade a zonas ainda não servidas pelo Metro do Porto.

A expansão das linhas do metro foi anunciada em 2020, quando foram lançados os concursos públicos para as empreitadas de construção da Linha Circular (Linha Rosa) e para a extensão da Linha Amarela.

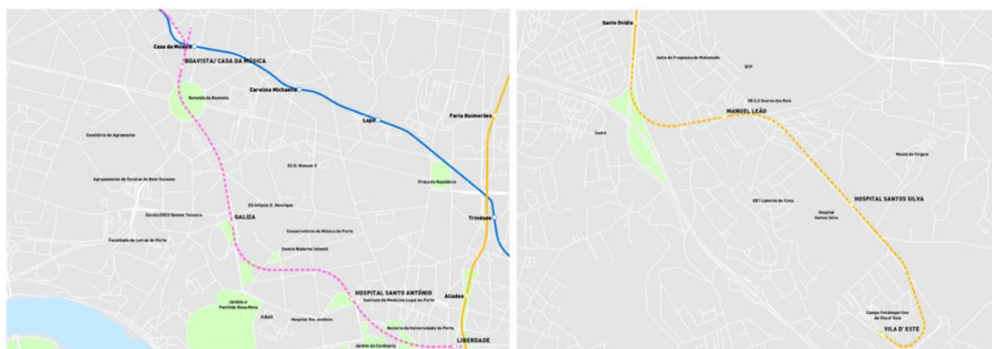


Figura 3.11 - Propostas das novas linhas de metro do Porto – Linha Rosa e Linha Amarela, respetivamente

Concentrando-se exclusivamente na Linha Rosa, esta pretende-se que marque a ligação entre duas estações já existentes, a estação de São Bento e a estação da Casa da Música. Prevê-se que esta linha funcione totalmente através de túnel e via dupla, através de uma extensão de 3 km com o objetivo final de aumentar a procura do sistema de metro, contribuir para a redução das emissões de gases poluentes e das alterações climáticas, promover o desenvolvimento económico local e a coesão social e territorial [11]. Este caminho ferroviário destaca-se por alcançar zonas da cidade Invicta marcantes, facilitando tanto os habitantes da região, como turistas e trabalhadores.

Contudo, apesar dos benefícios para o público, a expansão levanta preocupações que necessitam de monitorização. Uma vez que a construção da Linha Rosa será instalada através de túneis, esta poderá vir a perturbar as estruturas patrimoniais da cidade. Assim sendo, a FEUP entra com esse objetivo: monitorizar as estruturas em questão através de sensores de medição que leem o comportamento estrutural dos diversos monumentos.

O caso de estudo que será analisado nesta dissertação será a emblemática Estação Ferroviária de S. Bento (Figura 3.12), localizada no centro histórico do Porto, onde irá terminar a Linha Rosa na futura estação de Metro da Praça da Liberdade que interligará com a atual estação de Metro de São Bento.



Figura 3.12 - Estação de S. Bento

3.1.1. ESTAÇÃO DE S. BENTO

A Estação de S. Bento é um dos monumentos mais emblemáticos da cidade do Porto. Destaca-se entre os locais e turistas pela sua arquitetura renascentista e, especialmente, pelo seu vestíbulo/átrio revestido pelos famosos azulejos pintados pelo artista Jorge Colaço [12].

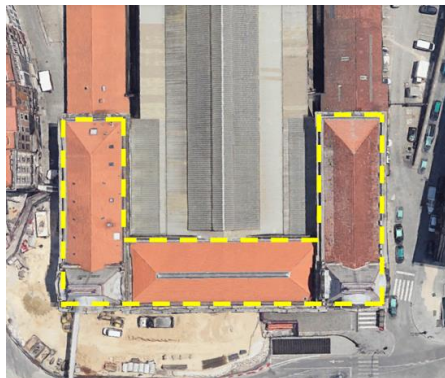
Inaugurada a 5 de outubro de 1916, a Estação de S. Bento localiza-se na Praça Almeida Garrett, no antigo Largo da Feira de São Bento, junto à Muralla Fernandina. Apresenta uma disposição em “U”, dando lugar à estação de comboios gerida pela CP – Portugal [13].

É possível caracterizar este monumento histórico como simétrico pela fachada a Oeste, onde é possível observar nos cantos da mesma os dois torreões (Torreão Norte e Torreão Sul). Ambos os torreões possuem rés-do-chão (R/C), sobreloja, dois pisos superiores e sótão, sendo que o Torreão Sul inclui ainda uma cave. A simetria do edifício não se limita aos torreões, estendendo-se também às suas fachadas laterais.

O vestíbulo possui um comprimento de 42 metros, uma largura de 14 metros e um pé-direito também de 14 metros, sendo nestas paredes interiores que se encontram os famosos azulejos. O teto do vestíbulo é composto por barrotes e vigas de madeira, apoiados numa estrutura metálica, e revestido com estuque trabalhado [14].



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 13 - (a) Visão superior da Estação de S. Bento. (b) Configuração simétrica em “U” da Estação de S. Bento. (c) Interior do vestíbulo. (d) Vista da fachada Norte e Oeste da Estação de S. Bento.

3.2. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Como já referido nesta dissertação, o principal objetivo deste estudo é monitorizar este monumento através de sensores que registam possíveis movimentos resultantes das obras do Metro do Porto. Estas intervenções, localizadas a noroeste da estação, desempenharão um papel fundamental na análise dos deslocamentos estruturais. A Figura 3.14 apresenta a localização dessas obras.



Figura 3.14 - Localização das obras do Metro do Porto

3.2.1. EQUIPAMENTOS DE MONITORIZAÇÃO

Para garantir uma monitorização eficaz da Estação de S. Bento, foram instalados um total de 51 sensores distribuídos ao longo de toda a estação abrangendo cinco tipos distintos. [14] Através da tabela seguinte é possível observar de forma sucinta os diferentes sensores utilizados neste edifício.

Tabela 1 - Tabela de sensores utilizados na Estação de S. Bento

Sensor	Quantidade	Fornecedor	Unidade	Medição
Sensor de Nível	7	KELLER	mmH2O	Variação de pressão hidrostática que permite obter o desnível de pontos relativamente a um local onde se espera não haver variação de nível.
Sensor de Deslocamento – Fissurómetro	16	Soil Instruments / Variohm	mm	Movimento de abertura ou fecho entre dois pontos.
Sensor de Rotação - Clinómetro	10	Soil Instruments	mm/m	Rotações em torno de eixos horizontais de um corpo a que se encontra fixo.
Sensor de Temperatura	15	Status Instruments	°C	Variações de Temperatura
Sensor de Vibração - Acelerómetro	3	MicroStrain-Lord	g	Acelerações da estrutura com alta resolução e baixo ruído

3.2.1.1. Sensores de nível

Estes sensores são, na verdade, sensores de pressão compostos por uma célula cerâmica para medição de baixos valores de pressão com transmissão elétrica analógica. Estes sensores registam a variação de pressão atmosférica num dado ponto a que o sensor se encontra fixado, relativamente à variação de pressão atmosférica num sensor de referência situado junto aos túneis da linha ferroviária, onde não se espera que haja uma variação de nível. Estes sensores estão ligados através de um sistema hidráulico, medindo a diferença de pressão, permitindo, assim, obter o desnível de cada ponto monitorizado relativamente ao local de referência. Este sensor também possui um sensor de temperatura integrado e um microprocessador que automaticamente realiza a compensação de efeitos térmicos que poderão afetar os resultados da medição de pressão diretamente obtida na célula. O sensor utilizado está representado na Figura 15. [14]



Figura 15 - Sensor de Nível

3.2.1.2. Sensores de deslocamento

Este sensor, do tipo potenciométrico, é fixado à estrutura a monitorizar, registando variações na distância entre pontos de fixação através do movimento de uma haste metálica no seu interior. O movimento altera a resistência do potenciômetro, gerando uma variação de tensão de saída que permite determinar, com alta precisão e resolução, alterações na distância, como aberturas ou fechos de fissuras. O sensor utilizado está representado na Figura 16. [14]



Figura 16 – Fissurómetro

3.2.1.3. Sensor de rotação - Clinómetros

Este sensor, na sua essência, é um transdutor de acelerações baseado em tecnologia MEMS, que monitoriza rotações em torno de eixos horizontais. Possui um sensor biaxial com alta sensibilidade para medir rotações absolutas em dois eixos ortogonais e um microprocessador, que compensa automaticamente os efeitos da temperatura. Na Figura 17 está representado o sensor utilizado. [14]



Figura 17 - Clinómetro

3.2.1.4. Sensores de temperatura

O sensor de temperatura utilizado mede a temperatura ambiente com base na relação entre a resistência elétrica do material e a temperatura. O material utilizado é a platina, com uma resistência de 100 Ω a 0 °C, designada como Pt100. O transmissor de temperatura converte a variação de resistência da sonda num sinal de corrente elétrica correspondente à temperatura. O modelo utilizado está representado na Figura 18. [14]



Figura 18 - Sonda de temperatura Pt100 e Transmissor de temperatura

3.2.1.5. Acelerómetro

Nesta instalação foi utilizado um sensor triaxial baseado em tecnologia MEMS para medir acelerações da estrutura com alta resolução e baixo ruído. O sensor integra uma placa de aquisição e transmissão de dados via *wireless*, com um conversor analógico-digital de 20 bits e armazenamento local de 16 MB (até 8 milhões de pontos).

Optou-se por um modelo com alimentação externa para garantir monitorização contínua, mantendo a transmissão direta dos dados ao sistema agregador via *wireless*. Este sensor é designado como “Nó de Acelerómetro” e fornece dados em três direções ortogonais (x, y e z). Na Figura 19 está representado o sensor utilizado. [14]



Figura 19 - Nó de Acelerómetro

3.2.1.6. Módulo de aquisição e registo de dados analógicos gerais

Os sensores de nível, de temperatura, de rotação (clinómetros) e de deslocamento (fissurómetros), estão ligados por cabo a módulos de aquisição e registo de dados. O equipamento utilizado, o modelo V-Link-200, permite receber sinais de sensores em tensão elétrica e transmitir os dados via *wireless* a um módulo agregador (*Gateway*). Esta solução reduz a necessidade de extensões de cabos e facilita a setorização dos sensores. [14]

O V-Link-200 possui 4 canais de entradas diferenciais e 4 canais de entrada. Inclui eletrónica integrada para aquisição, condicionamento, filtragem, registo e transmissão de dados, com um conversor analógico-digital. Dispõe de 16 MB de memória (até 5 milhões de pontos de dados) e funcionamento autónomo com bateria interna ou alimentação externa. Este equipamento permite configurações remotas e várias opções de amostragem de dados, com taxas até 8 kHz. Este módulo, em conjunto com os sensores ligados, é denominado como “Nó de Sensores de Tensão” e suporta até oito sensores analógicos. O modelo utilizado está representado na Figura 3.20. [14]



Figura 3.20 - Módulo de aquisição de dados de Tensão

3.2.1.7. Módulo de agregação de dados e de saída (*Gateway*)

Os dados recolhidos pelo módulo de aquisição e registo de dados analógicos gerais e pelos nós de acelerómetros são enviados para um módulo de agregação, também chamado “Agregador de Dados” ou “*Gateway*”.

Equipado com um processador interno e sistema operativo Linux, o *Gateway* permite configurar, coordenar e recolher dados dos módulos de aquisição tanto analógicos (Nós de Sensores) como os de acelerações (Nós de Acelerómetros). Além de centralizar os dados, transmite-os para um computador local ou para uma base de dados via *Internet*, podendo operar em tempo real ou com dados armazenados. O *Gateway* também sincroniza os sensores, fornecendo uma referência temporal contínua em todo o sistema. Na Figura 21 está representado o modelo utilizado. [14]



Figura 21 - Agregador de dados ou *Gateway*

3.2.1.8. Router de transmissão remota de dados

O sistema de monitorização é complementado por um *router*, modelo Rut240, que gera uma rede *Ethernet* local, à qual o *Gateway* está ligado por cabo. Além da rede *Ethernet* local, acessível também via *Wi-Fi*, o *router* permite comunicação com o exterior através de uma rede móvel, utilizando um cartão SIM para acesso à Internet. Com o suporte do *software WireGuard*, o *router* estabelece uma rede privada virtual (VPN) para conexão segura entre ele e um computador remoto. Isso possibilita o acesso à *Gateway* para configurar e gerir a rede de monitorização, bem como visualizar e transmitir os dados recolhidos, de forma segura e a partir de qualquer localização. O *router* utilizado está representado na Figura 22. [14]



Figura 22 - Router de transmissão de dados

3.2.2. ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO

Os sensores instalados e coordenados pela equipa da FEUP foram distribuídos por zonas (definidas em planta) e em níveis (definidos em altura). As zonas foram divididas em três categorias distintas:

- **Zona 0** – Esta zona corresponde à zona Norte da plataforma junto ao túnel, onde está localizado o sensor de nível de referência e o respetivo sensor de temperatura;
- **Zona 1** – Esta zona representa a parte final do edifício a Norte onde se encontra a caixa de escadas da ala Norte;
- **Zona 2** – Esta zona engloba às áreas de ambos os torreões (Norte e Sul) assim como a área do vestíbulo/ átrio.

Esta divisão pode ser visualizada através da figura seguinte.

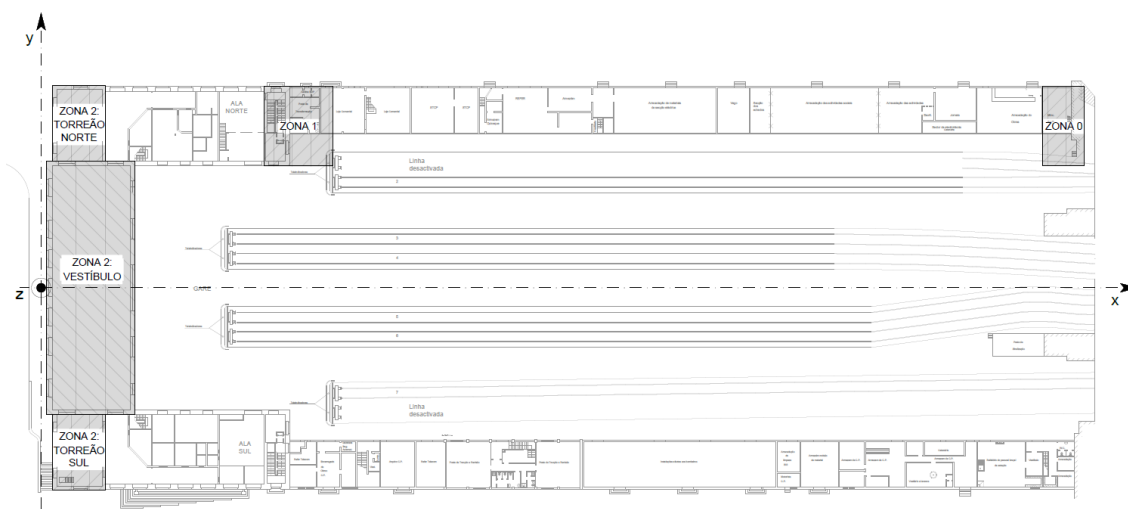


Figura 23 - Zonas de instalação de sensores de monitorização e sistema de referência global

Relativamente aos níveis, foram definidos quatro patamares distintos:

- **Nível 0** – Rés-do-chão
- **Nível 1** – Piso 1
- **Nível 2** – Piso 2 / Desvão da cobertura do vestíbulo
- **Nível 3** – Piso3 / Desvão da cobertura dos torreões.

A Zona 0 e Zona 1 contêm apenas o rés-do-chão (Nível 0), enquanto a Zona 2 abrange todos os níveis mencionados.

A Figura 24 ilustra os diferentes níveis e a localização dos sensores instalados na Zona 2.

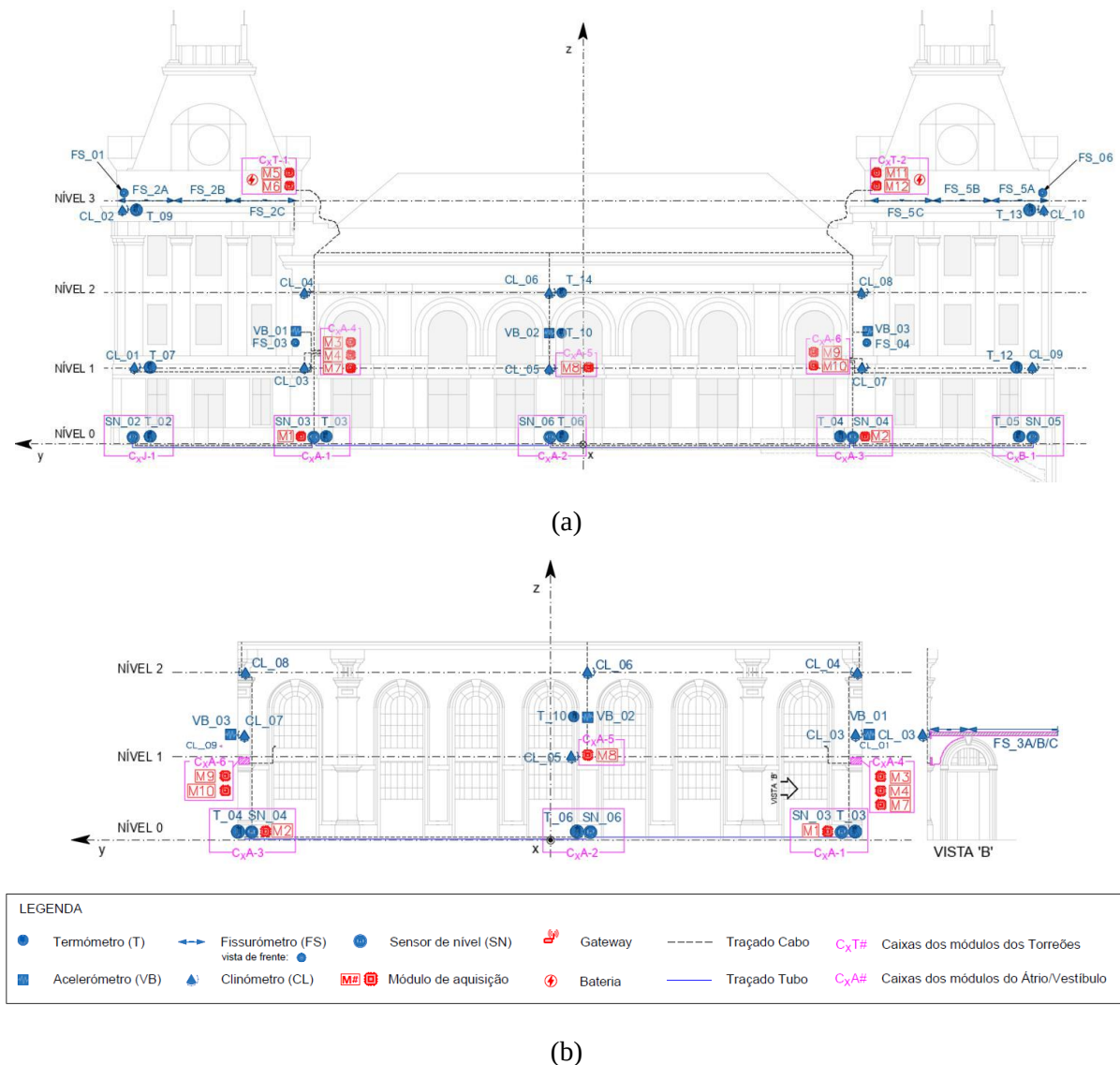


Figura 24 - Disposição da localização dos sensores utilizados relativos ao nível associado. (a) Representação do alçado exterior da fachada Oeste. (b) Representação do alçado interior da fachada Oeste

Para garantir a uniformidade dos valores registados, a equipa da FEUP definiu um sistema de referência em que:

- O eixo X coincide com o eixo de simetria da estação e estende-se no sentido positivo para Este.
- O eixo Y acompanha a fachada Oeste do edifício, com sentido positivo para Norte.
- O eixo Z está orientado verticalmente ao longo da altura do edifício, com sentido positivo correspondente à numeração crescente dos níveis.

Para padronizar a nomenclatura dos sensores e facilitar a sua identificação, a equipa adotou um sistema claro e sucinto. Cada sensor é identificado através da sua tipologia seguida de um número sequencial, na forma (Tipo_Nº).

A tabela seguinte apresenta um resumo desta nomenclatura, bem como a localização específica de cada sensor.

Tabela 2 - Nomenclatura e posição respetiva dos sensores utilizados

Sensor	Quantidade	Nomenclatura	Zona	Nível
Sensor de Nível	7	SN_Ref, SN_01	Zona 0, Zona 1	Nível 0, Nível 0
		SN_02, SN_03	Zona 2, Zona 2	Nível 0, Nível 0
		SN_04, SN_05	Zona 2, Zona 2	Nível 0, Nível 0
		SN_06	Zona 2	Nível 0
Sensor de Deslocamento – Fissurómetro	16	FS_01(A e B),	Zona 2,	Nível 3,
		FS_02(A, B e C),	Zona 2,	Nível 3,
		FS_03(A, B e C),	Zona 2,	Nível 1,
		FS_04(A, B e C),	Zona 2,	Nível 1,
		FS_05(A, B e C),	Zona 2,	Nível 3,
		FS_06(A e B)	Zona 2	Nível 3
Sensor de Rotação - Clinómetro	10	CL_01, CL_02,	Zona 2,	Nível 1, Nível 3,
		CL_03, CL_04,	Zona 2,	Nível 1, Nível 3,
		CL_05, CL_06,	Zona 2,	Nível 1, Nível 3,
		CL_07, CL_08,	Zona 2,	Nível 1, Nível 3,
		CL_09, CL_10	Zona 2	Nível 1, Nível 3
Sensor de Temperatura	15	T_00, T_01, T_02,	Zona 2,	Nível 0, Nível 0, Nível 0,
		T_03, T_04, T_05,	Zona 2,	Nível 0, Nível 0, Nível 0,
		T_06, T_07, T_08,	Zona 2,	Nível 0, Nível 1, Nível 1,
		T_09, T_10, T_11,	Zona 2,	Nível 3, Nível 1, Nível 1,
		T_12, T_13, T_14	Zona 2	Nível 1, Nível 3, Nível 2
Sensor de Vibração - Acelerómetro	3	VB_01, VB_02 e VB_03	Zona 2	Nível 1

Após a seleção e posicionamento dos sensores, foi necessário definir critérios para a instalação, garantindo que os valores registados fossem lógicos e interpretáveis:

- **Fissurómetros:** O registo dos valores foi padronizado para ser positivo no sentido da abertura das fendas, ou seja, no afastamento entre os pontos de medição.
- **Clinómetros:** Sendo sensores bidirecionais, registam valores em duas direções, designadas por A e B, conforme ilustrado na Figura 25.
 - A **direção A** mede rotações fora do plano da parede, correspondendo a rotações em torno do eixo **Y** (plano vertical XZ).
 - A **direção B** mede rotações dentro do próprio plano da parede, correspondendo a rotações em torno do eixo **X** (plano vertical YZ).

