U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM OBRAS DE ARTE

CARLOS MIGUEL LEAL VIEIRA DA CUNHA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras

Co-Orientador: Engenheiro António Francisco Sotto Mayor Pestana da Silva

JULHO DE 2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e Afilhado

A vitória tem mil pais, mas a derrota é órfã.

John Kennedy

AGRADECIMENTOS

Neste ponto, apresento os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas envolvidas no presente trabalho que, directa ou indirectamente, contribuíram para a sua realização.

Agradeço à *Leica Geosystems Portugal* o empréstimo dos equipamentos GNSS que tornaram possível a realização dos ensaios apresentados, em especial ao seu representante, Engenheiro Luís Santos, pela resposta aos vários pedidos de informação formalizados.

Agradeço também ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras, pela orientação e apoio ao longo de todo o trabalho. Presto os meus agradecimentos ao co-orientador desta dissertação, Engenheiro António Pestana, pelo incentivo, pelos conhecimentos transmitidos, pelo auxílio prestado e pela disponibilidade demonstrada ao longo de todas as etapas, não esquecendo as boas conversas tidas nas reuniões de trabalho.

Quero expressar também o meu agradecimento ao Engenheiro Carlos Félix pelo apoio dado no início da caminhada que agora termina.

Agradeço ao Engenheiro Carlos Rodrigues a preciosa ajuda dada na realização dos ensaios laboratoriais e, especialmente, a ajuda dada na interpretação de resultados dos ensaios levados a cabo com o sistema de medição de deslocamentos verticais com base em níveis líquidos.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto a grande ajuda e a disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios, nomeadamente à Paula Silva, ao Cláudio Ferraz, ao Rémy Faria e ao Sr. Alberto Monteiro.

Em especial, agradeço aos meus pais pela possibilidade de formação no ensino superior. Agradeço-lhes toda a educação e os valores que me passaram ao longo da minha vida. O apoio constante e os ensinamentos que por eles me foram transmitidos, permitiram-me sempre ultrapassar todos os momentos menos bons que surgiram ao longo do trajecto percorrido.

Manifesto o meu agradecimento aos meus amigos e colegas de curso, pelos momentos passados em conjunto na Faculdade, em especial ao Augusto Faria, à Carina Freitas, ao José Barros e ao Marco Fernandes por todos os bons momentos que passamos, lado a lado, ao longo dos últimos cinco anos das nossas vidas.

A todos vós, sem excepção, o meu muito obrigado.

RESUMO

O emprego de sistemas de monitorização nas estruturas de Engenharia Civil tem vindo a crescer nas últimas décadas. A sua aplicação justifica-se como parte integrante dos programas de manutenção estrutural, contribuindo por um lado para um maior conhecimento do comportamento a longo prazo das estruturas e por outro para a antecipação na resposta a eventuais danos detectados, através da medição de grandezas que demonstrem um desempenho inadequado da estrutura monitorizada.

A aplicação de novos sistemas de monitorização estrutural, com base em sistemas de posicionamento por satélites, com recurso ao GNSS (*Global Navigation Satellite System*), tem experimentado mais recentemente grandes desenvolvimentos, sobretudo devido às novas soluções tecnológicas dos receptores, mais avançadas mas também mais económicas, e ao desenvolvimento de modelos de processamento de sinal. Por outro lado, a programada colocação em órbita de mais satélites, e a disponibilização de mais informação a partir dos já existentes, torna previsível uma utilização mais robusta, mais fiável e mais alargada destes sistemas.

Actualmente, a monitorização dos deslocamentos horizontais dos mastros de obras de arte atirantadas faz-se por meios indirectos, através da medição de grandezas que permitem posteriormente obter o valor dos deslocamentos pretendidos. Neste âmbito, surge o interesse em estudar a possível aplicação destes sistemas de posicionamento por satélites, com recurso ao GNSS, no caso particular da monitorização estrutural das obras de arte.

Por outro lado, a medição de deslocamentos verticais com recurso ao sistema GNSS não se tem revelado suficientemente precisa. Neste contexto, a utilização de sistemas de medição de deslocamentos verticais com base no método dos níveis líquidos, utilizando transdutores baseados em sensores de fibra óptica ou em sensores eléctricos, assume particular importância como solução da necessidade de monitorização de flechas e de assentamentos de apoios em obras de arte.

Pelo exposto, a presente dissertação tem dois objectivos principais: em primeiro lugar adquirir sensibilidade para a utilização do sistema GNSS na monitorização de deslocamentos em obras de arte, com a realização de ensaios de índole laboratorial e, noutra vertente, adquirir conhecimento para a utilização do sistema de níveis líquidos, comparando o desempenho de dois tipos de sensores e avaliando a cinemática do deslocamento que os sensores são capazes de medir com precisão. Também neste caso, o estudo será baseado em ensaios laboratoriais.

Finalmente, o desempenho destes dois tipos de sistemas de monitorização é demonstrado com a respectiva aplicação a dois casos reais de monitorização de obras de arte. São ainda apresentadas conclusões sobre os ensaios realizados e perspectivas de desenvolvimentos futuros.

PALAVRAS-CHAVE: monitorização estrutural, GNSS, método de níveis líquidos, obras de arte.

ABSTRACT

In the last decades, important progresses have been achieved in the field of Structural Health Monitoring (SHM) systems applied to civil engineering structures. Their use is justified since they play an important role in maintenance programs, long term behaviour analysis of complex structural systems and in the evaluation of potential damage cases, which can be detected by using special algorithms that compare various data related to different properties of the structure's condition with specified limits.

Recently, new technologies based on satellite positioning techniques, such as the Global Navigation Satellite System (GNSS), experienced important progresses. These improvements were due to new solutions implemented in the receptors, for instance electronic filters, that at the same time led to a more advanced and economic SHM system. Furthermore, the developments made in signal processing and the goal of soon increasing the number of available satellites in orbit, let predict a more robust, reliable and extensive use of these systems.

Currently, monitoring the horizontal displacements of cable-stayed masts is done indirectly by means of other sensors that measure a different structural property easily related to the displacements wanted. Therefore, in order to assess the potential application of satellite positioning systems using the GNSS in bridges, further studies are essential.

Controlling vertical displacements using GNSS has not proved to be sufficiently accurate, therefore, new transducers based on hydrostatic levelling systems using fibre-optic and electrical sensors have been developed aiming to monitor not only the bridge's vertical displacements, but also their settlements.

Thus, this thesis has two main purposes. First of all, some laboratory experiments were conducted with the intent of acquiring sensitivity with the use of GNSS in bridges' monitoring. Secondly, by comparing the response and behaviour of fibre-optic and electrical sensors used in hydrostatic levelling systems and testing this same system under kinematic conditions, the monitoring of vertical displacements was analysed.

Finally, the performances of these two types of monitoring systems were studied in two real life civil engineering applications.

KEYWORDS: structural health monitoring, GNSS, hydrostatic levelling system, bridge's displacements

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS 3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 4

2. O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE ... 5

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 5
2.2. A ARQUITECTURA DO SISTEMA GPS 6
2.3. OS DADOS TRANSMITIDOS PELOS SATÉLITES 8
2.4. FACTORES QUE INFLUENCIAM A PRECISÃO DE POSICIONAMENTO 11
2.4.1. Posicionamento relativo do conjunto Satélites/Receptor 11
2.4.2. Fontes de erro no posicionamento por satélite 12
2.4.3. A actividade solar e o sistema GNSS 22
2.5. DETERMINAÇÃO DAS PSEUDO-DISTÂNCIAS 26
2.5.1. Pseudo-Distâncias por análise de código 26
2.5.2. Pseudo-Distâncias por análise de Fase da Portadora 28
2.6. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE POSICIONAMENTO TRIDIMENSIONAL POR GNSS 35
2.7. TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO 37
2.7.1. Posicionamento autónomo 37
2.7.2. Posicionamento Diferencial 38
2.8. SISTEMAS DE COORDENADAS 42
2.8.1. Coordenadas Geodésicas Elipsoidais 43
2.8.2. Coordenadas Geodésicas Rectangulares 43
2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS 44