Para facilitar a interpretação dos dados, a nomenclatura dos clinómetros foi padronizada para indicar a direção medida:

- "CL_#X" para a direção B (rotação no plano da parede).
- "CL_#Y" para a direção A (rotação fora do plano da parede).

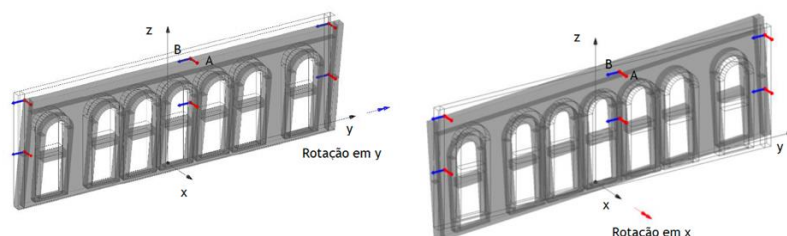


Figura 25 - Representação dos eixos tridimensionais (x, y e z) assim como as direções medidas pelos clinómetros (A e B). Rotação em torno do eixo y e rotação em torno do eixo x respetivamente.

Além disso, para um conjunto de sensores estruturais, como os clinómetros e os sensores de nível, foi associado um sensor de temperatura. O objetivo é avaliar se existe alguma correlação entre o comportamento estrutural e as variações térmicas medidas, permitindo uma análise mais precisa das condições da estrutura.

3.2.3. ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Após a aplicação dos sensores e todos os componentes estarem corretamente ligados e configurados, é possível monitorizar os valores registados. Para isso, existem algumas etapas que foram necessárias para a monitorização da estrutura. Sendo assim, através da *Gateway* e com o auxílio do *router*, os dados são enviados por via *Wi-Fi* através de uma *Virtual Private Network* (VPN) para uma base de dados de um servidor da FEUP. Esta base de dados refere-se ao local onde os dados de todos os sensores são armazenados e simultaneamente processados de modo a retirar qualquer tipo de dados indesejados, como por exemplo ruídos. Este processamento vem fazer com que a leitura dos dados seja feita de forma mais correta possível. Esta base de dados foi construída em InfluxDB, sendo esta utilizada especificamente para bases de dados de séries temporais [15]. Para visualização dos dados e exportação dos mesmos foi utilizada a Grafana que permite consultar, alertar e compreender os *dashboards* que melhor pretender.

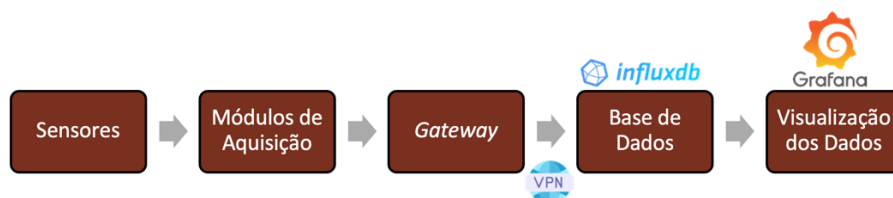


Figura 26 - Ilustração de todas as etapas para a monitorização

Por fim, após estas etapas, dá-se então início à monitorização da Estação de S. Bento. Este é um processo contínuo ao qual os engenheiros responsáveis necessitam de despende várias horas para analisar os resultados obtidos e verificar se a estrutura se encontra estável ou se existe algum motivo de alerta que seja necessário intervir.

3.3. Exploração de Relações e Padrões entre Variáveis Distintas

Após a instalação dos sensores e dos módulos, e o processamento dos dados registados, inicia-se a monitorização da estrutura. Este capítulo visa explorar em detalhe a possibilidade de identificar relações ou padrões entre determinadas variáveis medidas, analisando as suas séries temporais e avaliando a sua relevância para a compreensão do desempenho estrutural.

Para tal, a aplicação Grafana permitiu a visualização dos dados armazenados no InfluxDB. Esta ferramenta permite, além da monitorização em tempo real, a exportação dos valores medidos por cada sensor em formato CSV, garantindo a análise detalhada da estrutura. Para assegurar a coerência dos dados, foi necessário definir um intervalo temporal adequado à observação das diferentes variáveis.

Com base na análise preliminar dos registos, optou-se por um período de um ano, permitindo avaliar as variações sazonais dos sensores ao longo das diferentes estações. Para analisar os dados, foram selecionados aleatoriamente dois sensores de temperatura, cujos registos evidenciaram algumas quebras ou falhas de informação nos primeiros meses (Figura 27). Estas inconsistências poderiam comprometer a precisão da monitorização.

Assim, o intervalo de tempo final escolhido para análise foi de 01 de julho de 2023 a 01 de julho de 2024.

Nesta dissertação, a utilização de uma linguagem computacional foi essencial para garantir uma análise rápida e precisa dos dados estudados. No contexto de Big Data, a linguagem mais adequada é Python, amplamente reconhecida pela sua simplicidade e flexibilidade. Além disso, dispõe de um vasto conjunto de bibliotecas especializadas, como Pandas, NumPy e Scikit-learn, que possibilitam um processamento eficiente de grandes volumes de dados [16]. Para facilitar esta interação e análise, foi utilizado o ambiente Jupyter, uma plataforma interativa baseada na web, amplamente adotada para desenvolvimento e exploração de dados em tempo real [17].

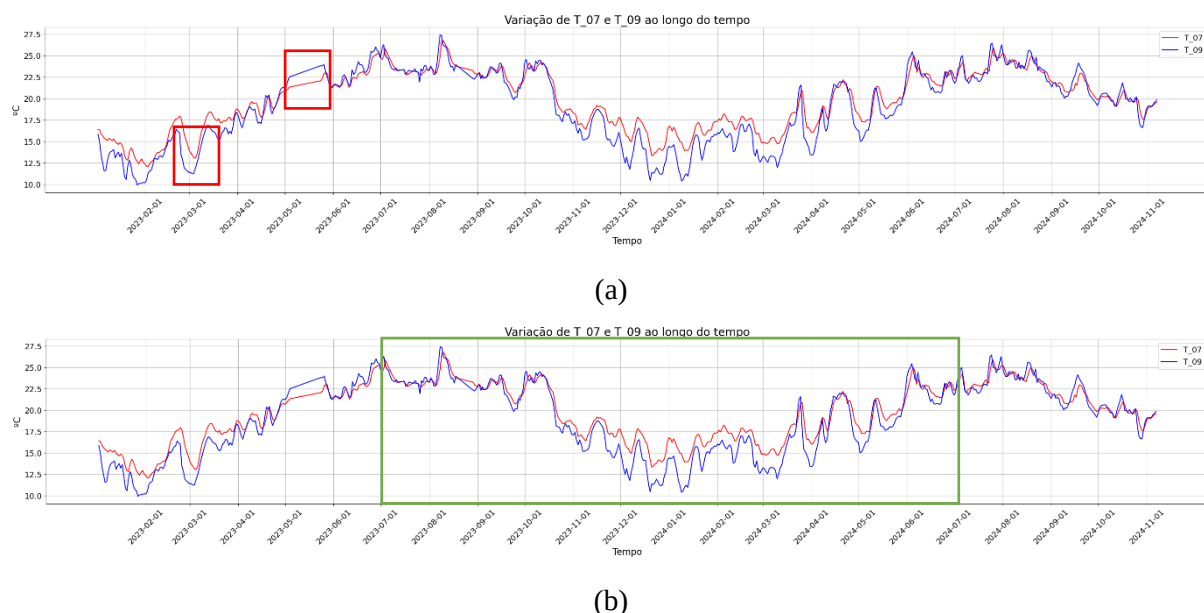


Figura 27 - Variação de T₀₇ e T₀₉ ao longo do tempo. (a) Pontos indesejados na monitorização. (b) Intervalo de tempo definido para a monitorização

3.3.1. - RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E A INCLINAÇÃO

No início da análise de monitorização da estrutura, foi possível identificar um padrão de evolução semelhante entre os valores registados pelos sensores de temperatura e os valores medidos pelos clinómetros. A Figura 28 ilustra esses valores do par temperatura-clinómetro ao longo do ano designado, no qual é possível observar um padrão semelhante entre estes dois elementos. Ambos os gráficos apresentam os valores médios diários, com o objetivo de facilitar a leitura e o processamento dos dados.

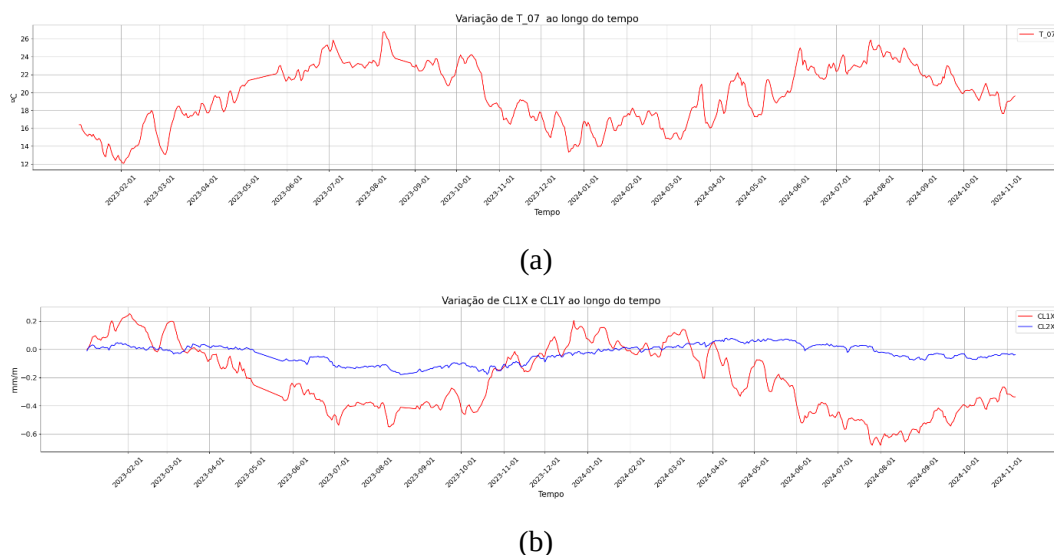


Figura 28 - Variação dos valores registados do par Temperatura-Clinómetro no decorrer de um ano. (a) Variação de T_{07} ao longo do tempo. (b) Variação de CL1X e CL1Y ao longo do tempo

Ao observar as variações ao longo do tempo, nota-se um aumento da temperatura nos meses de verão, seguido por uma diminuição nos meses de inverno. No entanto, ao analisar os dados dos clinómetros, verifica-se uma variação inversa em relação à temperatura: uma diminuição nos valores durante o verão e um aumento nos meses de inverno.

Com a identificação desse padrão entre os valores de temperatura e inclinação, surgiu a questão de investigar se existe uma relação direta entre estes dois fatores. O objetivo foi analisar os valores de inclinação com a eliminar a influência da temperatura. Em outras palavras, a ideia era "expurgar" o efeito da temperatura dos valores de inclinação.

Para isso, foi proposto um método de regressão linear, onde se traçou a reta de maior regressão entre os valores de temperatura e inclinação. Subtraindo-se o valor da reta de regressão aos valores observados nos clinómetros, obteve-se os valores de inclinação ajustados, ou seja, sem a influência da variação térmica.

No exemplo a seguir é apresentado o guia praticado para um par Temperatura-Inclinação, na tentativa de explicar de forma mais clara o procedimento registado.

Inicialmente, ao executar um notebook no Jupyter pela primeira vez, é necessário importar as bibliotecas que serão utilizadas. Algumas das bibliotecas mais relevantes para este estudo incluem o Pandas, NumPy e Scikit-learn.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import r2_score
```

Figura 29 - Bibliotecas utilizadas

No caso do clinómetro registado como CL_01 e o sensor de temperatura associado T_07, após a importação dos dados dos sensores para o notebook, foi gerado um dataframe denominado "CL1", composto pelos valores relatados da temperatura e os valores de inclinação registados nos eixos x e y (Figura 30). É necessário destacar que foi considerada a data de registo de cada sensor, de modo que cada valor da temperatura esteja corretamente associado os valores de inclinação.

	T_07_Temperature	CL_1X_Rotation	CL_1Y_Rotation
0	24.579811	-0.473559	-0.125661
1	24.861264	-0.521506	-0.125856
2	25.841912	-0.537677	-0.112114
3	25.481257	-0.494925	-0.120088
4	25.018392	-0.468462	-0.126919
...	...	...	...
343	22.727385	-0.463171	0.027030
344	22.801488	-0.474465	0.020556
345	23.284936	-0.483336	0.020290
346	22.973996	-0.468061	0.025763
347	22.335780	-0.445044	0.020428

348 rows x 3 columns

Figura 30 - Dataframe CL1

Após gerado o *dataframe* CL1, procedeu-se à visualização do gráfico da inclinação em função da temperatura. Para isso, foi utilizado o algoritmo apresentado na Figura 31.

```
x = CL1['T_07_Temperature'].values.reshape(-1, 1)
y = CL1['CL_1X_Rotation'].values

# Coeficientes da reta de regressão
coef = np.polyfit(CL1['T_07_Temperature'], CL1['CL_1X_Rotation'], 1)
slope, intercept = coef # Inclinação e intercepto
x_fit = np.linspace(CL1['T_07_Temperature'].min(), CL1['T_07_Temperature'].max(), 100)
y_fit = slope * x_fit + intercept

# Criação do modelo de regressão linear
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(x, y)

# Cálculo do coeficiente de determinação
r2 = r2_score(y, y_pred)

# Plot
plt.scatter(CL1['T_07_Temperature'], CL1['CL_1X_Rotation'], color='blue', s=5, label='Dados') # Pontos
plt.plot(x_fit, y_fit, color='red', label=f'Reta: y = {slope:.2f}x + {intercept:.2f}') # Retas
plt.xlabel('T_07_Temperature')
plt.ylabel('CL_1X_Rotation')
plt.title(f'Reta de Regressão (R² = {r2:.2f})')
plt.legend()
plt.ylim(-1, 1)

plt.show()
```

Figura 31 - Algoritmo para o gráfico da inclinação em função da temperatura

Após correr o algoritmo, os resultados dos *outputs* são os seguintes.

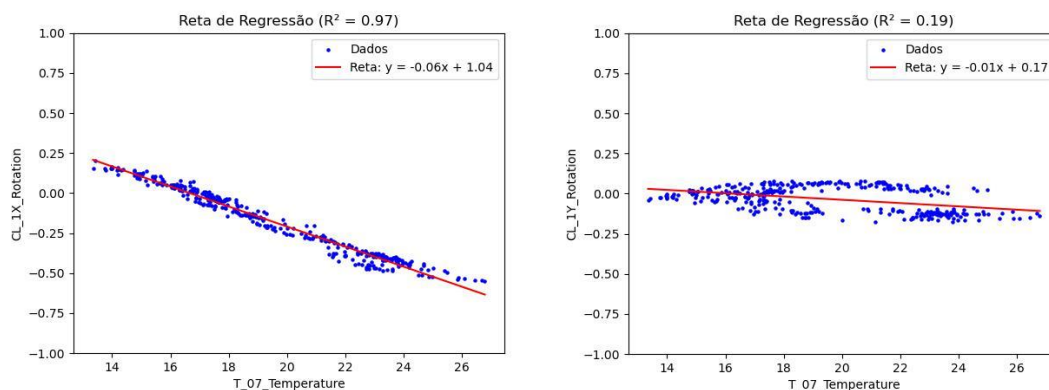


Figura 32 - Gráfico de CL1X e CL1Y em função da temperatura, respetivamente

Observando os gráficos obtidos, é possível verificar que existe uma relação quase direta entre a temperatura e a inclinação de CL_1 em torno do eixo do x. Além da clara aproximação dos valores registados à reta de regressão, também se pode confirmar essa correlação através do coeficiente de determinação, que é muito próximo de 1. No entanto, a mesma relação não pode ser observada na inclinação em torno do eixo y, onde existe, para a mesma temperatura, existem valores de inclinações diferentes. Esta conclusão pode ser mais fundamentada através do coeficiente de determinação ser consideravelmente menor.

Assim sendo, pode-se partir para a correção dos valores de CL_1X retirando o efeito da temperatura.

Com isso, é possível seguir para a correção dos valores de CL_1X, removendo o efeito da temperatura. Para isso, foi feito um ajuste (*offset*) nos valores de temperatura, onde a temperatura média corresponderia a uma inclinação igual a zero. Após esse ajuste, foi subtraída a nova reta de regressão dos valores reais da inclinação, obtendo assim os valores de CL_1X corrigidos.

Através da figura seguinte é possível analisar o código utilizado para o descrito anteriormente.

```
##### MÉDIA DAS TEMPERATURAS
media_T_07 = CL1['T_07_Temperature'].mean()
print()
print('Temperatura_07 média é =', media_T_07)
print()

##### MUDAR OFFSET
dif = slope * media_T_07 + intercept
intercept = intercept - dif
print('Offset =', slope, '=', 'dT + ', intercept)
print()

##### CÁLCULO DAS INCLINAÇÕES/AÇÃO DA TEMPER.
CL1X_ = {'CL1X_': []}
CL1X_ = pd.DataFrame(CL1X_)
a = 0

while a != len(CL1):
    CL1X_.loc[a] = CL1.loc[a, 'CL1X_Rotation'] - (slope * CL1.loc[a, 'T_07_Temperature'] + intercept)
    a = a + 1

CL1X_ = pd.concat([CL1X_, CL1['T_07_Temperature']], axis=1)
CL1X_

##### GRÁFICO INCLINAÇÕES-TEMPO

x = CL1X_['T_07_Temperature'].values.reshape(-1, 1)
y = CL1X_['CL1X_'].values

# Coeficientes da reta (grau 1 para reta)
coef = np.polyfit(CL1X_['T_07_Temperature'], CL1X_['CL1X_'], 1)
slope, intercept = coef # Inclinação e intercepto
x_fit = np.linspace(CL1X_['T_07_Temperature'].min(), CL1X_['T_07_Temperature'].max(), 100)
y_fit = slope * x_fit + intercept