3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO GNSS 49

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 49
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO E DO SOFTWARE UTILIZADO 50
3.3. IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS 53

3.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS ESTÁTICOS 54

3.5. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS CINEMÁTICOS 62

3.5.1. Ensaios por patamares de deslocamento 64

3.5.2. Ensaios por aplicação contínua de deslocamento 67

3.5.3. Ensaios por aplicação de deslocamentos harmónicos 69

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA GNSS SUBMETIDO A FONTES DE INTERFERÊNCIA 73

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 73

4.2. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS EM AMBIENTE REFLEXIVO 73

4.2.1. Análise de dados relativos aos 30 minutos que antecederam a mudança da EST2 75

4.2.1. Análise de dados do ensaio do dia 20 de Abril 77

4.2.2. Análise de dados do ensaio do dia 21 de Abril 83

4.3. ENSAIOS CINEMÁTICOS REALIZADOS DURANTE UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA 88

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 92

5. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SENSORES DE FLECHAS COM BASE EM NÍVEIS LÍQUIDOS 93

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 93

5.2. MÉTODO DE NÍVEIS LÍQUIDOS 94

5.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS 95

5.4. ENSAIOS LABORATORIAIS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA 101

5.4.1. Ensaio 1.1 102

5.4.2. Ensaio 1.2 104

5.4.3. Ensaio 1.3 105

5.4.4. Ensaio 1.4 107

5.4.5. Ensaio 1.5 108

5.4.6. Ensaio 4.2 109

5.4.7. Ensaio 4.3 110

5.4.8. Ensaio 4.4 111

5.5. ENSAIOS LABORATORIAIS COM SENSORES ELÉCTRICOS 113

5.5.1. Ensaio 1.1 113

5.5.2. Ensaio 1.2 ... 114
5.5.3. Ensaio 1.3 ... 115
5.5.4. Ensaio 1.4 ... 116
5.5.5. Ensaio 4.2 ... 118
5.5.6. Ensaio 4.3 ... 119
5.5.7. Ensaio 4.4 ... 121
5.6. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE COMPORTAMENTO DOS SENSORES NO TEMPO ... 122
5.6.1. Análise da estabilidade de comportamento dos sensores ópticos no tempo ... 122
5.6.2. Análise da estabilidade de comportamento dos sensores eléctricos no tempo ... 124
5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS ... 126

6. APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A CASOS PRÁTICOS ... 129

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS ... 129
6.2. APLICAÇÃO DO SISTEMA GNSS NA MONITORIZAÇÃO DE UMA OBRA DE ARTE ... 130
6.2.1. O viaduto atirantado sobre a Via de Cintura Interna no Porto ... 130
6.2.2. Apresentação do ensaio e instalação dos sistemas de medição de deslocamentos ... 131
6.2.3. Análise e interpretação de resultados do ensaio ... 133
6.3. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA ... 135
6.3.1. A Ponte da Lezíria ... 135
6.3.2. Âmbito do programa de monitorização ... 136
6.3.3. Análise de dados e interpretação de resultados ... 138
6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS ... 140

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVA DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS ... 141

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS ... 141
7.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS ... 143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ... 145

ANEXOS ... 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Receptor LORAN do navio Gil Eanes. Fonte: Fotografia de Nuno Cristelo. 6

Figura 2.2 – Representação esquemática de duas das seis órbitas que compõem o segmento espacial do sistema GPS. Adaptado de: [11]. 7