# Criação do modelo de regressão linear
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(x, y)

# Cálculo do coeficiente de determinação
r2 = r2_score(y, y_pred)

# Plot
plt.scatter(CL1X_['T_07_Temperature'], CL1X_['CL1X_'], color='blue', s=5, label='Dados') # Pontos
plt.plot(x_fit, y_fit, color='red', label=f'Reta: y = {slope:.2f}x + {intercept:.2f}') # Retas
plt.xlabel('T_07_Temperature')
plt.ylabel('CL1X_')
plt.title(f'Reta de Regressão (R² = {r2:.2f})')
plt.legend()
plt.ylim(-1, 1)

plt.show()
```

Figura 33 - Algoritmo utilizado na correção de CL_1X

Através deste algoritmo, foi possível obter o seguinte *output*.

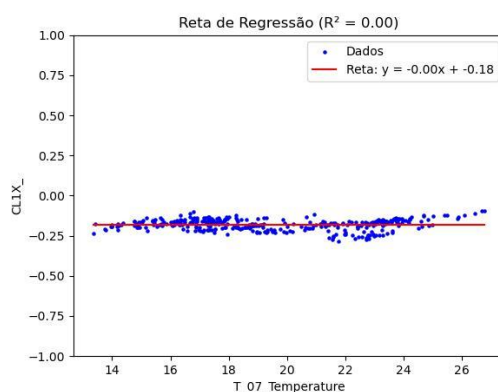


Figura 34 - Gráfico de CL1X corrigido em função da temperatura

Analisando o resultado do algoritmo anteriormente apresentado, é possível afirmar que o mesmo é satisfatório. A razão para esta conclusão deve-se à aproximação dos resultados à nova reta de regressão e à horizontalidade da mesma. Esta horizontalidade justifica-se por deixar de existir qualquer correlação entre os valores da temperatura com os valores da inclinação. Para além da reta de regressão, esta conclusão pode ser confirmada pelo coeficiente de determinação, que é igual a 0.

Assim sendo, comparando os valores da inclinação ao longo do tempo, apresentados na Figura 35, é observável que as oscilações dos valores da inclinação do sensor CL_1X tiveram uma significativa diminuição, justificando, assim, novamente, a não existência de uma relação entre a inclinação e a temperatura após correção.

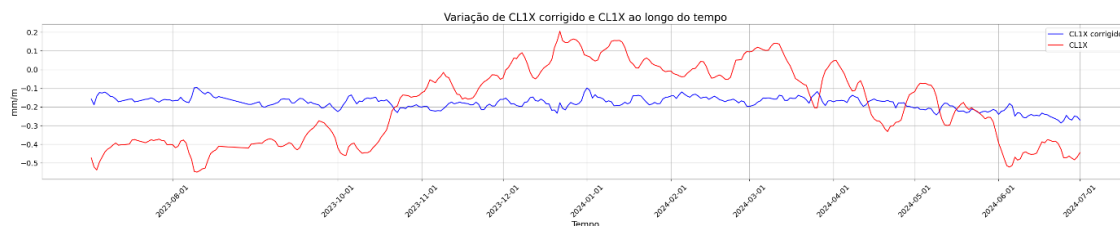


Figura 35 - Variação do CL_1X corrigido e CL_1X ao longo do tempo

O procedimento apresentado foi realizado para uma agregação das medições ao dia, porém também foi explorado este procedimento para uma agregação à hora.

A verificação dos valores agregados à hora foi realizada com o intuito de analisar se existe alguma diferença significativa em relação à agregação ao dia que pudesse ser relevante na monitorização da estrutura.

Deste modo, todo o processo realizado anteriormente foi novamente utilizado para a obtenção dos resultados com agregação à hora.

Após o processo de expurgar a ação da temperatura aos valores da inclinação, com os valores registados agregados à hora, os resultados obtidos estão representados na Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

Através da comparação dos resultados obtidos entre os valores agregados ao dia e à hora, pode-se afirmar que não existe uma discrepância significativa de valores. Assim sendo, irá optar-se por utilizar os valores registados pelos sensores com agregação ao dia por facilitar a leitura e interpretação dos resultados, assim como facilita para uma maior fluidez no processamento computacional.

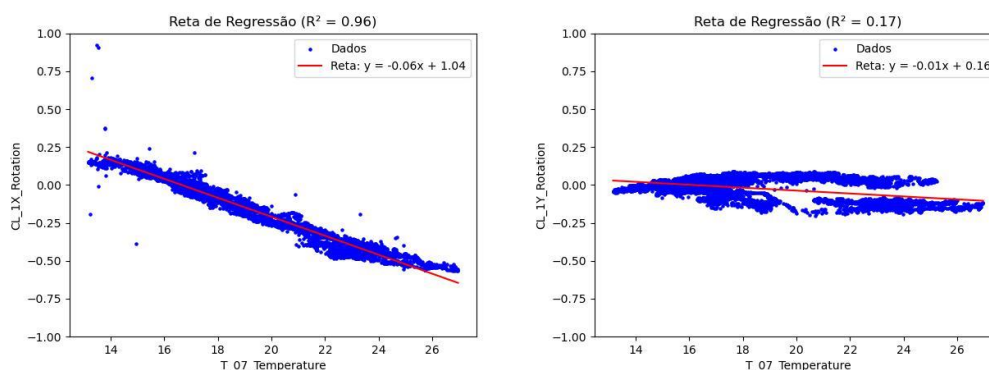


Figura 36 - Gráfico de CL1X e CL1Y não corrigidos agregados à hora em função da temperatura, respetivamente

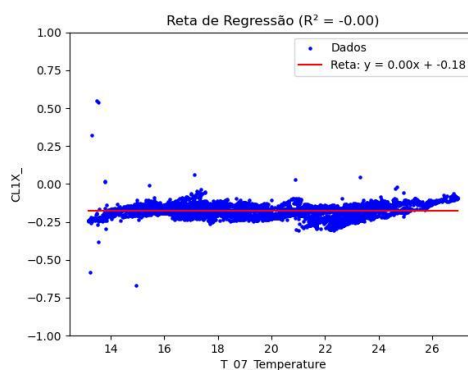


Figura 37 - Gráfico de CL1X agregado à hora corrigido em função da temperatura

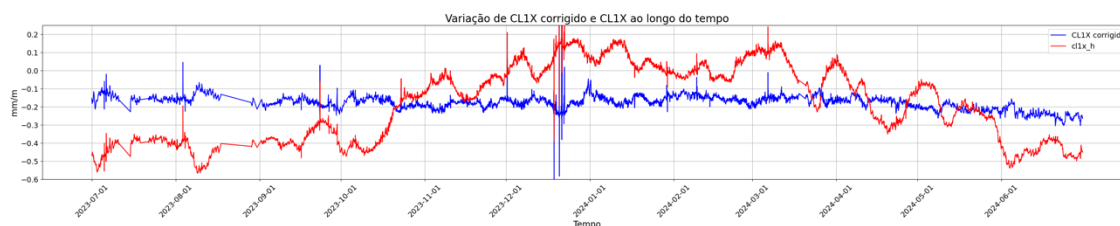


Figura 38 - Variação do CL_1X corrigido e CL_1X com agregação à hora ao longo do tempo

As conclusões retiradas de CL_1Y foram idênticas em outros sensores. Através desta análise, foram descobertos outros sensores aos quais um dos eixos de medição não continha uma correlação evidente com a temperatura associada. Deste modo, foi designado um valor limite ao coeficiente de correlação. Assim, apenas será necessária uma correção aos sensores de cada eixo, caso o coeficiente de determinação seja superior a 75%.

Este processo foi repetido para cada par de sensores de temperatura e inclinação de modo a obter-se os valores corrigidos de todos os sensores.

3.3.1.1. Vetor e ângulo resultante das inclinações

Os valores registados pelos clinómetros são de grande importância para a monitorização de uma estrutura, visto que descrevem o comportamento da mesma através das medições das rotações. De referir que estarão a ser realizadas obras muito próximas da Estação de S. Bento, sendo necessário monitorizar estas inclinações constantemente.

Assim como já referido anteriormente, os clinómetros registam valores em dois eixos ortogonais (rotação em torno de x e rotação em torno de y). Assim, a álgebra linear afirma-nos que, através dos dois vetores de inclinação, poderá gerar-se um vetor resultante. A realização do vetor resultante poderá ser um conceito interessante a ser estudado, sendo mais clara a análise do vetor ao invés da análise dos valores da composição do mesmo. Deste modo, a exploração do vetor resultante será um fator essencial na análise da direção da inclinação das paredes da estação, dando uma visão mais clara do funcionamento da estrutura da estação.

Utilizando novamente como exemplo os valores registados pelo clinómetro CL_01, optou-se por gerar um *dataframe* “CL1” que contivesse os valores de temperatura e os valores da inclinação, tanto em torno de x como em torno de y. A Figura 39 apresenta o *dataframe* CL1.

	Time	T_07_Temperature	CL_1X_Rotation	CL_1Y_Rotation
0	2023-07-02 00:00:00+00:00	24.579811	-0.473559	-0.125661
1	2023-07-03 00:00:00+00:00	24.861264	-0.521506	-0.125856
2	2023-07-04 00:00:00+00:00	25.841912	-0.537677	-0.112114
3	2023-07-05 00:00:00+00:00	25.481257	-0.494925	-0.120088
4	2023-07-06 00:00:00+00:00	25.018392	-0.468462	-0.126919
...	...	...	...	...
343	2024-06-27 00:00:00+00:00	22.727385	-0.463171	0.027030
344	2024-06-28 00:00:00+00:00	22.801488	-0.474465	0.020556
345	2024-06-29 00:00:00+00:00	23.284936	-0.483336	0.020290
346	2024-06-30 00:00:00+00:00	22.973996	-0.468061	0.025763
347	2024-07-01 00:00:00+00:00	22.335780	-0.445044	0.020428

348 rows x 4 columns

Figura 39 - Dataframe CL1

Através do *dataframe* CL1 procedeu-se ao cálculo do valor do ângulo e da norma do vetor resultante. Para os valores dos ângulos resultantes, foram considerados os sinais em x e em y, com o objetivo de resultar em valores concordantes e com o mesmo sentido positivo. Na Figura 40 apresenta-se o algoritmo utilizado para a realização dessa tarefa.

```

a = 0
Resultante_CL1 = {'CL1 Resultante': [], 'CL1 Resultante': []}
Resultante_CL1 = pd.DataFrame(Resultante_CL1)
Resultante_CL1

while a != len(CL1):
    if CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation'] > 0 and CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation'] > 0:
        x = CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation']
        y = CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation']
        angulo_radianos = math.atan2(y, x)
        angulo_graus = math.degrees(angulo_radianos)
        Resultante_CL1.loc[a, 'CL1 Resultante'] = angulo_graus

    elif CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation'] < 0 and CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation'] < 0:
        x = CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation']
        y = CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation']
        angulo_radianos = math.atan2(y, x)
        angulo_graus = math.degrees(angulo_radianos)
        angulo_graus = angulo_graus + 360
        Resultante_CL1.loc[a, 'CL1 Resultante'] = angulo_graus

    elif CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation'] > 0 and CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation'] < 0:
        x = CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation']
        y = CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation']
        angulo_radianos = math.atan2(y, x)
        angulo_graus = math.degrees(angulo_radianos)
        angulo_graus = angulo_graus + 360
        Resultante_CL1.loc[a, 'CL1 Resultante'] = angulo_graus

    elif CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation'] < 0 and CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation'] > 0:
        x = CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation']
        y = CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation']
        angulo_radianos = math.atan2(y, x)
        angulo_graus = math.degrees(angulo_radianos)
        Resultante_CL1.loc[a, 'CL1 Resultante'] = angulo_graus

    a = a + 1

a = 0
while a != len(CL1):
    Resultante_CL1.loc[a, 'CL1 Resultante'] = math.sqrt(CL1.loc[a, 'CL_1X_Rotation']**2 + CL1.loc[a, 'CL_1Y_Rotation']**2)
    a = a + 1

Resultante_CL1

```

Figura 40 - Algoritmo utilizado no cálculo da norma e do ângulo do vetor resultante

Posto isto, a Figura 41 é o resultado do novo *dataframe* gerado, “Resultante _CL1” que contém os valores da norma e do ângulo do vetor resultante em cada coluna, respetivamente.

	CL1 Resultante	CL1 Δ Resultante
0	0.489948	194.861166
1	0.536478	193.567880
2	0.549241	191.778327
3	0.509285	193.638569
4	0.485351	195.159089
...	...	...
343	0.463959	176.660036
344	0.474910	177.519211
345	0.483762	177.596239
346	0.468770	176.849495
347	0.445513	177.371969

348 rows x 2 columns

Figura 41 - Dataframe Resultante_CL1

Com este *dataframe*, Resultante_CL1, foi então possível traçar os gráficos da norma e do ângulo do vetor resultante em função ao tempo, como demonstrado na Figura 42. Através destes gráficos pode-se analisar a variação dos resultados.



(a)



(b)

Figura 42 - Gráficos da norma e do ângulo em função ao tempo (a) Variação da norma do vetor CL1X não corrigido ao longo do tempo. (b) Variação de CL1 Δ Resultante ao longo do tempo

Apesar de ser possível recolher informação através dos gráficos da Figura 42, poderia ser benéfico observar os valores da norma e do ângulo do vetor resultante através dos valores das inclinações corrigidas. Assim, esperar-se-ia obter valores mais concretos do comportamento da estrutura sem a ação da temperatura.

Com essa finalidade, o método anteriormente explicado foi utilizado para os valores corrigidos, do qual resultou dos seguintes gráficos.



(a)



(b)

Figura 43 - Gráficos da norma e do ângulo, através valores de inclinação corrigidos, em função ao tempo (a) Variação da norma do vetor CL1 corrigido ao longo do tempo. (b) Variação de CL1 e Resultante corrigida ao longo do tempo

Comparando os resultados obtidos na Figura 43, pode-se constatar que os resultados dos gráficos gerados a partir das inclinações corrigidas serão muito mais vantajosos para a interpretação dos resultados.

Assim sendo, pode-se concluir que o vetor de inclinação da parede, ao qual o inclinómetro CL_01 pertence, varia entre aproximadamente entre os 0.1 e 0.3 mm/m e o ângulo varia aproximadamente entre 135° e 235°. O que estes resultados explicam é que o vetor, fruto das inclinações registadas pelo CL_01, se mantém quase constante, não existindo quebras repentinas nos dados, o que pode indicar sobre o bom comportamento da parede.

Outro método que pode ser explorado é a representação gráfica destes vetores. Esta ideia surgiu devido à falta de clareza visual na leitura dos resultados e, por essa razão, foram implementados os valores dos vetores resultantes num campo vetorial para uma representação mais perceptível.

Com esse propósito, foi utilizado o algoritmo descrito na Figura 44, e os outputs são apresentados na Figura 45. Dos resultados obtidos pode-se notar, mais uma vez, uma maior clareza no campo vetorial dos valores de inclinação e, conseqüentemente, uma melhor percepção da direção da inclinação da parede.

Este campo vetorial representa as inclinações medidas ao longo do tempo, onde os valores do eixo y correspondem à ordem temporal dos registos e os valores dos eixos x e y indicam as componentes da inclinação em cada direção. Além disso, a escala de cores utilizada reflete a magnitude da inclinação, permitindo identificar variações mais acentuadas de forma visual

```
# Usar os índices como coordenadas X
X = np.arange(len(CL1)) # Índices do DataFrame
Y = np.zeros(len(CL1)) # Manter Y fixo se necessário

# Componentes vetoriais
U = CL1['CL_1X_Rotation'].values # Componente X
V = CL1['CL_1Y_Rotation'].values # Componente Y

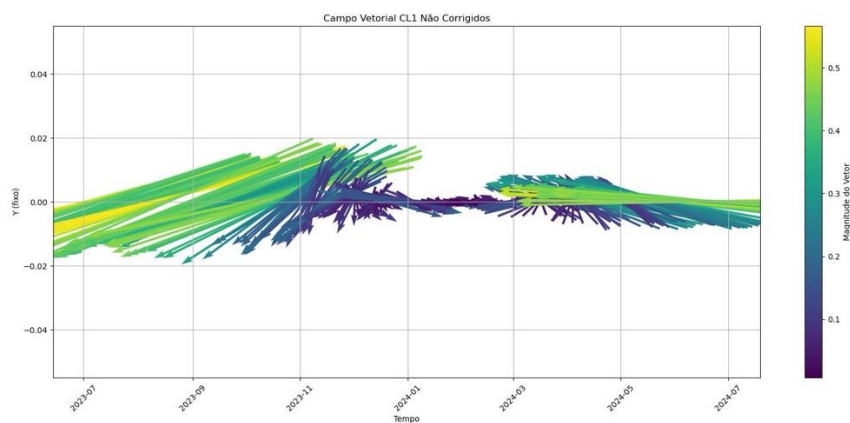
# Plotar o campo vetorial
plt.figure(figsize=(20, 8))
plt.quiver(X, Y, U, V, np.sqrt(U**2 + V**2), cmap='viridis', scale=1, pivot='middle')

# Configurações do gráfico
plt.title("Campo Vetorial CL1 Não Corrigidos")
plt.xlabel("Índice do DataFrame")
plt.ylabel("Y (fixo)")
plt.colorbar(label="Magnitude do Vetor")
plt.grid(True)

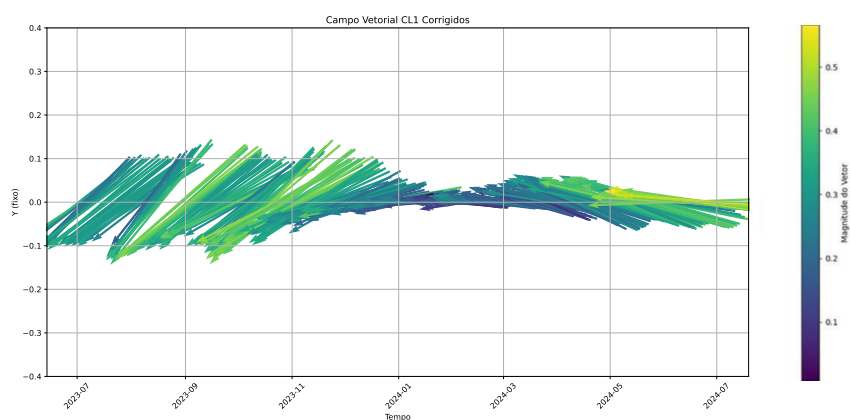
# Exportar o gráfico para um ficheiro PDF
plt.savefig('CL1_Campo_Vetorial_Não_Corrigido.jpg', format='jpg') # Salva como PDF