Figura 2.3 – Estações de monitorização GPS da força Aérea Norte Americana e do NIMA. Adaptado de: [13]. 8

Figura 2.4 – Receptor de navegação (a) e receptor geodésico *Leica GMX 902 GG* (b). Adaptado de: [14]. 8

Figura 2.5 – Espectro de radiação. Adaptado de: [15]. 9

Figura 2.6 – Códigos modulados nas portadoras L1 e L2. Adaptado de: [11]. 10

Figura 2.7 – Variação da dispersão das observações efectuadas: (a) Selective Availability activada; (b) Selective Availability desactivada. Adaptado de: [11]. 10

Figura 2.8 – Volume de dois tetraedros definidos para dois arranjos distintos da posição relativa receptor/satélites. Adaptado de: [18]. 12

Figura 2.9 – Variação da espessura da camada Troposférica com a latitude. Adaptado de: [21]. 14

Figura 2.10 – Variação da temperatura nas camadas atmosféricas com a altitude. Adaptado de: [22]. 14

Figura 2.11 – Alteração das sub-camadas da Ionosfera com a incidência da radiação solar (a) e variação da densidade de electrões com a altitude (b). Adaptado de: (a) – [25] e (b) – [26]. 17

Figura 2.12 – Aumento da distância atmosférica percorrida pelo sinal GPS com a diminuição da elevação dos satélites observados. 18

Figura 2.13 – Exemplos de ambientes reflexivos que provocam o efeito de *multipath*. 20

Figura 2.14 – Antenas GNSS do tipo *choke ring*: (a) – Fabricante: Leica Geosystems; (b) – Fabricante: Trimble. 21

Figura 2.15 - Leica AX1202 Geodetic Antenna: (a) – Estrutura interna da base *pinwheel* da antena [28]; (b) – Aspecto exterior da antena [29]. 21

Figura 2.16– Registo da actividade solar e previsão do pico do ciclo solar número 24. Adaptado de: [33]. 23

Figura 2.17 - Campo magnético terrestre influenciado por uma rajada solar (a) e aurora boreal (b). Adaptado de: [15]. 23

Figura 2.18 - Índices Kp relativos aos dias 10 a 14 de Abril de 2010. Adaptado de: [36]. 25

Figura 2.19 - Escala temporal de avisos/alertas relativos ao “Tempo Espacial” lançados pela NOAA [37]. 25

Figura 2.20 – Determinação do atraso entre o código gerado pelo satélite p e a sua réplica gerada no receptor k no instante i. Adaptado de: [11] 27

Figura 2.21 – Representação da configuração das ondas num referencial temporal e num referencial espacial. 30

Figura 2.22 – Onda electromagnética recebida do satélite e gerada pelo receptor em fase. 30

Figura 2.23 – Diferença de fase entre onda enviada pelo satélite e a sua réplica gerada no receptor. 31

Figura 2.24 – Determinação da ambiguidade inicial. 34

Figura 2.25 – Determinação das coordenadas de um ponto em posicionamento autónomo..... 37

Figura 2.26 - Representação esquemática do método das diferenças simples. Fonte: O autor. 39

Figura 2.27 – Representação esquemática do método das diferenças duplas. 40

Figura 2.28 – Representação das coordenadas geodésicas elipsoidais de um ponto [11]. 43

Figura 2.29 – Referencial geodésico rectangular [11]. 44

Figura 3.1 – Esquematização do referencial local utilizado. 49

Figura 3.2 - Antena geodésica compacta GNSS Leica AX1202 GG. 50

Figura 3.3 – Receptor Leica GMX902 GG (a) e conversor Moxa NPort 5100A Series (b). 51

Figura 3.4 – Arquitectura do sistema instalado. 51

Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um LVDT: estrutura básica (a) e amplitude da tensão de saída (b). Adaptado de: [49]. 52