plt.show()
```

Figura 44 - Algoritmo utilizado para a representação do campo vetorial



(a)

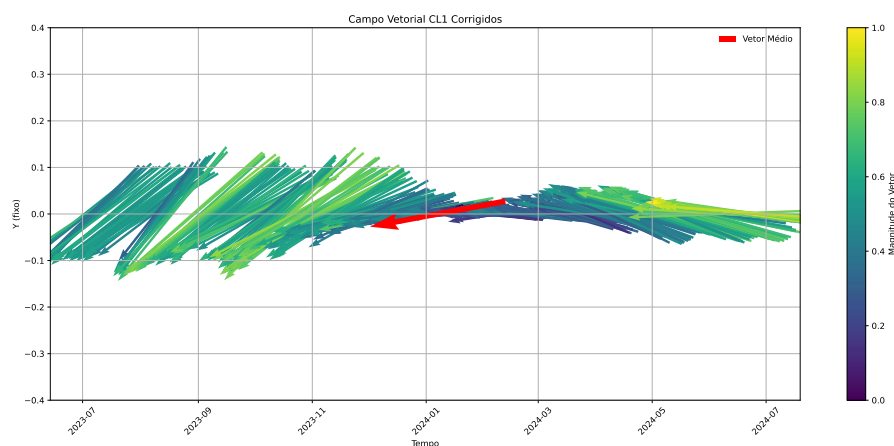


(b)

Figura 45 - Representação gráfica dos vetores resultantes num campo vetorial. (a) Campo vetorial CL_01 não corrigidos. (b) Campo vetorial CL_01 corrigidos

Após análise dos resultados dos campos vetoriais, pode-se concluir, novamente, que os valores dos clinómetros corrigidos permitem fazer uma análise muito mais clara do comportamento estrutural, sendo estes vetores a representação gráfica da inclinação da parede no local em que o sensor estará a medir.

Para melhor confirmar esta representação, a figura seguinte demonstra o vetor médio de todos os vetores resultantes, tanto na sua magnitude, como na sua inclinação. Ainda nesta figura foi representado o vetor médio na Estação de S. Bento com o objetivo de gerar uma melhor ideia da direção do vetor médio.



(a)



(b)

Figura 46 - Vetor médio de todos os vetores resultantes do clinómetro CL_01 (a) Representação do vetor médio no campo vetorial. (b) Representação do vetor médio na Estação de S. Bento

Através da Figura 46 (b) pode-se observar o vetor médio da inclinação registada pelo sensor CL_01 e a sua orientação relativa à da estação de São Bento no local onde o sensor se encontra situado, o que contribui para facilitar alguma interpretação de uma eventual relação entre as obras realizadas à frente da estação e o comportamento estrutural daquela parede. Este vetor, apesar de permanecer com a inclinação real, não representa a magnitude do mesmo, sendo uma representação gráfica.

Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados obtidos pelos métodos utilizados anteriormente na análise das ações da inclinação sem a ação da temperatura (para x e y respetivamente), assim como a análise da norma dos vetores resultantes e da inclinação dos mesmos nos restantes sensores.

Os quadros seguintes encontram-se organizados com a apresentação dos gráficos Inclinação-Temperatura com valores não corrigidos. Por baixo destes gráficos, poder-se-á encontrar os gráficos relativos à norma e ao ângulo dos vetores resultantes das inclinações não corrigidas. Posteriormente, são representados os mesmos gráficos, porém utilizando as inclinações corrigidas. É relevante salientar que

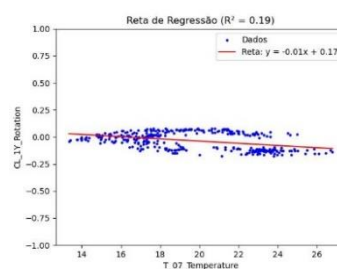
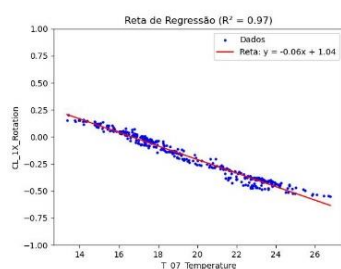
cada página se refere a um clinómetro diferente, começando pelo sensor CL_01 avançando gradualmente até ao sensor CL_10.

Após este diagnóstico, é possível observar a representação dos campos vetoriais, onde cada linha representa um sensor distinto, começando pelo sensor CL_01, avançando gradualmente até ao sensor CL_10, em que à esquerda se encontram os vetores resultados das inclinações não corrigidas e, à direita, os vetores resultados das inclinações corrigidas.

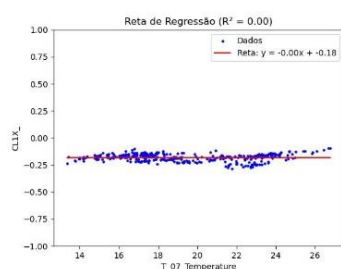
Por fim, apresenta-se nos últimos quadros a variação dos sensores corrigidos ao longo do tempo.

CL_01

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS



N/A

RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



RESULTANTE - CORRIGIDAS

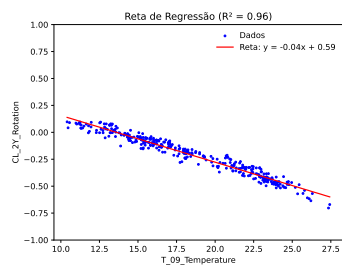
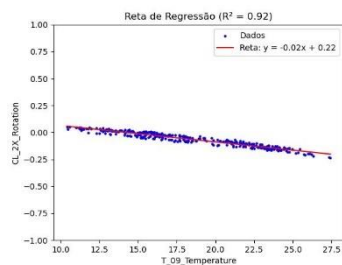


ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS

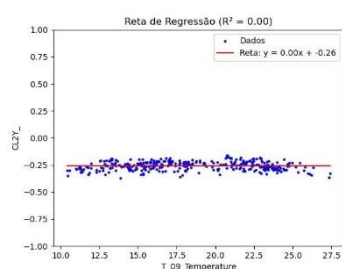
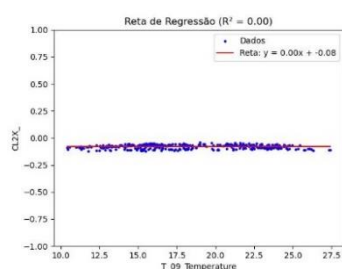


CL_02

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS



RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



RESULTANTE - CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS

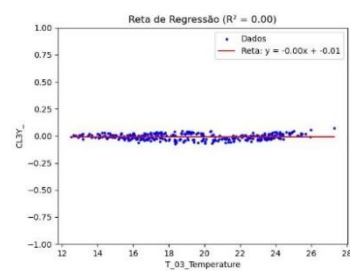
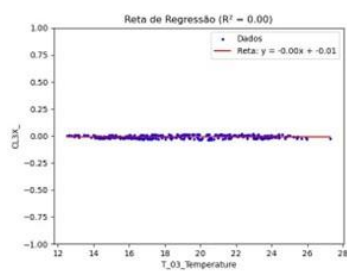


CL_03

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS



RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS

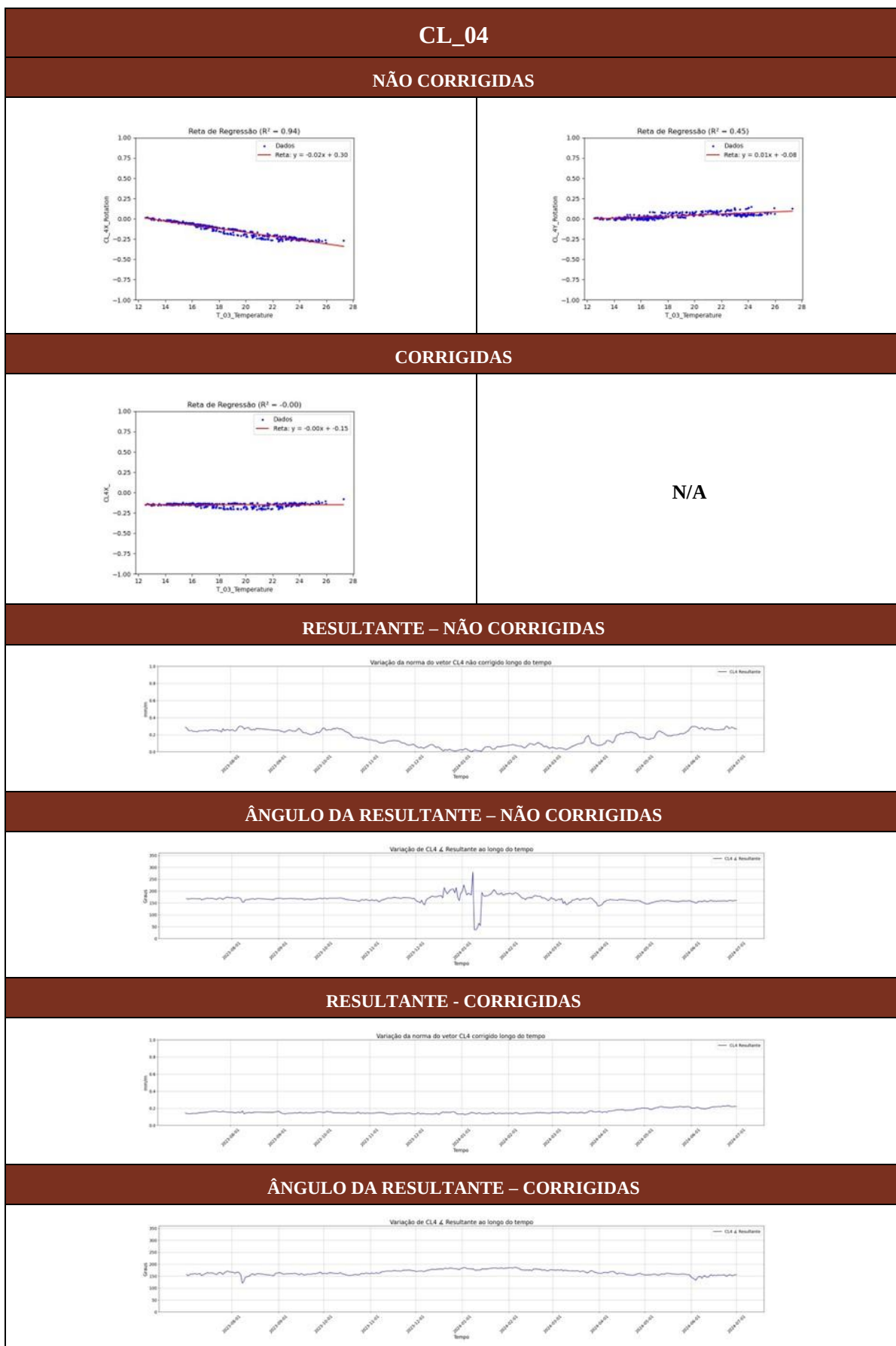


RESULTANTE - CORRIGIDAS



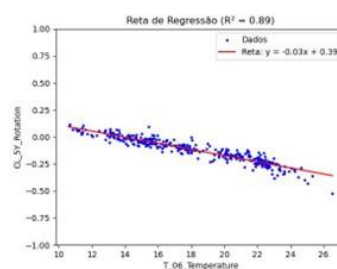
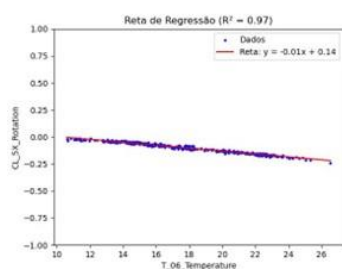
ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS



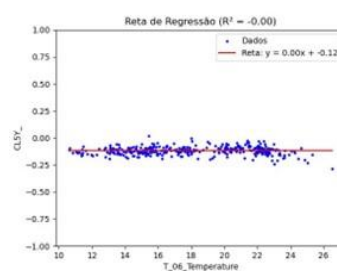
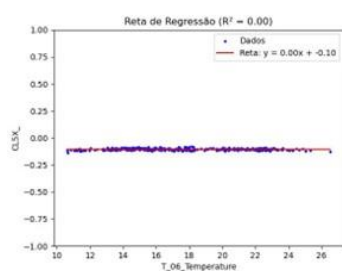


CL_05

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS



RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS

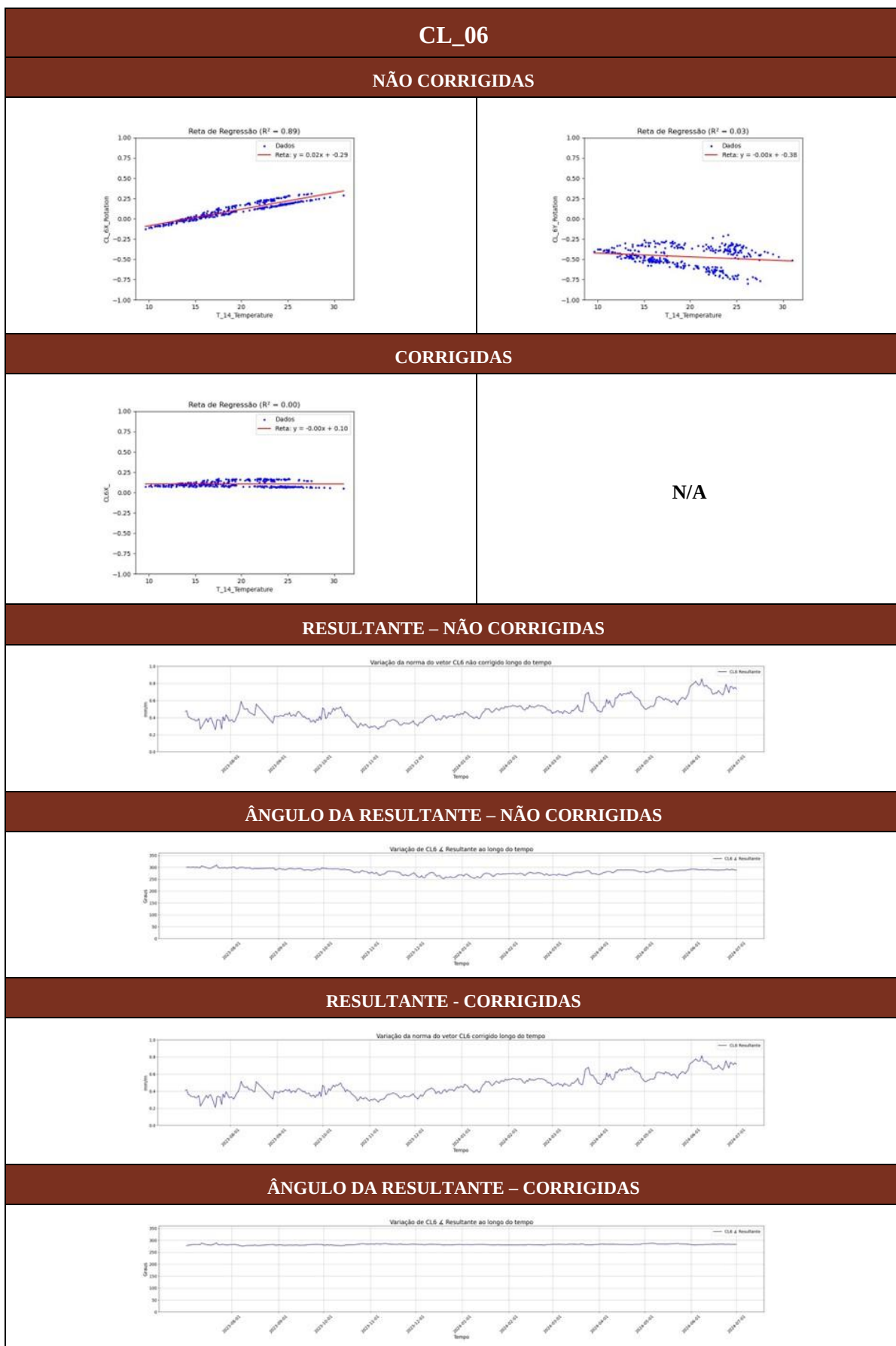


RESULTANTE - CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS





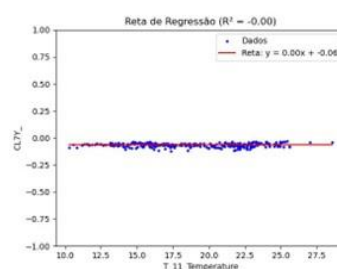
CL_07

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS

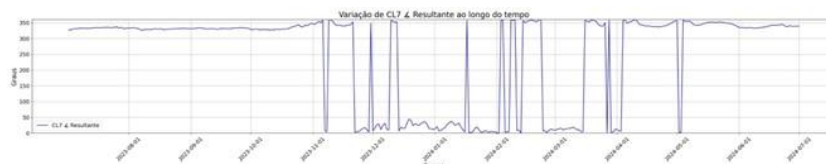
N/A



RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS

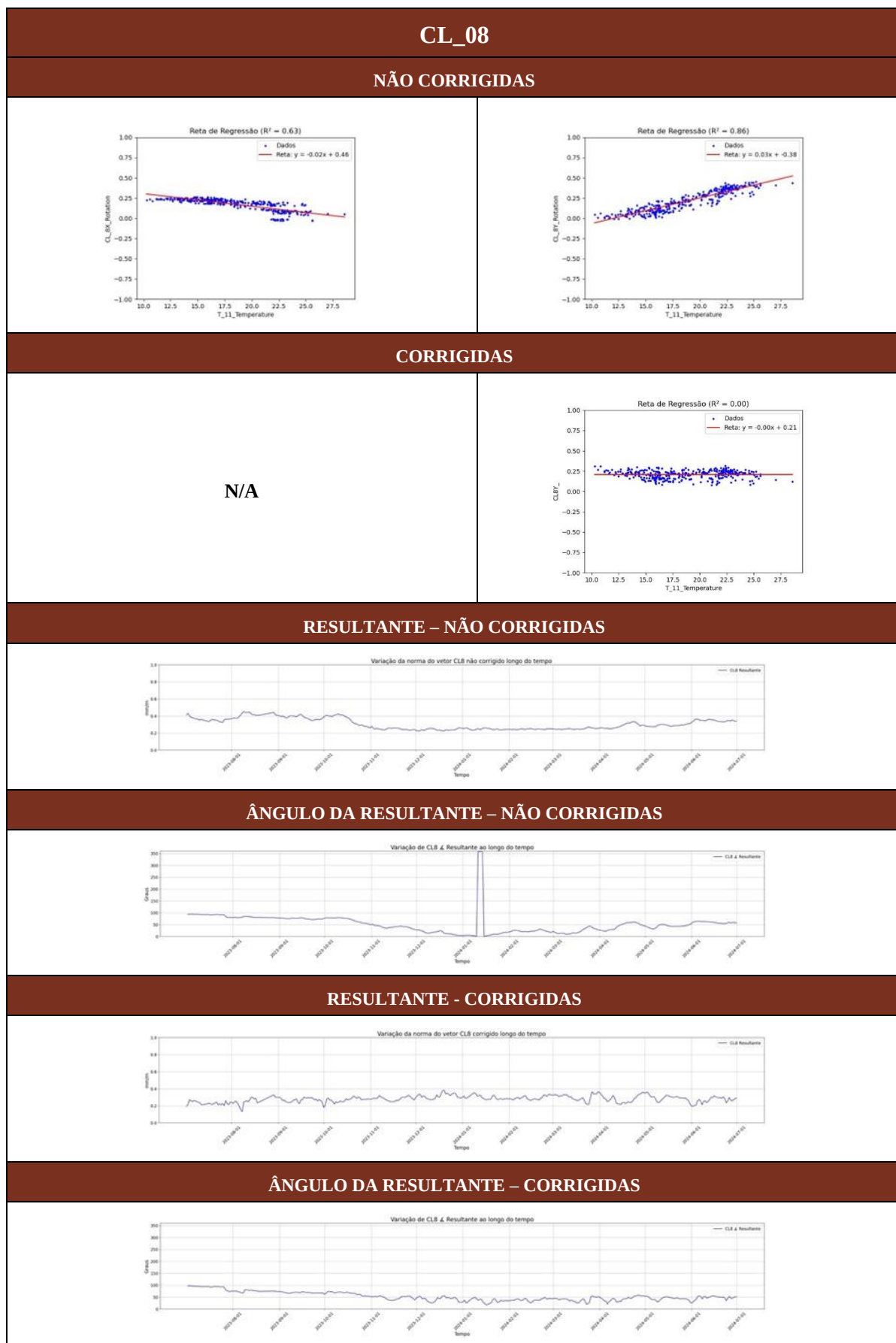


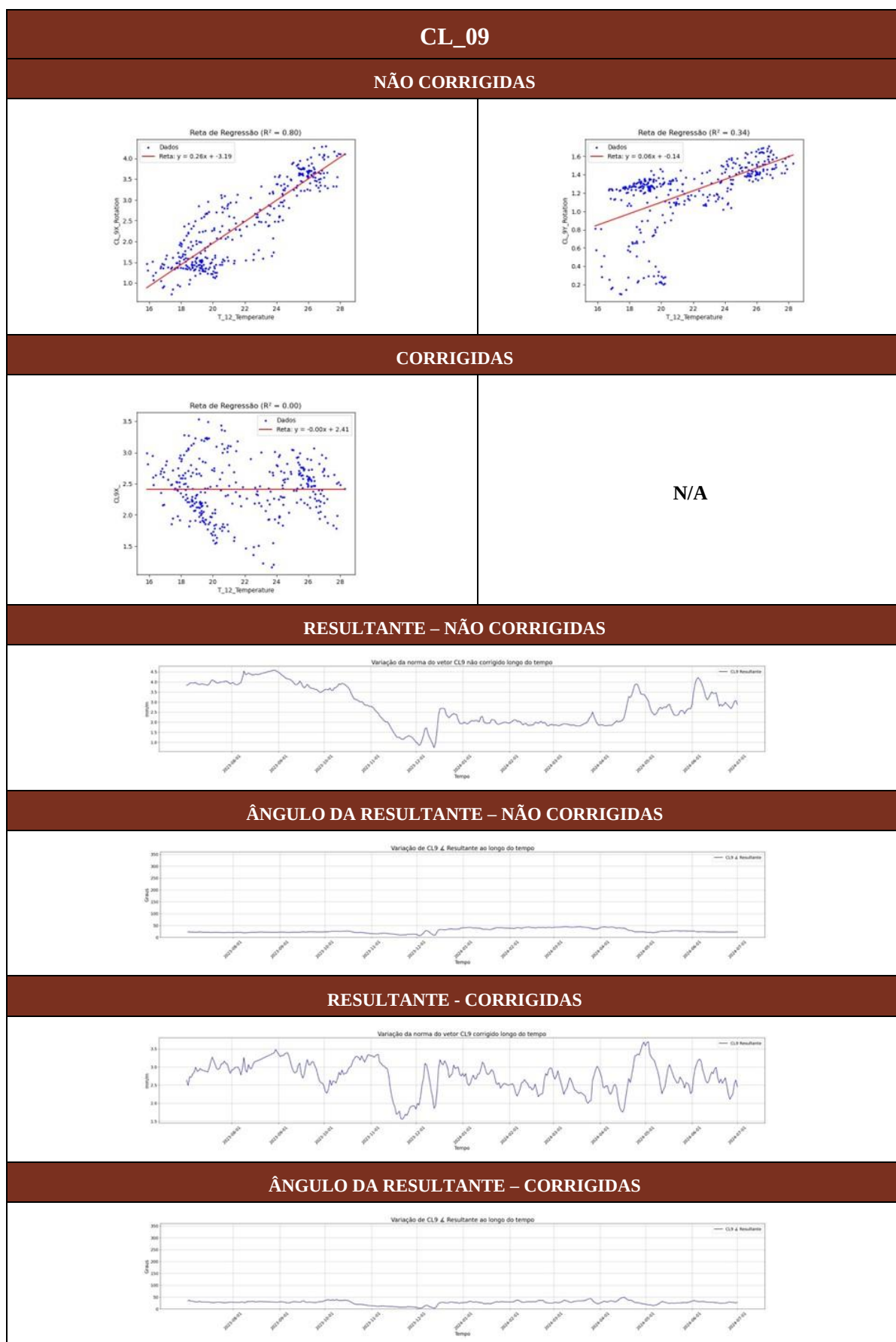
RESULTANTE - CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS

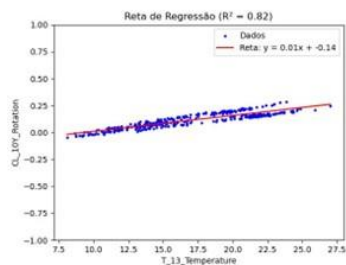




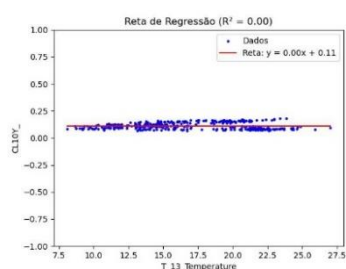


CL_10

NÃO CORRIGIDAS



CORRIGIDAS



RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



ÂNGULO DA RESULTANTE – NÃO CORRIGIDAS



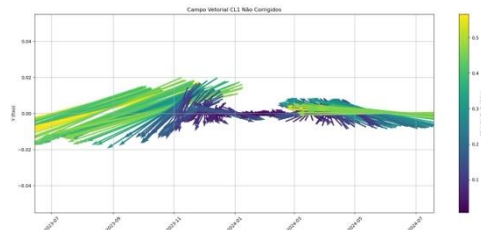
RESULTANTE - CORRIGIDAS



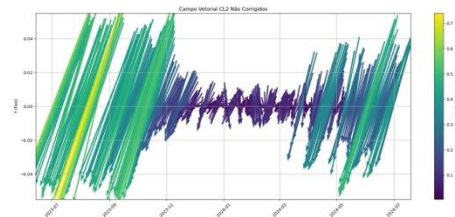
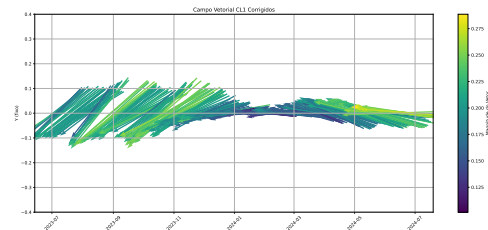
ÂNGULO DA RESULTANTE – CORRIGIDAS



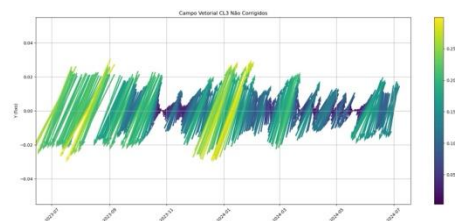
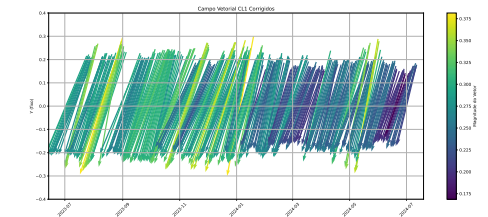
VECTOR FIELD



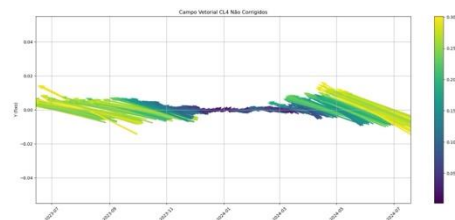
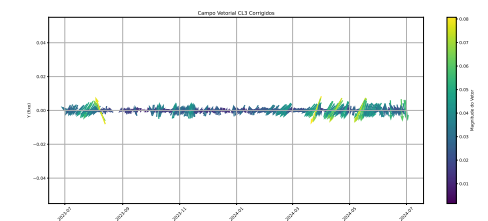
CL_01



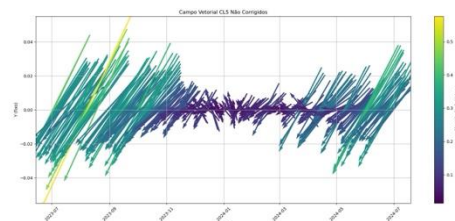
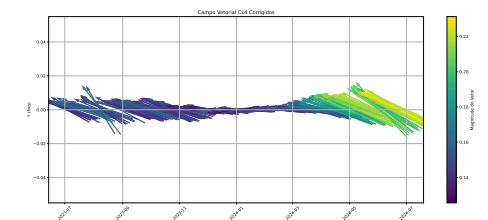
CL_02



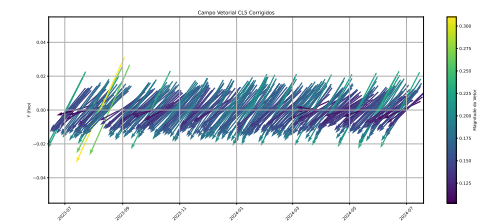
CL_03

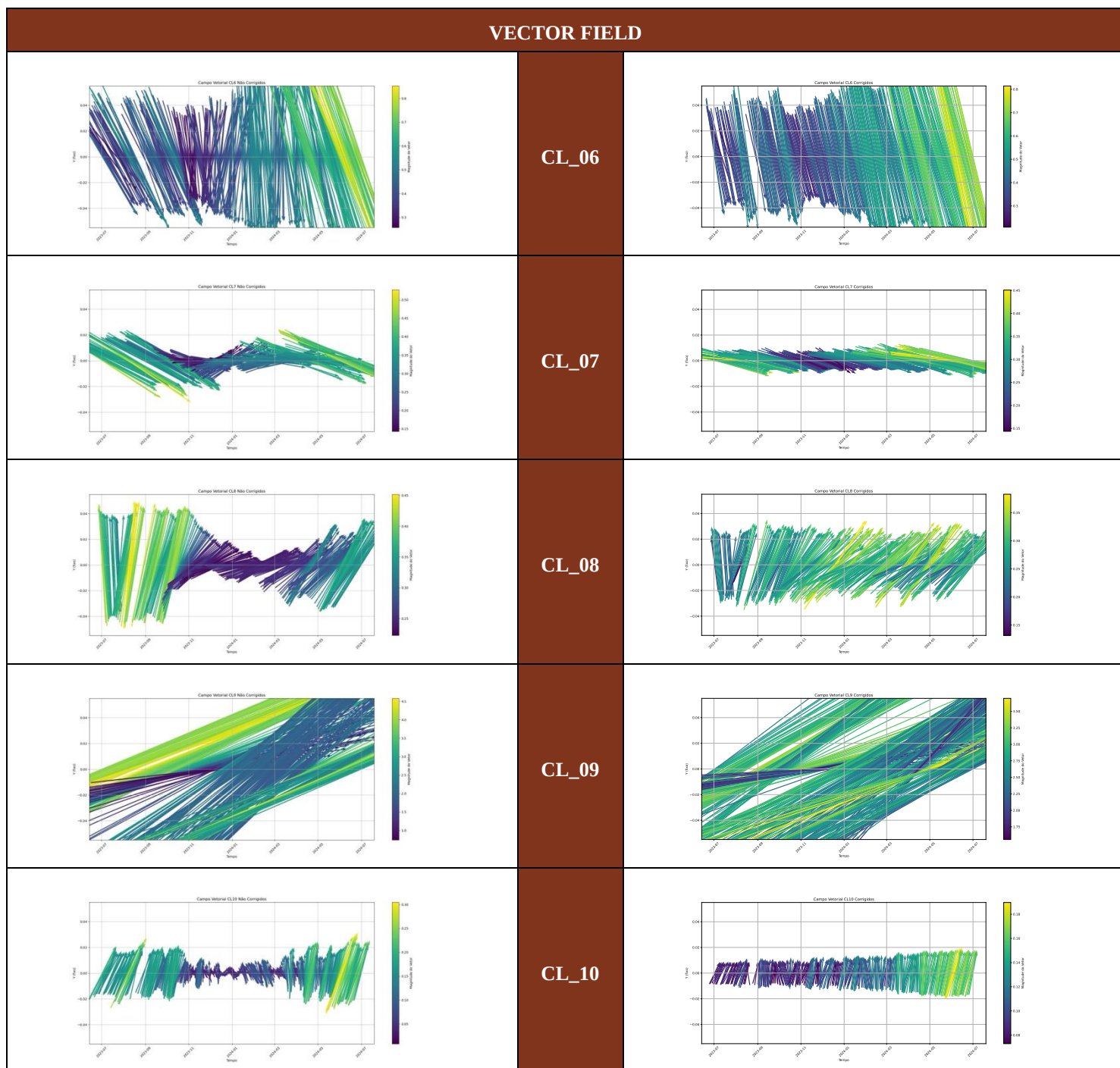


CL_04



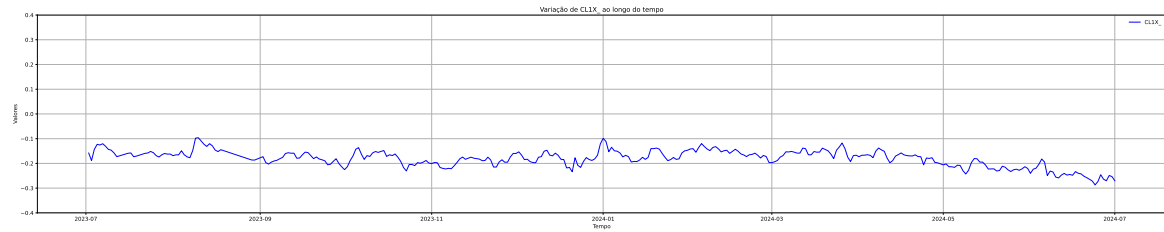
CL_05



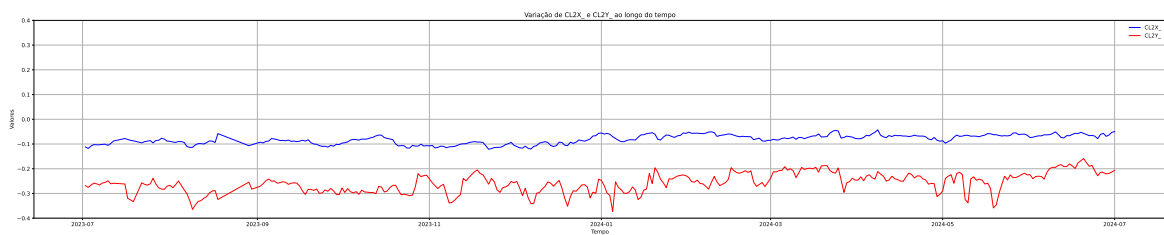


INCLINAÇÃO AO LONGO DO TEMPO

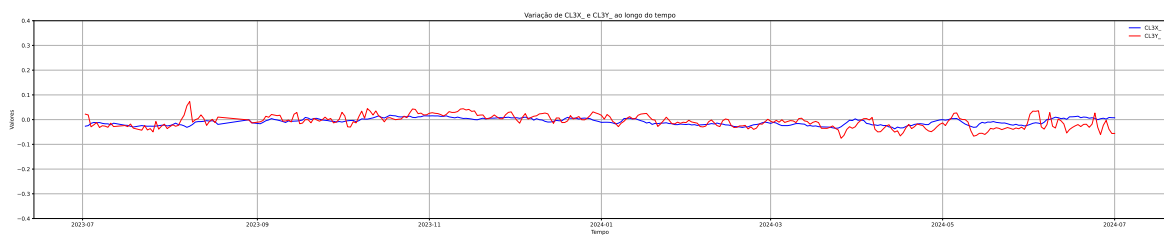
CL1



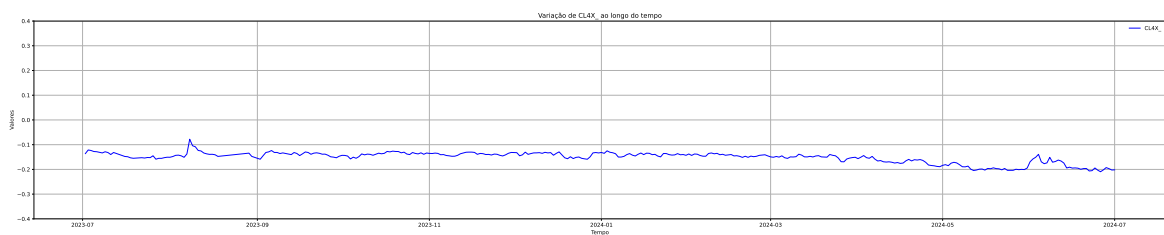
CL2



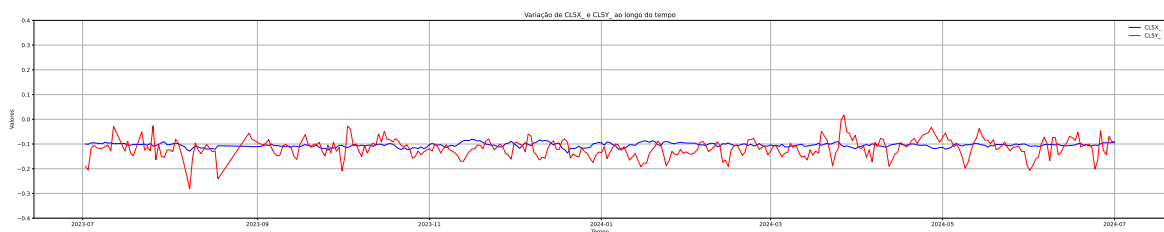
CL3



CL4

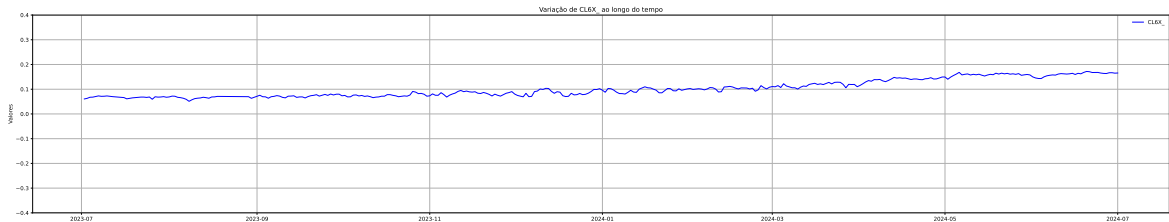


CL5

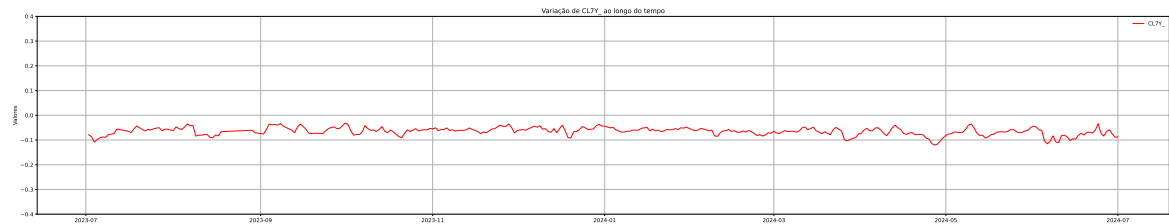


INCLINAÇÃO AO LONGO DO TEMPO

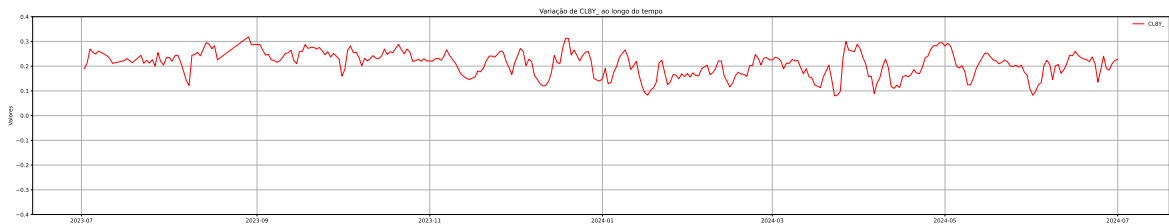
CL6



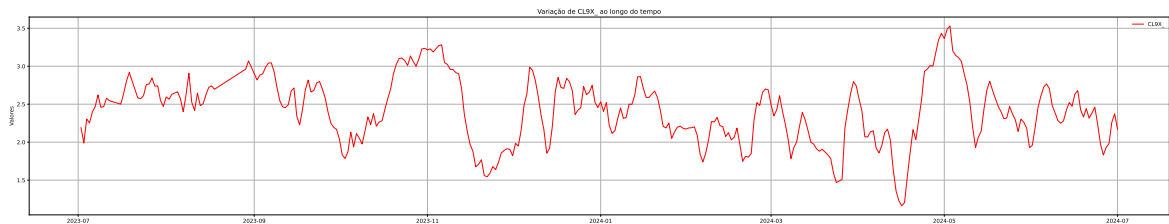
CL7



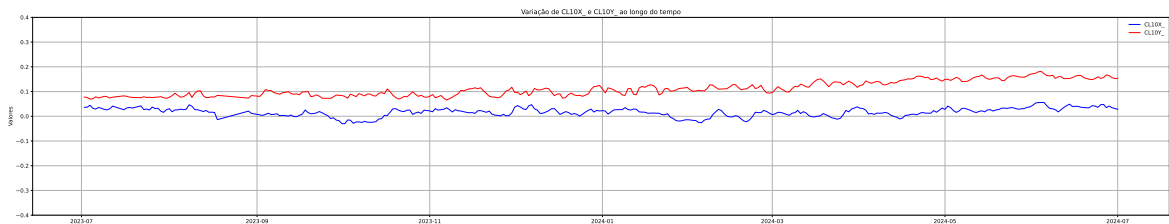
CL8



CL9



CL10



3.3.1.2. Análise e discussão

Através dos quadros anteriormente apresentados, é possível ter uma visão mais detalhada do comportamento das inclinações da estrutura. Contudo existem algumas conclusões que devem ser discutidas para realizar uma interpretação correta dos dados:

- **Relevância da Variação dos Dados** – Os dados apresentados, apesar de pouco perceptíveis, têm maior relevância na sua variação do que nos valores obtidos. Assim sendo, a pouca perceção dos valores apresentados nos gráficos é, na verdade, altamente representativa, sendo considerada de maior importância a oscilação dos resultados.
- **Resultados da Norma e do Ângulo da Resultante Constantes** – Conforme mencionado anteriormente, as constâncias dos registos do vetor resultante permitem concluir sobre o comportamento estável da estrutura ao longo do período de medição. Deste modo, é possível afirmar que, uma vez que não foi registado nenhum “pico” de instabilidade no ângulo do vetor resultante e na norma do mesmo, os valores são satisfatórios na monitorização da estrutura.
- **Inconsistência dos Registos de Clinómetros na Mesma Posição em Cotas Diferentes** – Na análise dos clinómetros situados na mesma posição em planta, porém em cotas distintas, pode-se observar que os valores são diferentes. Inicialmente, não seria esperado esta diferença de registos por pertencerem à mesma posição em x e y. No entanto verificou-se que, em alguns dos sensores de inclinação situados num nível superior foram encontrados resultados mais elevados comparativamente aos sensores num nível inferior. Este fenómeno poderá explicar-se pelo facto de os sensores numa cota mais elevada terem uma maior dependência da inclinação do que sensores na base da parede (Figura 47).

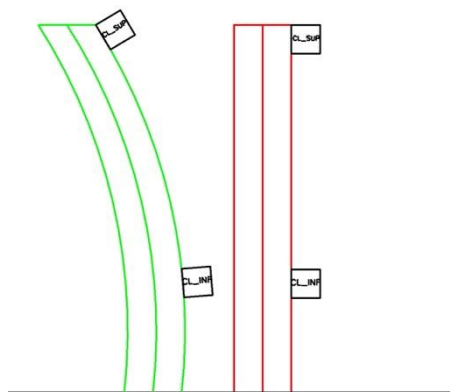


Figura 47 - Representação esquemática da resposta dos sensores de inclinação

- **Valores de CL_09 Discordantes aos Demais** – Em comparação com os registos pelos outros clinómetros, o CL_09 contém uma ordem de grandeza consideravelmente superior aos demais. Após discussão com a equipa de orientação, admitiu-se que os registos dos valores estão incorretos, possivelmente devido a um erro do sensor. Contudo, importa realçar que a variação dos registos é o ponto relevante a ser estudado, conforme mencionado anteriormente.

3.3.2. VERIFICAÇÃO DOS VALORES DE ASSENTAMENTO

Através da análise dos valores registados pelos sensores de nível surgiu o interesse em avaliar se existe alguma relação entre o assentamento das paredes e a inclinação das mesmas. Com esse objetivo, propõe-se a análise do ângulo de distorção registado entre dois assentamentos (Figura 48) e a verificação da existência de correspondência com os valores registados pelos clinómetros.

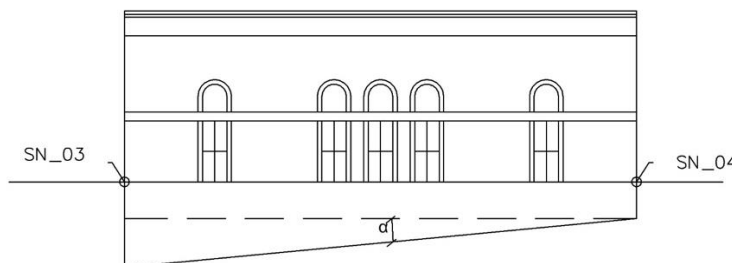


Figura 48 - Representação esquemática de distorção entre os sensores de nível

Este método tem como objetivo analisar os assentamentos de dois sensores de nível e registar o ângulo resultante destes desníveis. Após a recolha destes ângulos, estes serão comparados com os valores obtidos nos sensores de inclinação dessa parede. Esta comparação apenas será efetuada nas inclinações registadas que estiverem no mesmo plano dos sensores de nível.

Assim, foram identificados seis setores que serão relevantes para a monitorização destes assentamentos:

- a) Metade norte da fachada oeste do vestíbulo;
- b) Fachada oeste do torreão norte;
- c) Fachada norte do torreão norte;
- d) Diagonal do torreão norte;
- e) Metade sul da fachada oeste do vestíbulo;
- f) Fachada oeste do torreão sul.

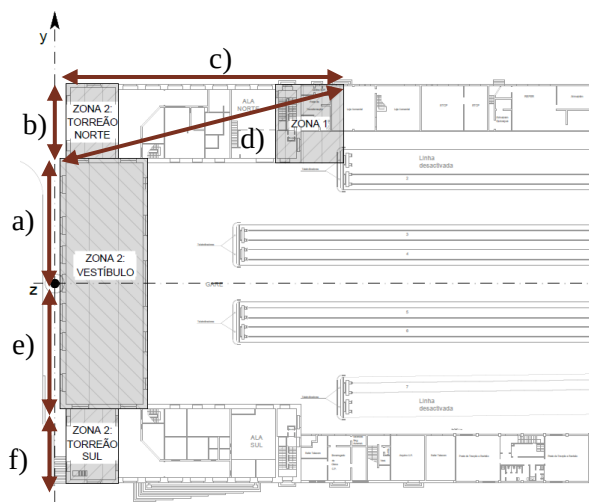


Figura 49 - Representação dos setores a serem estudados

Estes seis setores despoletam alguma curiosidade do comportamento dos assentamentos, sendo estes os setores possivelmente mais afetados pelas obras realizadas pelo Metro do Porto.

3.3.2.1. Estudo dos assentamentos das fachadas

Com o objetivo de estudar os assentamentos das paredes da Estação de S. Bento, foram utilizados os mesmos métodos de abordagem anteriormente utilizados. Com o recurso à linguagem de programação *Python* iniciou-se o estudo do ângulo de distorção com o cálculo da diferença de assentamentos registados pelos sensores SN_03 e SN_06, gerando, assim, uma coluna no *dataframe* utilizado, denominado de “Diferença Assentamentos” (Figura 50).

```

dif_6_3 = {'Diferença Assentamentos 6_3': []}
dif_6_3 = pd.DataFrame(dif_6_3)
a = 0

while a != len(assent):
    dif_6_3.loc[a] = assent.loc[a, 'SN_06_Level'] - assent.loc[a, 'SN_03_Level']
    a = a + 1

```

Figura 50 - Algoritmo utilizado no cálculo das diferenças entre os assentamentos de SN_03 e SN_06

Após a conclusão deste processo, foi gerado o ângulo de distorção, calculado através da divisão dos valores registados na coluna 'Diferença Assentamentos' pelo comprimento medido entre os dois sensores.

Estes comprimentos encontram-se representados na Figura 51, sendo os comprimentos necessários para os setores e) e f) iguais aos dos setores a) e b) devido à simetria da estação.

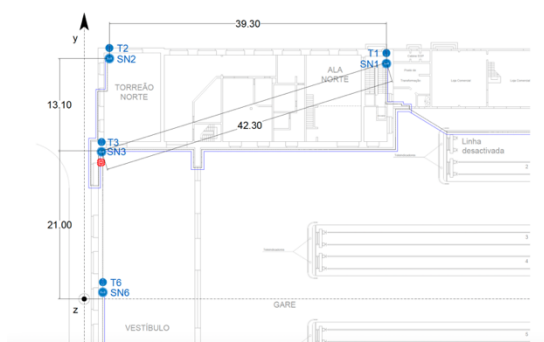


Figura 51 - Comprimentos entre os sensores de nível

Optou-se por definir o sentido positivo dos ângulos de distorção de acordo com o sentido positivo do eixo x da estrutura, garantindo assim a concordância nos cálculos desses ângulos.

Através da Figura 52 poder-se-á analisar a variação dos ângulos de distorção juntamente com a inclinação registada pelo sensor.

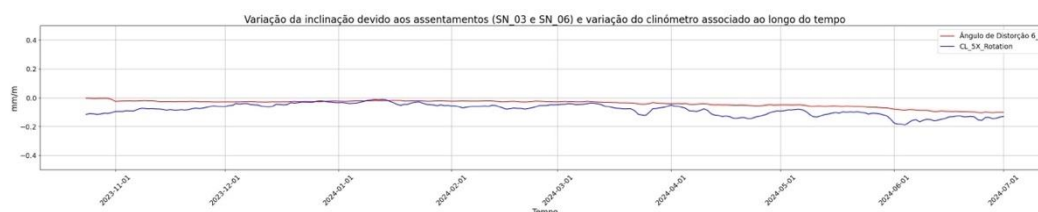


Figura 52 - Variação dos ângulos de distorção provocado pelos sensores SN_03 e SN_06 e variação do clinómetro associado (CL_5X) ao longo do tempo.

Apesar de na figura anterior ser possível observar os valores registados pelos clinómetros, acredita-se que será benéfico analisar a variação do ângulo de distorção juntamente com os valores dos clinómetros sem a ação da temperatura. Esta análise poderá ser efetuada com recurso à Figura 53



Figura 53 - Variação dos ângulos de distorção provocado pelos sensores SN_03 e SN_06 e variação corrigida do clinómetro associado (CL_05X) ao longo do tempo

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos através do método utilizado anteriormente na análise do ângulo de distorção, recolhidos através dos sensores de assentamento, assim como a análise dos valores dos clinómetros corrigidos associado às fachadas entre os dois sensores. Estes clinómetros encontram-se diferenciados com cores e estilo de linha de modo a conferir perceção aos gráficos.

Nesta análise estão representados os pares de clinómetros associados ao intervalo do ângulo de distorção instalados no nível 1, assim como os clinómetros associados instalados no nível 2. Os gráficos dos clinómetros à esquerda do ângulo de distorção estão representados com a cor azul e um estilo de linha a tracejado. Por sua vez, os clinómetros dos sensores à direita estão representados com a cor verde. De modo a facilitar esta análise, as cores dos gráficos no nível 1 são de tom mais carregado.

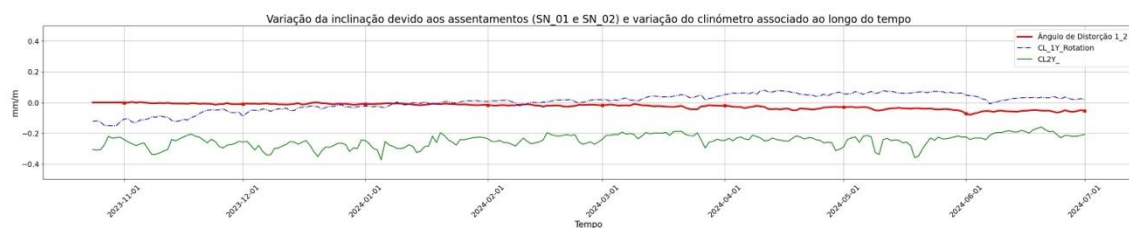
A Tabela 3 apresenta a correspondência entre os ângulos de distorção e as rotações dos clinómetros, permitindo uma comparação direta entre estes parâmetros.

Tabela 3 - Correspondência entre os ângulos de distorção e clinómetros

Ângulo de Distorção	Clinómetros a Analisar
SN_01 e SN_02	CL_01 e CL_02
SN_03 e SN_02	CL_01, CL_02, CL_03 e CL_04
SN_06 e SN_03	CL_03, CL_04, CL_05 e CL_06
SN_04 e SN_06	CL_05, CL_06, CL_07 e CL_08
SN_05 e SN_04	CL_07, CL_08, CL_09 e CL_10

Variação dos Clinómetros

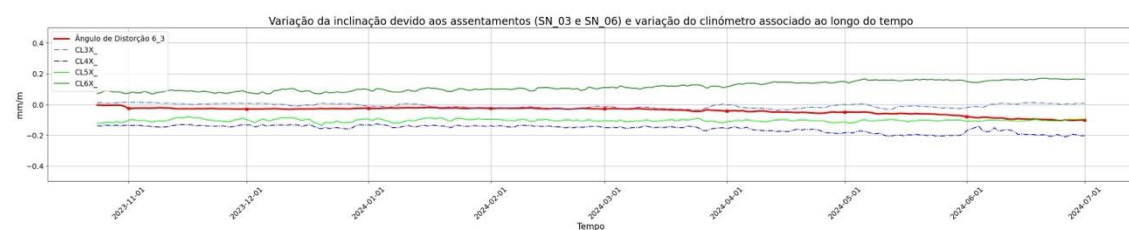
SN_01 e SN_02



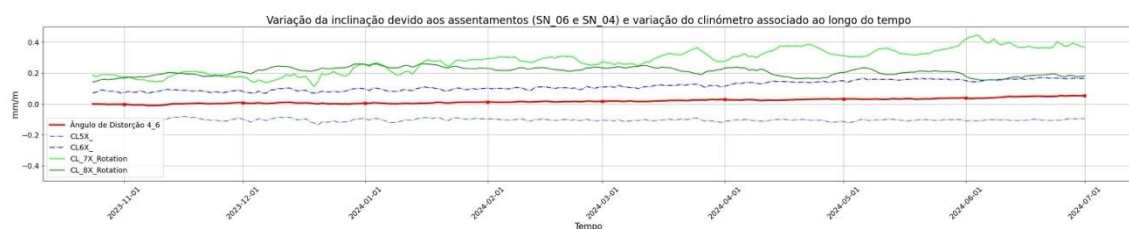
SN_03 e SN_02



SN_06 e SN_03



SN_04 e SN_06



SN_05 e SN_04



3.3.2.2. Análise e discussão

Após a análise dos resultados obtidos dos quadros anteriores é relevante salientar que:

- **Resultados satisfatórios** – Ao analisar os resultados obtidos por este método, pode-se admitir que a comparação entre os sensores de inclinação e os ângulos de distorção constitui uma abordagem favorável para a monitorização da estrutura. Isto deve-se à semelhança nas variações registadas em ambas as medições, o que sugere a possibilidade de verificação cruzada dos resultados.
- **Valores de CL_09 alterados** – Ao comparar os resultados dos gráficos dos quadros anteriores é notável uma alteração na escala dos valores CL_09. Como mencionado anteriormente, este sensor encontra-se com uma anomalia, o que origina valores discrepantes em relação aos outros sensores. Com o objetivo de obter um método de comparação mais eficaz entre os sensores associados e o ângulo de distorção, os dados provenientes do CL_09 foram normalizados através da divisão por um fator de 10, reduzindo assim a sua ordem de grandeza, facilitando, assim, a análise dos gráficos.
- **Utilização dos clinómetros não corrigidos** – Com o objetivo de efetuar uma análise correta dos valores dos ângulos de distorção com os sensores de inclinação, foram representados, no último quadro, os clinómetros não corrigidos apenas quando os mesmos não possuísem correção. Isto deve-se ao facto de estes sensores não corrigidos não cumprirem o requisito de o coeficiente de determinação ser superior a 0.75 ($R^2 > 0.75$).
- **Ângulo de distorção em concordância com o sentido positivo** – De modo a realizar uma análise assertiva, teve-se o cuidado de calcular o ângulo de distorção com a rotação correta de modo a obter-se sentidos positivos concordantes com os sensores da estrutura.
- **Intervalo de tempo modificado** – Comparando o intervalo de tempo dos registos desta análise com o intervalo de tempo definido no início do capítulo, é possível verificar uma redução do período temporal das análises. Isto verificou-se devido à falta de dados dos sensores de nível no período anterior ao dia 24/10/2023.

Após a análise dos quadros anteriores, é perceptível a falta dos resultados da zona designada por d). Isto deve-se ao facto de ter sido utilizado um método ligeiramente diferente dos demais.

Para a monitorização dos assentamentos entre os sensores SN_03 e SN_01 foram utilizados os vetores resultantes dos dados registados pelo clinómetro CL1.

Com objetivo de comparar o ângulo de distorção produzido pelos sensores SN_03 e SN_01 com os vetores resultantes de CL1, realizou-se uma mudança de referencial nos vetores resultantes. Na Figura 54 é possível observar o novo referencial que irá ser estudado. Este referencial foi gerado pelo eixo “f”, onde é sobreposto pela linha que cria a ligação entre os sensores SN_03 e SN_01. O outro eixo deste referencial, “m”, é o eixo perpendicular ao eixo “f”. Estes eixos formam um ângulo entre o referencial original de 17°.

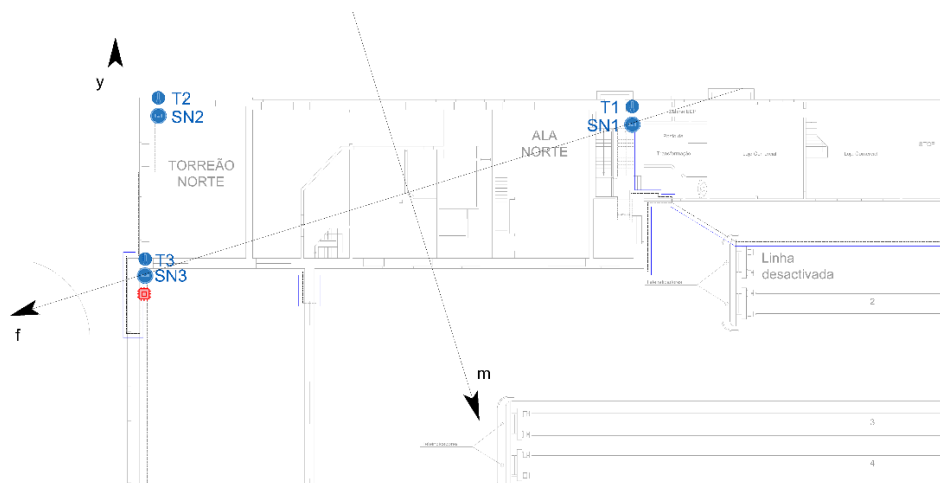
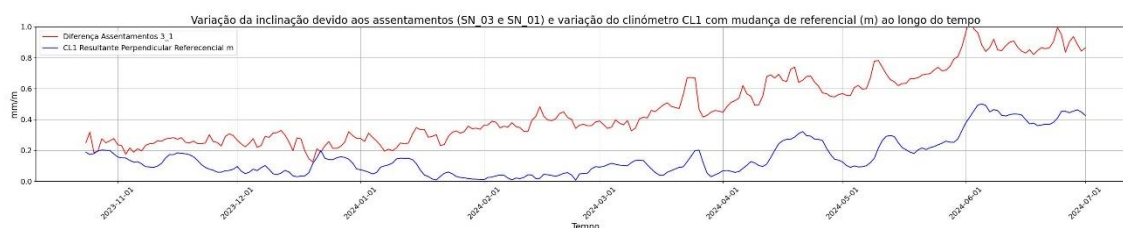


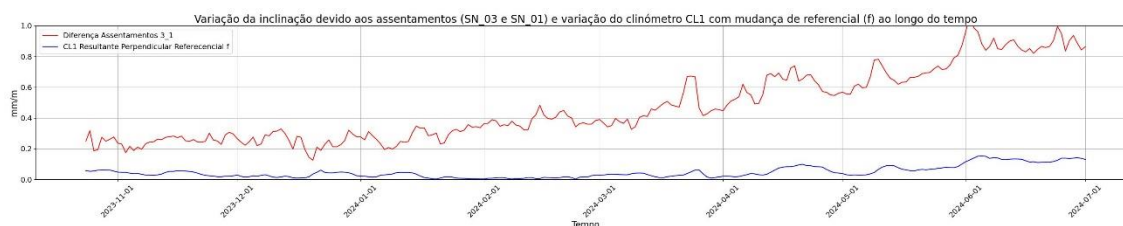
Figura 54 - Representação do referencial a ser utilizado

Após transpor os vetores resultantes no novo referencial, pode-se, agora, melhor visualizar o comportamento do ângulo da distorção comparando com o clinómetro CL_01.

Através da Figura 55 é possível observar o comportamento do ângulo de distorção, tanto em torno do eixo m, como em torno do eixo f, respetivamente.



(a)



(b)

Figura 55 - Variação do ângulo de distorção gerado por SN_03 e SN_01 e os vetores resultantes no novo referencial. (a) Variação do ângulo de distorção e os vetores resultantes em torno do eixo m. (b) Variação do ângulo de distorção e os vetores resultantes em torno do eixo f

Através da análise da Figura 55, foi possível observar-se uma concordância de distorção, sobretudo com a componente de CL_01 na direção m, embora também em menor grau com a componente na direção f, o que sugere uma relação de causa e efeito entre essas variáveis.

Uma outra análise realizada, foi a verificação da não necessidade de sensores de nível. Esta verificação surgiu visto que, calculando o ângulo de distorção, é possível comparar os valores registados com os valores medidos pelos clinómetros. Esta medida, apesar de não ser tão assertiva, poderá refletir aproximadamente o comportamento dos assentamentos da estrutura.

Utilizando o vestíbulo como demonstração, e aproveitando o algoritmo anteriormente utilizado no cálculo do ângulo de distorção, procedeu-se à comparação desses registos com os valores registados pelo clinómetro do centro.

Neste sentido, foram utilizados os sensores de nível SN_03 e SN_04 no cálculo do ângulo de distorção. O CL_05 será o sensor utilizado neste estudo por se tratar do clinómetro central e ao nível 1.

Ao representar estes dois parâmetros num gráfico ao longo do tempo, poder-se-á perceber uma clara semelhança entre os registos.

Na Figura 56 está representada a variação do ângulo de distorção entre SN_04 e SN_03, assim como a variação de CL_5X. É importante notar que, para uma melhor apreciação dos resultados, foi elevada a ordem de grandeza do ângulo de distorção. Nesta figura poder-se-á observar a existência de uma forte semelhança entre estes dois parâmetros. Esta conclusão torna-se mais evidenciada através da Figura 56 b) onde se inverteram os sinais dos valores de CL_5X apenas com o intuito de demonstração da semelhança de resultados.



(a)



(b)

Figura 56 - Variação do ângulo de distorção entre SN_04 e SN_03 e CL_5X ao longo do tempo. (a) Variação do ângulo de distorção e CL_5X ao longo do tempo. (b) Variação do ângulo de distorção e CL_5X (* -1) ao longo do tempo

Estes resultados, ainda que bastante satisfatórios, não indicam a não necessidade da utilização dos sensores de nível, sendo estes bastante úteis para a compreensão do assentamento da estrutura e não apenas na deformação do solo entre dois pontos. Apesar de poder diminuir no orçamento de uma monitorização da estrutura, em termos de viabilidade, é sempre mais preciso ter diferentes meios de concluir o mesmo resultado.

3.3.2.3. Mapa topográfico

Após esta análise dos assentamentos registados pelos sensores de nível, levantou-se a questão de como poderão estar representados estes assentamentos em planta. Poderá estar a ocorrer algum assentamento evidente em algum dos elementos estruturais estudados, onde, através dos valores, não será possível destacá-lo?

Para responder a esta questão, foi produzido um algoritmo através de dados de sensores de nível para gerar mapas topográficos interpolados, permitindo visualizar a evolução do solo ao longo de diferentes momentos. Primeiramente, é definida a posição fixa de cada sensor num plano cartesiano, formando uma base de coordenadas de referência. De seguida, é criada uma malha regular de pontos onde os dados serão interpolados, utilizando um método de interpolação cúbica para suavizar os valores entre os sensores. Para cada conjunto de dados registados pelos sensores, os valores de nível são interpolados sobre a malha, gerando uma superfície contínua que visa representar a topografia do do campo de assentamentos. Essa superfície é exibida como um mapa de contorno preenchido, com cores representando diferentes níveis e limites de escala definidos para garantir uma consistência visual entre os gráficos. Os sensores são destacados no mapa como pontos marcados, acompanhados pelos respetivos nomes, para facilitar a identificação das posições de medição.

Este código, através da automatização da evolução dos assentamentos com recurso à interpolação espacial, permite a representação gráfica de forma clara e eficaz.

```
# Definir as coordenadas dos sensores
coordinates = {
    'SN_06': (0, 0),
    'SN_03': (0, 21),
    'SN_04': (0, -21),
    'SN_02': (0, 39),
    'SN_05': (0, -39),
    'SN_01': (50, 39),
    'SN_REF': (185, 39)
}

# Definir uma grade para interpolação
grid_x, grid_y = np.meshgrid(np.linspace(-10, 200, 500), np.linspace(-50, 50, 500))

# Definir os limites fixos para a colorbar
vmin = -5 # Valor mínimo
vmax = 5 # Valor máximo

# Usando um loop for para percorrer as linhas de 'assent_ref'
for a in range(len(assent)):
    # Definir os valores de nível para cada sensor na linha 'a'
    sensor_values = [
        assent['SN_06_Level'].iloc[a],
        assent['SN_03_Level'].iloc[a],
        assent['SN_04_Level'].iloc[a],
        assent['SN_02_Level'].iloc[a],
        assent['SN_05_Level'].iloc[a],
        assent['SN_01_Level'].iloc[a],
        assent['SN_Ref_Level'].iloc[a]
    ]

    # Interpolare os valores dos sensores para a grade
    grid_z = griddata(list(coordinates.values()), sensor_values, (grid_x, grid_y), method='cubic')

    # Criar o mapa topográfico com limites fixos de cor
    plt.figure(figsize=(10, 7))
    contour = plt.contourf(grid_x, grid_y, grid_z, cmap='RdYlGn_r', vmin=vmin, vmax=vmax)
    plt.colorbar(contour, label='Nível do Solo') # A colorbar agora terá o intervalo fixo

    # Adicionar os sensores ao gráfico
    sensor_coords = np.array(list(coordinates.values()))
    plt.scatter(sensor_coords[:, 0], sensor_coords[:, 1], color='black', zorder=5)
    for i, txt in enumerate(coordinates.keys()):
        plt.text(sensor_coords[i, 0], sensor_coords[i, 1], txt, fontsize=12, ha='center', color='white')

    # Título e rótulos
    plt.title(f'Mapa Topográfico dos Sensores de Nível - Linha {a+1}')
    plt.xlabel('Coordenada X')
    plt.ylabel('Coordenada Y')

    # Salvar o gráfico com o nome apropriado
    filename = f'Gráfico_Topografico_{a+1}.png' # Nome do arquivo com o índice
    plt.savefig(filename)

    # Fechar a figura para liberar memória
    plt.close()

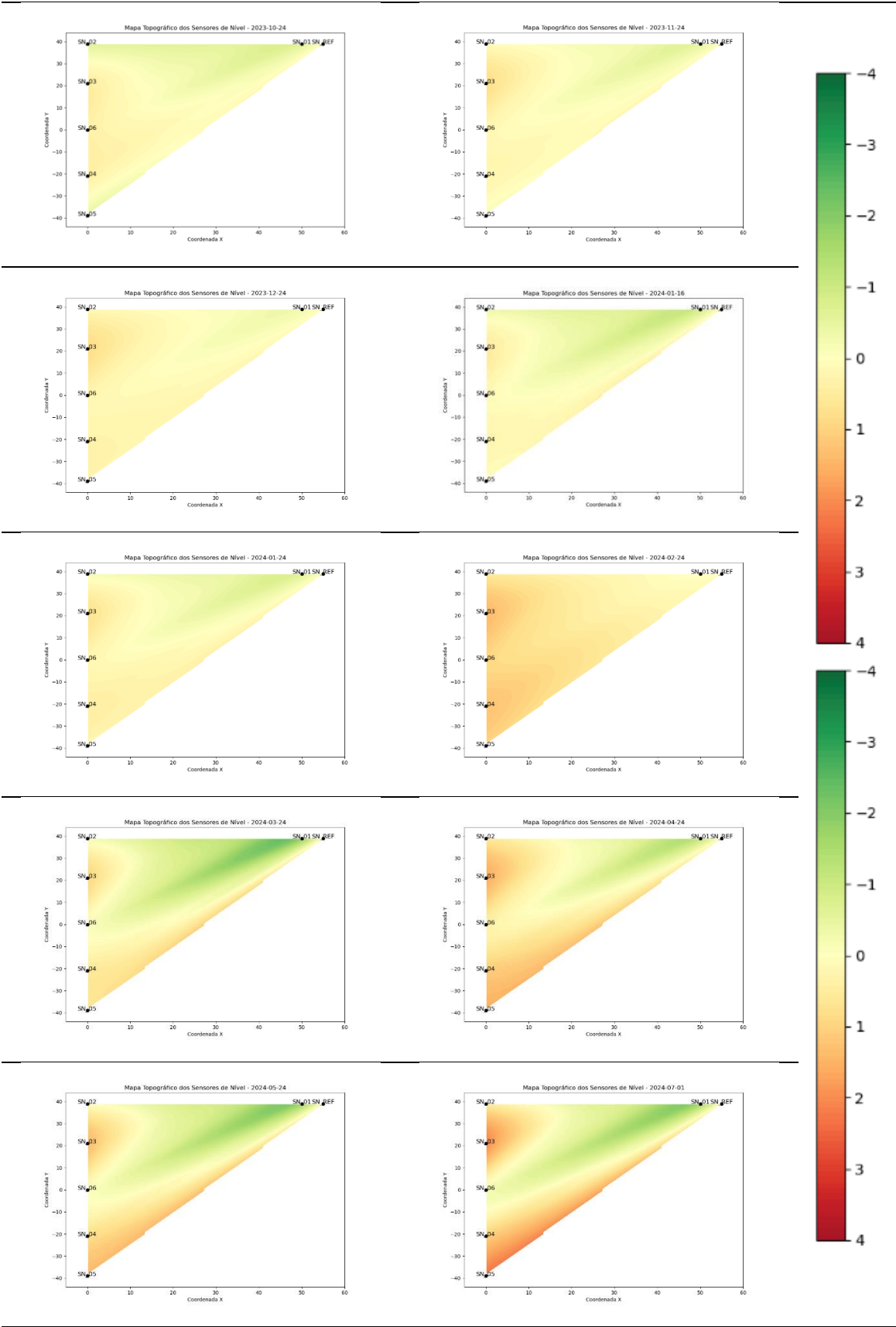
print("Gráficos salvos com sucesso.")
```

Figura 57 - Algoritmo utilizado na geração de mapas topográficos

Pela observação da Tabela 4, é possível analisar a evolução do mapa topográfico da Estação de S. Bento.

Tendo em consideração o facto do ponto mais à direita ser o sensor de nível de referência, e tendo em conta que os valores registados pelos restantes sensores já se encontram em referência com este sensor, analisar a evolução dos assentamentos através do quadro apresentado na página seguinte.

Tabela 4 - Evolução do mapa topográfico da Estação de S. Bento



Através do quadro anterior, é possível notar um crescimento evidente nos assentamentos dos sensores de nível, sendo mais notória esta evolução nos sensores SN_03 e SN_05, evidenciados com cor avermelhada, que é compatível com o tipo de obras decorridas junto á fachada da estação.

3.3.3. RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E OS FISSURÓMETROS

A função dos fissurómetros é a captação de movimentos ligeiros da parede com a finalidade de analisar possíveis aberturas de fissuras. Neste sentido, a equipa da FEUP resolveu instalar 16 sensores de medição de fissuras, com o objetivo de tentar avaliar o possível aparecimento de fissuras em zonas mais relevantes.

A equipa da FEUP, considerando relevante monitorizar, também, a temperatura do local onde se encontram os fissurómetros, decidiu instalar simultaneamente sensores de temperatura.

Esta organização de sensores é poderá ser evidenciada na Tabela 5, onde é possível analisar para cada fissurómetro qual o sensor de temperatura relacionado, assim como a zona que estará a ser medida. Para uma visualização mais clara da disposição destes sensores, a Figura 58 representa a localização dos sensores em questão.

Tabela 5 - Pares de sensores de temperatura e fissurómetros e zona de medição dos mesmos

Sensor de Temperatura	Fissurómetros	Zona de Medição
T_09	FS_1A, FS_1B	Torreão Norte, face interior da parede norte
	FS_2A, FS_2B, FS_2C	Torreão Norte, face interior da parede oeste
T_08	FS_3A, FS_3B, FS_3C	Vestíbulo, parede interior norte
T_11	FS_4A, FS_4B, FS_4C	Vestíbulo, parede interior sul
T_13	FS_5A, FS_5B, FS_5C	Torreão Sul, face interior da parede oeste
	FS_6A, FS_6B,	Torreão Sul, face interior da parede sul

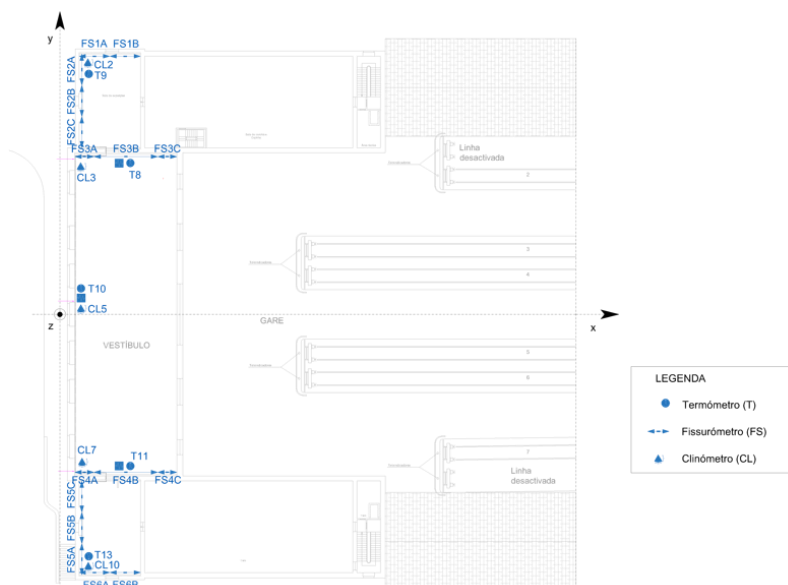


Figura 58 - Disposição dos sensores em planta

Utilizando como exemplo os fissurómetros FS_1A e FS_1B, é possível analisar as medições realizadas por estes sensores no decorrer do período estudado nesta dissertação. Com esse efeito, a Figura 59 representa a variação dos valores dos fissurómetros 1(FS_1A e FS_1B) no decorrer do ano.



Figura 59 - Variação dos fissurómetros 1 ao longo do tempo

Através da figura anterior, é possível apontar uma flutuação dos valores dos fissurómetros entre os meses de verão e os meses de inverno, tendo surgido a questão se existe, uma vez mais, uma relação com a temperatura.

Tendo como base que para cada fissurómetro existe um sensor de temperatura posicionado próximo ao mesmo, com o objetivo de controlar a temperatura junto ao sensor, a figura seguinte relata a variação da temperatura do sensor respetivo aos fissurómetros FS_1A e FS_1B (T_09).



Figura 60 - Variação do sensor de temperatura T_09 ao longo do tempo

Ao analisar a Figura 59 e a Figura 60, pode-se concluir sobre a existência de uma clara relação entre estas duas variáveis. Esta relação justifica-se, uma vez que, em meses de temperaturas mais elevadas, se verifica a dilatação dos elementos estruturais. Por sua vez, em meses de temperaturas mais baixas, os elementos estruturais contraem-se. Esta ação da temperatura provoca alterações nos valores dos fissurómetros, tendo, assim, uma menor perceção dos registos dos sensores.

Por esta razão, e utilizando o conceito já anteriormente aplicado nos clinómetros, emergiu a necessidade de questionar a possibilidade de analisar os valores dos fissurómetros sem a ação da temperatura.

Através do algoritmo referenciado na Figura 31, e dando continuidade à utilização dos fissurómetros FS_1A e FS_1B como sensores exemplo, foi avaliada a relação entre os fissurómetros e o sensor de temperatura associado.

Na figura seguinte é possível analisar a evolução dos valores registados dos fissurómetros FS_1A e FS_1B em função da temperatura. Recorrendo a esta análise, é possível notar uma clara relação entre os fissurómetros e o sensor de temperatura, pela proximidade dos resultados à reta de regressão linear, mas também pelo valor do coeficiente de determinação, o qual se encontra muito próximo de 1.

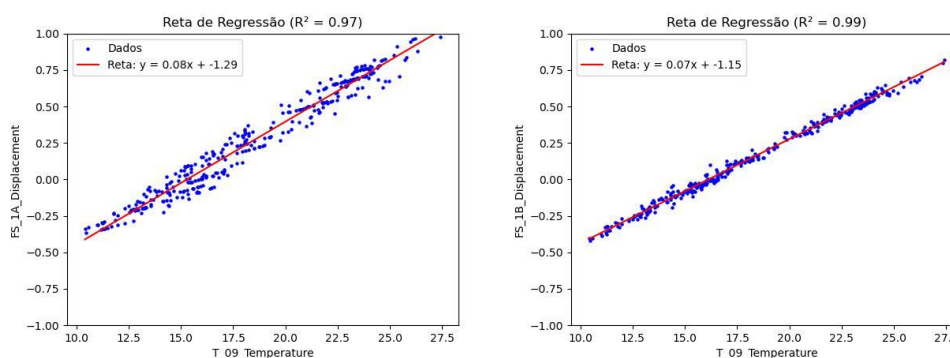


Figura 61 - Gráfico de FS_1A e FS_1B em função da temperatura, respetivamente

Assim sendo, será possível executar uma expurgação da ação da temperatura dos valores registados pelos fissurómetros. Esta extração, já mencionada anteriormente, tem como base o algoritmo apresentado na Figura 33 e resulta nos gráficos da Figura 62.

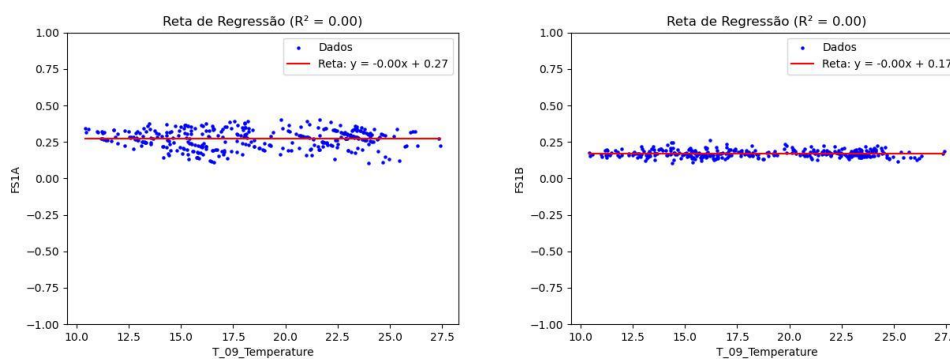


Figura 62 - Gráfico de FS_1A e FS_1B corrigidos em função da temperatura, respetivamente

Através da análise da Figura 62, é possível identificar satisfação nos resultados devido à proximidade dos resultados à reta de regressão linear e ao coeficiente de determinação identificar um valor de 0.

De modo a obter-se uma visão mais clara dos resultados, a Figura 63 ilustra a variação dos fissurómetros, não influenciados pela ação da temperatura. Qualquer variação existente nestes resultados, virá a ser fruto de algum agente à exceção da ação da temperatura.

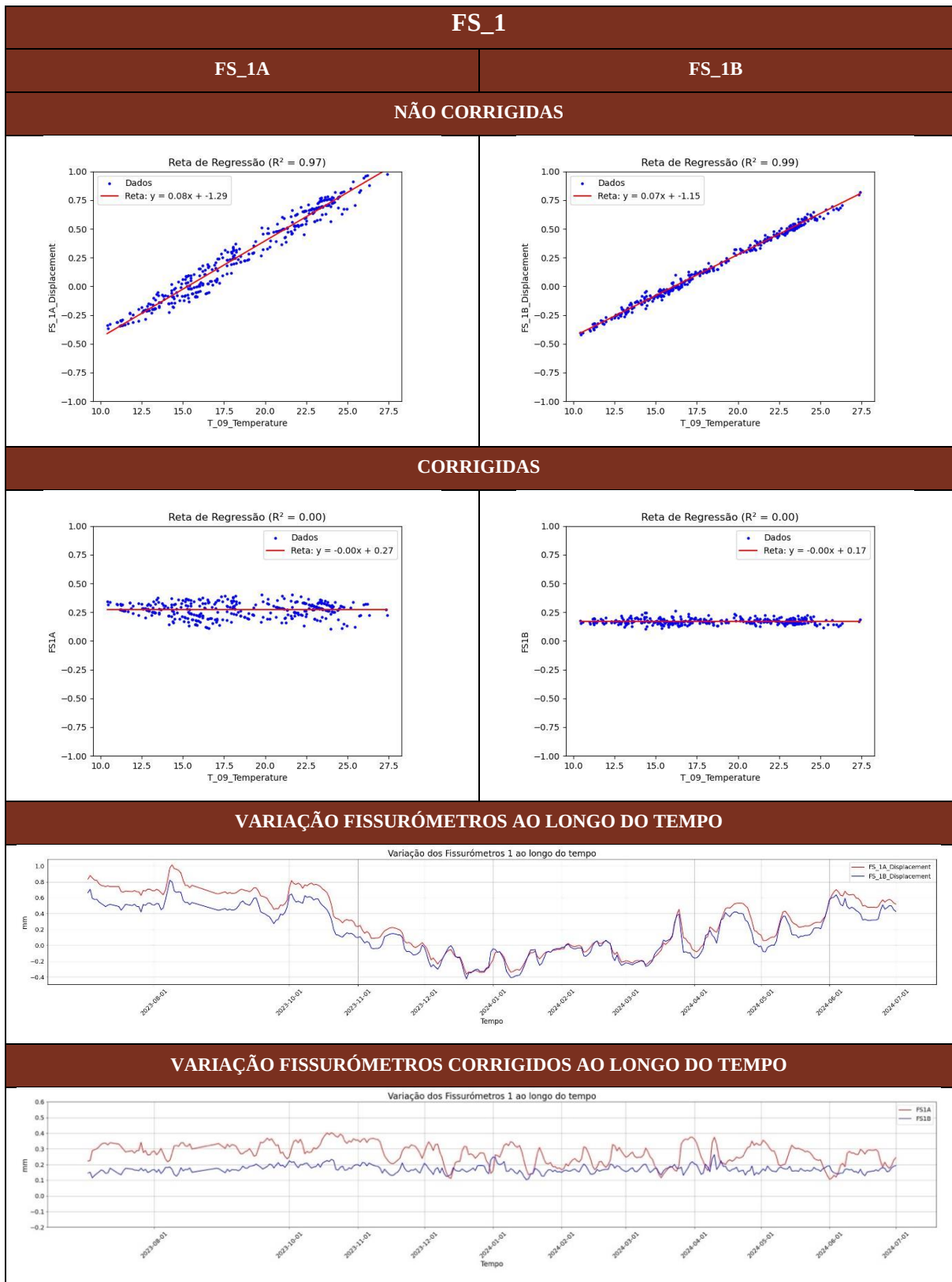


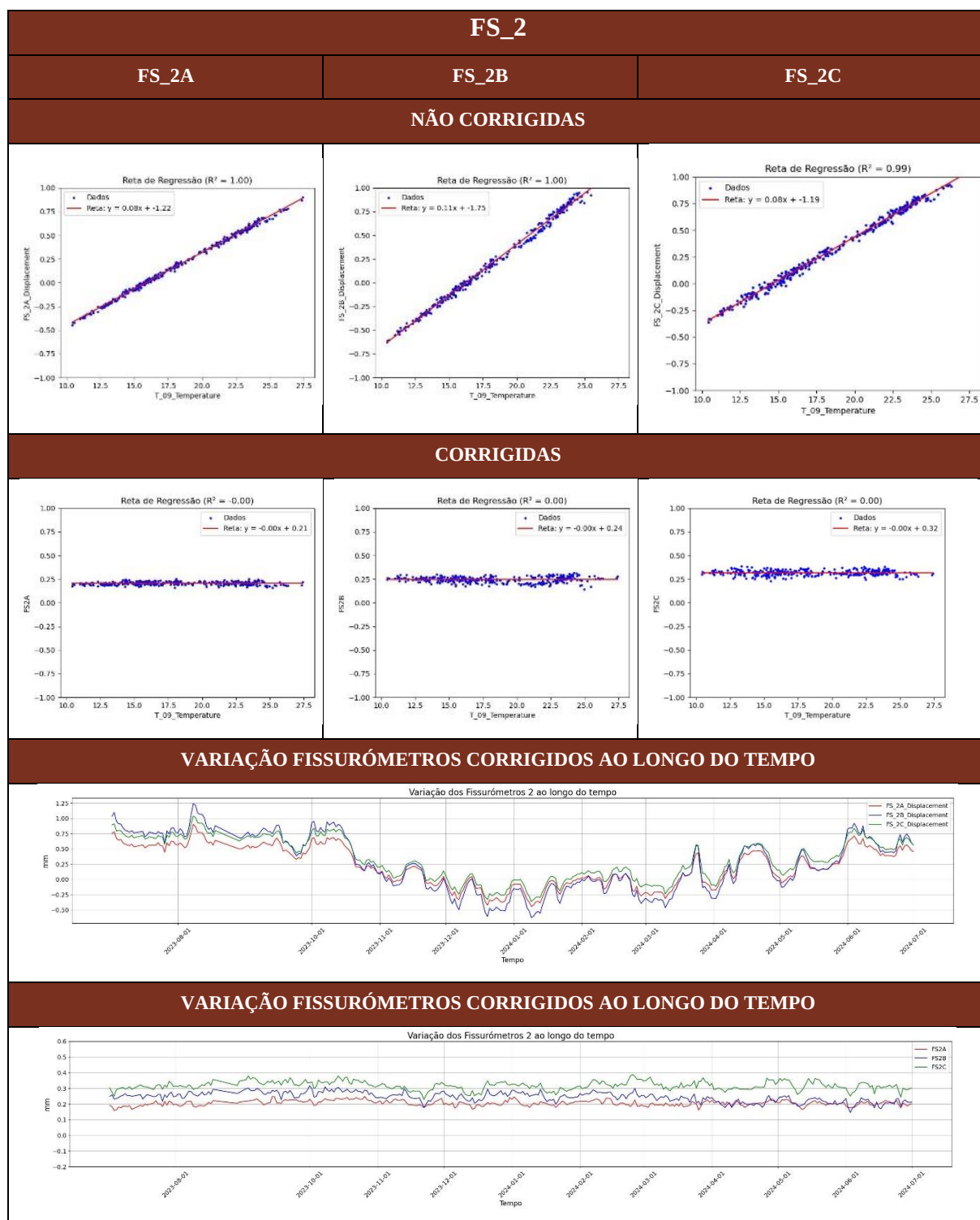
Figura 63 - Variação dos fissurómetros 1 corrigidos ao longo do tempo

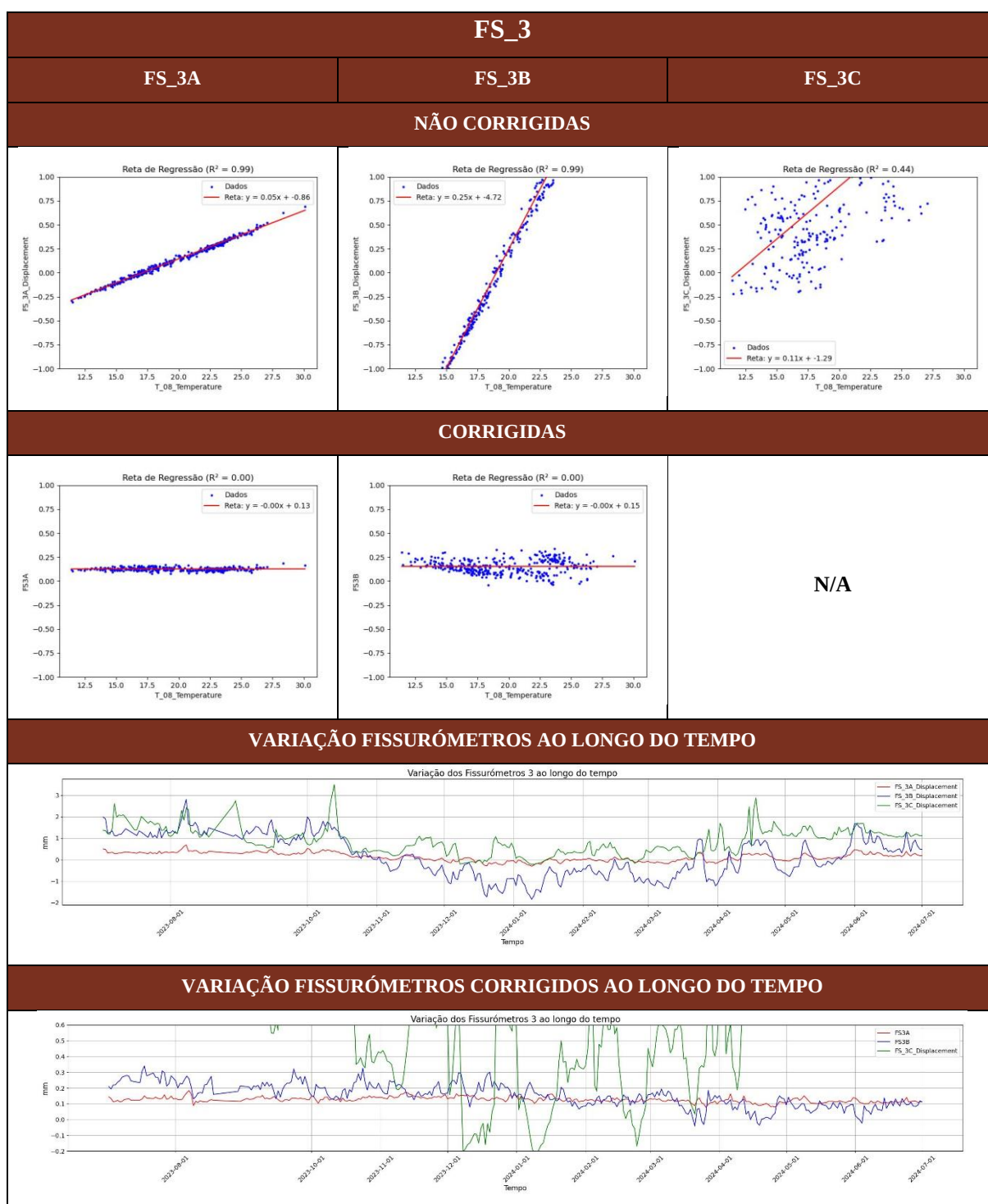
Esta análise permite obter uma melhor perceção do comportamento da parede estudada, sem que haja grandes flutuações, o que facilita na monitorização da estrutura.

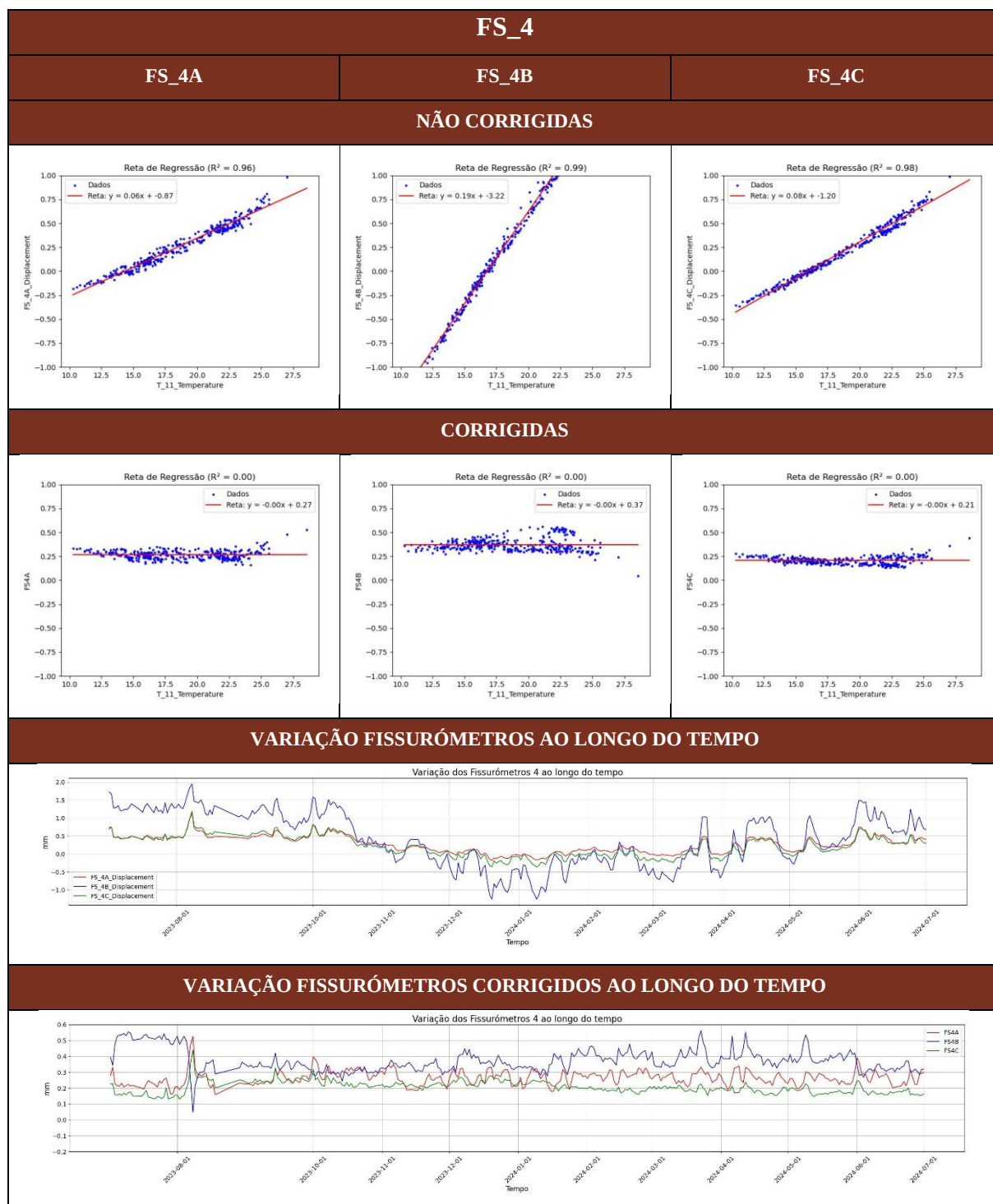
Nas seguintes páginas desta dissertação, encontram-se apresentados os resultados obtidos através do método utilizado anteriormente na análise dos valores dos fissurómetros sem a ação da temperatura.

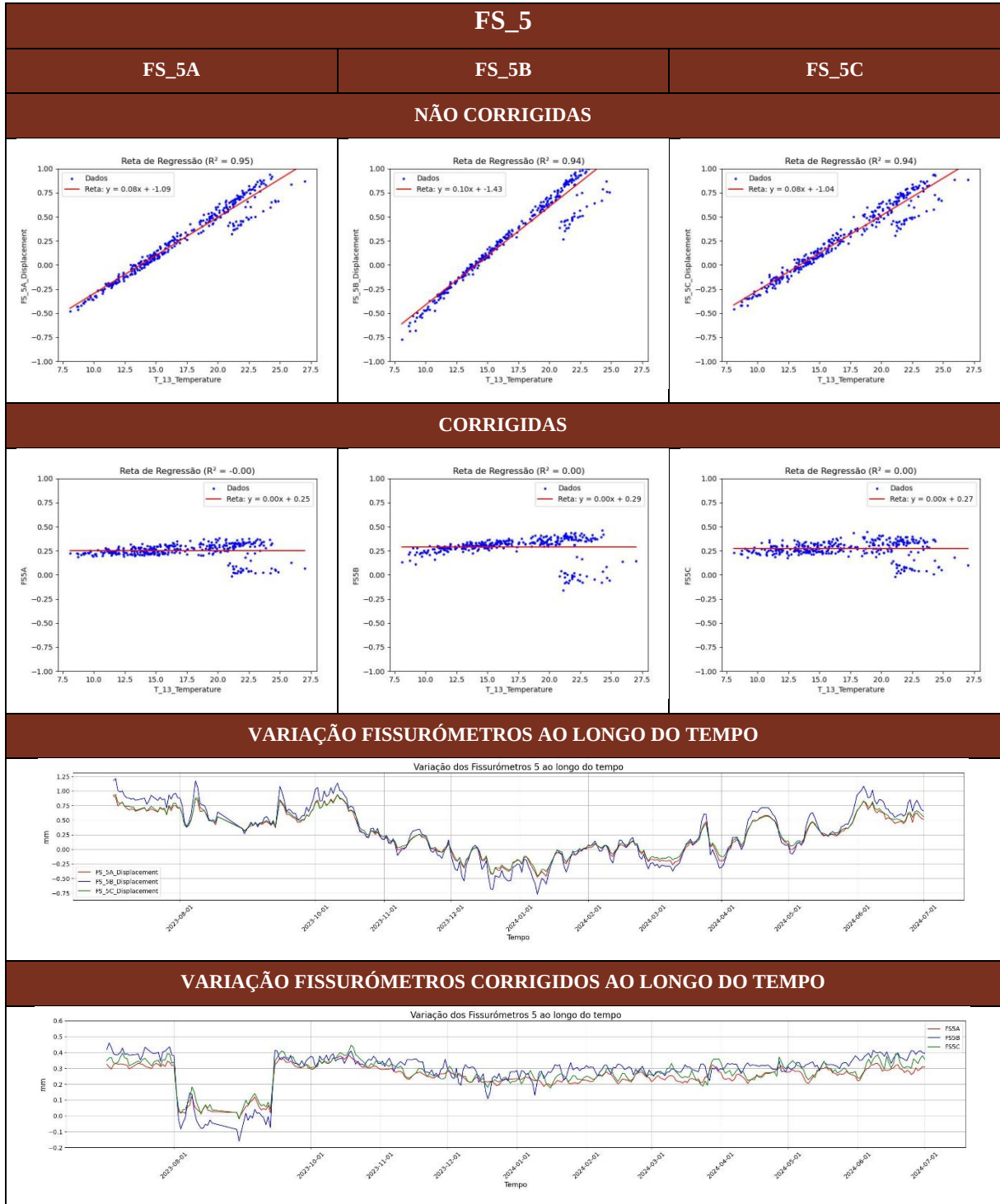
Estes quadros estão divididos pelos diferentes fissurómetros da mesma parede (A, B ou até C) onde se poderá encontrar inicialmente os gráficos dos valores medidos dos fissurómetros em função à temperatura. De seguida, encontrar-se-á os mesmos gráficos, porém com a correção dos valores dos fissurómetros removendo o efeito da temperatura. Por fim, estarão apresentados os gráficos dos fissurómetros, tanto antes da extração da ação da temperatura, como após, em função do ano em estudo.

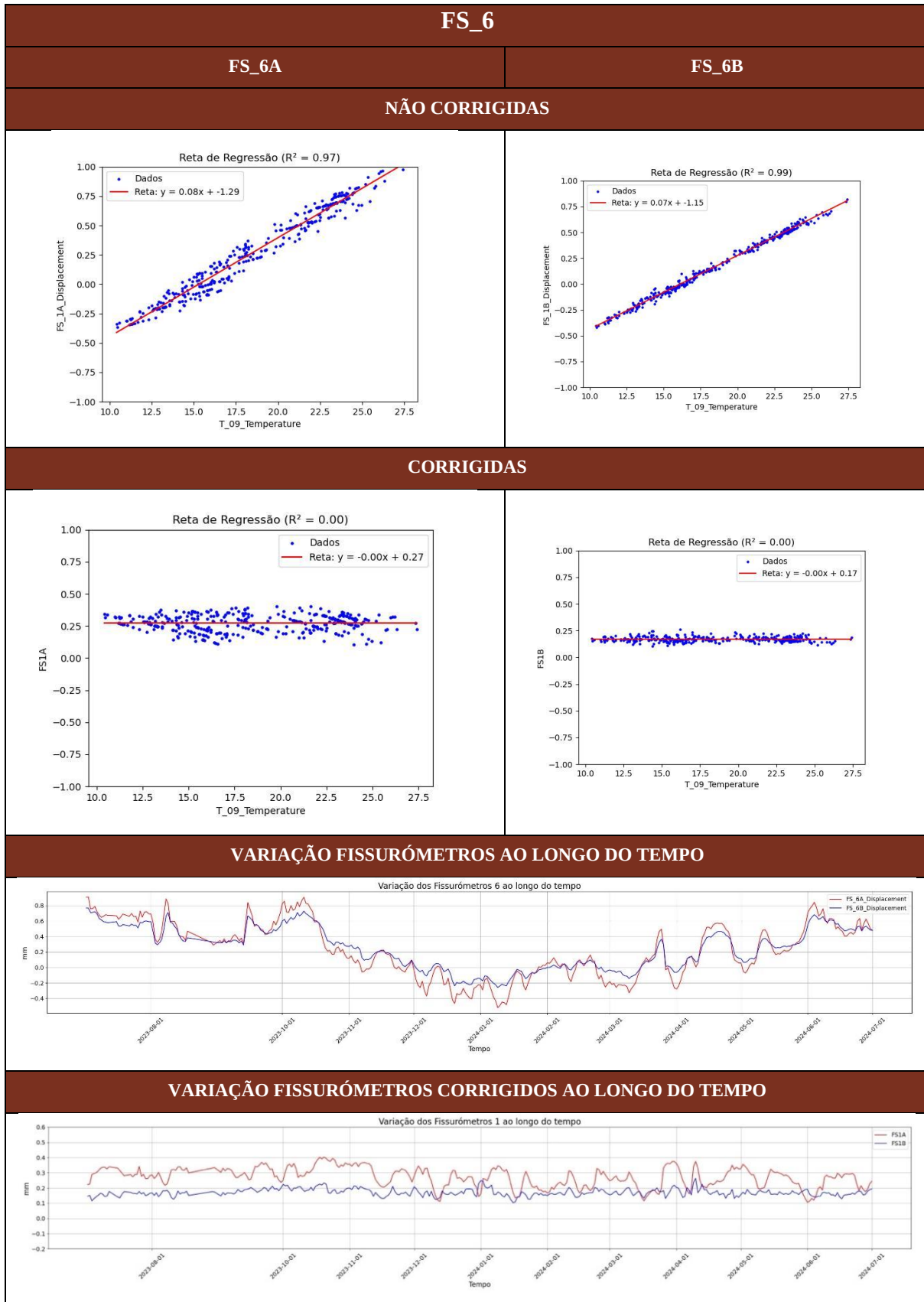












3.3.3.1. Análise e discussão

A análise dos resultados permite concluir que os mesmos foram bastante satisfatórios pela possibilidade de remoção da ação da temperatura aos valores dos fissurómetros, o que auxiliará na monitorização de uma estrutura. Este método poderá vir a ser bastante útil no SHM, sendo esta uma possibilidade de observar o comportamento estrutural sem grandes flutuações de dados.

Apesar destes resultados terem sido bastante satisfatórios, existem alguns pontos relevantes que merecem ser mencionados:

- **Relevância da Variação dos Dados** – Os dados apresentados, apesar de pouco perceptíveis, têm maior relevância na sua variação do que nos valores obtidos. Assim sendo, a pouca perceção dos valores apresentados nos gráficos é, na verdade, altamente representativa, sendo considerada de maior importância a oscilação dos resultados.
- **Fissurómetro FS_3C** – Como observado no quadro dos fissurómetros 3, não existe correção do fissurómetro FS_3C. A razão para este fissurómetro não ter sido corrigido deve-se ao facto de que o mesmo não se encontra com valores relacionados com a temperatura. Este facto poderá ser observado na discrepância de registos em relação à reta de regressão linear e também no coeficiente de determinação que regista um valor de 0.44. Assim, como na correção das inclinações, foi utilizado o mesmo requisito para o coeficiente de determinação ($R^2 > 0.75$) no qual o FS_3C não cumpre com este requisito.

3.3.4. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR

Os materiais sofrem alterações na sua composição com a variação da temperatura, seja por contração ou pela dilatação dos mesmos. Assim sendo, o aumento do volume de um corpo através do aumento da temperatura pode ser estudado através do coeficiente de dilatação térmica linear:

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T} \quad (1)$$

Este coeficiente é dado pela razão entre a variação da extensão e a variação da temperatura, onde estas são a diferença entre todos os momentos e o momento inicial:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\Delta T = T_i - T_0 \quad (3)$$

Após a compreensão deste conceito, foi estudado o coeficiente de dilatação térmica linear das paredes da estação com o apoio dos fissurómetros. Estes fissurómetros foram essenciais para este cálculo, sendo que cada sensor mede a variação do comprimento da parede no vão posicionado. Deste modo, foi utilizado o somatório de todos os valores dos fissurómetros de cada parede com o objetivo de se obter uma visão geral da parede.

Com base no exemplo do vestíbulo, este é composto por duas zonas de medição de fissurómetros: a parede norte e a parede sul, ambas revestidas com os icónicos azulejos da Estação de S. Bento.

Utilizando como exemplo a parede norte do vestíbulo, irá ser utilizado o algoritmo apresentado na Figura 64 no cálculo do coeficiente de dilatação térmica linear.

```

coef_3['ΔL'] = fs['FS_3A_Displacement']/1000 + fs['FS_3B_Displacement']/1000 + fs['FS_3C_Displacement']/1000

coef_3['L0'] = 13.70

coef_3['ε'] = coef_3['ΔL']/coef_3['L0']

coef_3['Δε'] = coef_3['ε'] - coef_3.iloc[0]['ε']

coef_3['ΔT'] = temp['T_08_Temperature'] - temp.iloc[0]['T_08_Temperature']

coef_3['α'] = (coef_3['Δε'] / coef_3['ΔT']) * 10**5

coef_3

```

Figura 64 - Algoritmo utilizado no cálculo do coeficiente de dilatação térmica linear (α)

Neste algoritmo é possível observar que:

- A variação do comprimento da parede foi calculada através da soma de todos os registos dos fissurómetros da parede.
- L0 refere-se ao comprimento base da parede.
- ε é a fração entre a variação do comprimento da parede e o comprimento base da parede.
- A variação da extensão consiste na subtração da extensão no momento “i” com o valor da extensão no momento inicial.
- A variação da temperatura consiste na subtração da temperatura no momento “i” com o valor da temperatura no momento inicial.
- O coeficiente de dilatação térmica linear (α) consiste no quociente entre a variação da extensão e a variação da temperatura.

Através deste processo foi, então, possível obter o quadro apresentado na Figura 65.

	Time	ΔL	L0	ε	Δε	ΔT	α (E5)
0	2023-07-02 00:00:00+00:00	0.003854	13.7	0.000281	0.000000	0.000000	NaN
1	2023-07-03 00:00:00+00:00	0.003743	13.7	0.000273	-0.000008	-0.249370	3.251306
2	2023-07-04 00:00:00+00:00	0.002744	13.7	0.000200	-0.000081	-3.099273	2.615623
3	2023-07-05 00:00:00+00:00	0.002792	13.7	0.000204	-0.000078	-2.910958	2.662905
4	2023-07-06 00:00:00+00:00	0.003141	13.7	0.000229	-0.000052	-2.681207	1.942452
...	...	...	...	...	...	...	...
343	2024-06-27 00:00:00+00:00	0.002155	13.7	0.000157	-0.000124	-4.347340	2.853430
344	2024-06-28 00:00:00+00:00	0.002391	13.7	0.000175	-0.000107	-3.776640	2.828205
345	2024-06-29 00:00:00+00:00	0.002044	13.7	0.000149	-0.000132	-4.897506	2.698146
346	2024-06-30 00:00:00+00:00	0.001803	13.7	0.000132	-0.000150	-5.601989	2.672391
347	2024-07-01 00:00:00+00:00	0.001781	13.7	0.000130	-0.000151	-5.655366	2.675331

Figura 65 - Resultado do estudo do coeficiente de dilatação térmica linear

Após este processo, interpretou-se o coeficiente de dilatação térmica linear desta parede como a média de todos os valores obtidos. Assim sendo, o coeficiente de dilatação térmica linear da parede norte do vestíbulo é igual a $2.71\text{E-}5\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($\alpha = 2.71\text{E-}5\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Aplicando o mesmo processo à parede sul do vestíbulo, foi possível obter um coeficiente de dilatação térmica linear de $2.47\text{E-}5\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($\alpha = 2.47\text{E-}5\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Estes resultados encontram-se bastante satisfatórios pela proximidade de valores.

A tabela seguinte apresenta os valores dos coeficientes de dilatação térmica linear de todas as paredes em estudo pelos fissurómetros.

Tabela 6 - Coeficientes de dilatação térmica das paredes da Estação de S.Bento

	Parede	Coeficiente de dilatação térmica linear
Vestíbulo	Norte	$\alpha = 2.71\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
	Sul	$\alpha = 2.47\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Torreão Norte	Norte	$\alpha = 1.72\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
	Oeste	$\alpha = 2.06\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Torreão Sul	Sul	$\alpha = 2.62\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
	Oeste	$\alpha = 3.07\text{E-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

3.3.4.1. Análise e discussão

- **Assunção da Homogeneidade das Paredes** – Para o cálculo do coeficiente de dilatação térmica linear, estar-se-á a pressupor a existência de uma homogeneidade das paredes, sendo estas compostas por alvenaria tradicional de pedra de granito. Assim, é essencial admitir uma homogeneidade das paredes de modo que esta análise seja coerente.
- **Variação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear** – Ao analisar o quadro anteriormente apresentado, pode-se notar a existência de uma ligeira variação do coeficiente de dilatação térmica das paredes da mesma zona de 10 a 20%. Esta variação, apesar de não ser significativa, poderá estar relacionada com variabilidade na constituição das diferentes paredes de alvenaria de pedra.

4

CONCLUSÕES

4.1. CONCLUSÕES FINAIS

A monitorização do estado da condição estrutural de edifícios históricos é um desafio essencial para a preservação do património, especialmente em contextos urbanos sujeitos a intervenções significativas, como é o caso da expansão do Metro do Porto. Ao longo desta dissertação, foi analisada a relação entre os diversos sensores instalados na Estação de S. Bento, com o objetivo de procurar relações entre os resultados obtidos da monitorização.

Analisando os resultados dos sensores instalados, foi possível verificar sobre a existência de uma influência da temperatura nos clinómetros. A expurgação da ação da temperatura nestes sensores permite uma melhor compreensão do comportamento da estrutura, o que poderá facilitar a sua monitorização e a identificação de possíveis anomalias.

No que diz respeito aos sensores de nível, questionou-se a possibilidade de validar as medições obtidas através do cálculo do ângulo de distorção entre dois sensores consecutivos. Esta abordagem revelou-se bastante benéfica para a monitorização da estrutura, uma vez que permitiu confirmar a sua movimentação com base nos ângulos de distorção. Além disso, a geração de mapas topográficos a partir dos sensores de nível revelou ser uma ferramenta importante na visualização e compreensão do comportamento do solo ao longo do tempo.

Através dos fissurómetros, foram recolhidas informações valiosas sobre a evolução das paredes da estação ao longo do período de monitorização. Assim sendo, verificou-se que a temperatura também afeta as medições destes sensores, levando assim a variações significativas que poderão não ter qualquer significado negativo na condição estrutural da estrutura. Para remover esse efeito, foi utilizado o método utilizado nos clinómetros com o objetivo de expurgar o efeito da temperatura aos resultados dos fissurómetros. Assim, os resultados desta remoção do efeito da temperatura nos fissurómetros poderão facilitar a monitorização e a identificação de possíveis aberturas de fendas.

Além de permitir uma melhor avaliação das aberturas de fissuras, os fissurómetros possibilitaram a recolha dos dados necessários para a análise do coeficiente de dilatação térmica das paredes, o que poderá ser um aspeto útil em futuras monitorizações e investigações.

Por fim, esta dissertação contribuiu para a simplificação do processo de monitorização de edifícios históricos, fornecendo metodologias que poderão ser aplicadas noutros estudos similares. A monitorização contínua e a correta interpretação dos dados recolhidos serão fundamentais para a preservação das estruturas e para a tomada de decisões mais informadas relativamente à sua conservação e manutenção.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Relativamente a possíveis desenvolvimentos em investigações futuras, podem ser consideradas algumas questões.

A aplicação de modelos de inteligência artificial na monitorização de estruturas surge como uma área de elevado interesse, uma vez que estas técnicas permitem uma análise mais detalhada e preditiva do comportamento das estruturas. A utilização de algoritmos de deep learning em Structural Health Monitoring (SHM) tem vindo a ganhar destaque, pois possibilita a deteção de padrões complexos e a previsão de falhas antes que estas se tornem críticas. Estes avanços podem contribuir para a otimização da manutenção preditiva e para a redução de custos associados a intervenções corretivas.

Para além da integração de modelos de inteligência artificial, outro desenvolvimento relevante seria a criação de um sistema de emissão de alertas com base na definição de valores limite para os parâmetros sujeitos a monitorização, estabelecendo critérios de alerta mais significativos e coerentes com a monitorização estrutural de edifícios históricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Karimi, N., M. Mishra, and P.B. Lourenço, *DEEP-LEARNING TECHNIQUES FOR STRUCTURAL HEALTH MANAGEMENT OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS*. WCEE 2024, 2024: p. 10.
2. Farrar, C.R. and K. Worden, *An introduction to structural health monitoring*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. **365**(1851): p. 303-315.
3. Chen, H.-P. and Y. Ni, *Introduction to structural health monitoring*. Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures, 2018: p. 1-14.
4. Malekloo, A., et al., *Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights*. Structural Health Monitoring, 2022. **21**(4): p. 1906-1955.
5. Abedi, M., et al., *Smart geosynthetics and prospects for civil infrastructure monitoring: a comprehensive and critical review*. Sustainability, 2023. **15**(12): p. 9258.
6. Roseiro, J., *Causas, anomalias e soluções de reabilitação estrutural de edifícios antigos—Estudo de caso*. 2012, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
7. Mishra, M., P.B. Lourenço, and G.V. Ramana, *Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review*. Journal of Building Engineering, 2022. **48**: p. 103954.
8. Mahajan, L.S., M. Kirange, and G. Suryawanshi. *An Artificial Intelligence Applications in Structural Engineering*. in *International Conference Innovation in Smart and Sustainable Infrastructure*. 2022. Springer.
9. Carrara, F., et al., *Deep learning for structural health monitoring: An application to heritage structures*. arXiv preprint arXiv:2211.10351, 2022.
10. Farrar, C.R. and K. Worden, *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. 2012: John Wiley & Sons.
11. Metro do Porto, S.A., *Extensão do Metro do Porto: Linha Rosa (Casa da Música – São Bento)*. 2023.
12. Cool, P. *Estação de São Bento*. 17 janeiro 2025]; Available from: <https://portocool.com/visitar/estacao-sao-bento>.
13. Património, I. *Estação de Porto – São Bento*. 17 de janeiro de 2025]; Available from: <https://www.ippatrimonio.pt/pt-pt/estacoes/estacao-de-porto-sao-bento>.
14. António Arêde, G.F., Nuno Pinto, Guilherme Nogueira, Susana Moreira, *Relatório de instalação do sistema de monitorização estrutural*. 2021.
15. InfluxDB. 21 de janeiro de 2025]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/InfluxDB>.
16. *The role of Python in Big data and analytics*. 22 de janeiro de 2025]; Available from: <https://gaper.io/role-of-python-in-big-data/>.
17. *Jupyter Notebook*. Jupyter Notebook 22 de janeiro de 2025]; Available from: <https://jupyter.org/>.