Figura 3.6 – Transdutor de deslocamentos: *UniMeasure* HX-P420 (a) e RDP DCTH2000C/371A (b). 53

Figura 3.7 - Ilustração do posicionamento das antenas das estações na cobertura do edifício H da FEUP. Adaptado de: [50]. 54

Figura 3.8 – Unidade de armazenamento e processamento dos dados recebidos. 54

Figura 3.9 – Variação temporal da distância entre as estações processada pelo *software Leica GNSS Quality Control*. 55

Figura 3.10 - Variação temporal da distância entre as estações das observações em bruto utilizando o *script MATLAB* desenvolvido. 56

Figura 3.11 - Variação temporal da distância entre as estações das observações em bruto e com aplicação de filtros de médias móveis de 10 e 30 segundos utilizando o script desenvolvido. 57

Figura 3.12 – Representação gráfica da nuvem das coordenadas horizontais utilizando: (a) *software Leica GNSS Quality Control*; (b) *script MATLAB*. 57

Figura 3.13 - Variação temporal do desnível entre as estações para observações em bruto e com aplicação de filtros de médias móveis de 10 e 30 segundos utilizando o *script* desenvolvido. 58

Figura 3.14 – Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano H-EW (a) e no plano H-NS (b). 59

Figura 3.15 - Resíduos da linha de base projectada na direcção NS em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos. 59

Figura 3.16 - Resíduos da linha de base projectada na direcção EW em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos. 60

Figura 3.17 - Resíduos da linha de base projectada na direcção vertical em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos. 60

Figura 3.18 – Redução do desvio-padrão pela aplicação de filtros de médias móveis aos dados em bruto. 61

Figura 3.19 – Disposição dos equipamentos de medição nos ensaios dinâmicos. 62

Figura 3.20 – Plataforma de madeira utilizada nos ensaios cinemáticos e disposição dos equipamentos após montagem. 63

Figura 3.21 – Orientação da antena móvel nos ensaios realizados: direcção EW (a) e direcção NS (b). 64

Figura 3.22 – Ilustração do deslocamento da antena móvel durante os ensaios cinemáticos realizados. 64

Figura 3.23 - Ensaios cinemáticos por patamares de deslocamentos na direcção NS. 65

Figura 3.24 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para a aplicação de deslocamentos em patamares. 66

Figura 3.25 – Ensaios dinâmicos por patamares de deslocamentos na direcção EW. 66

Figura 3.26 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em patamares. 67

Figura 3.27 - Ensaios cinemáticos por aplicação contínua de deslocamentos na direcção NS. 67

Figura 3.28 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para aplicação de deslocamentos em contínuo. 68

Figura 3.29 - Ensaios cinemáticos por aplicação contínua de deslocamentos na direcção EW. 69

Figura 3.30 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em contínuo. 69

Figura 3.31 – Ensaio dinâmico cíclico na direcção NS. 70

Figura 3.32 – Espectro de composição do sinal do ensaio cíclico da direcção NS utilizando o algoritmo da FFT. 70

Figura 3.33 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para ensaio cíclico. 71

Figura 3.34 – Ensaio dinâmico cíclico na direcção EW. 71

Figura 3.35 – Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para ensaio cíclico. 72

Figura 3.36 – Valor médio e desvio-padrão dos resíduos dos ensaios cinemáticos. 72

Figura 4.1 – Localização das estações nos ensaios de reflexão. 74

Figura 4.2 – Local de implantação da EST2 para os ensaios da manhã do dia 20 de Abril de 2010. . 74

Figura 4.3 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS com aplicação de média móvel de 0,5 segundos. 75

Figura 4.4 – Resíduos da projecção da linha de base na direcção NS em relação à média móvel de 0,5 segundos. 75

Figura 4.5 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW com aplicação de média móvel de 0,5 segundos. 76

Figura 4.6 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção EW em relação à média móvel de 0,5 segundos. 76

Figura 4.7 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical com aplicação de média móvel de 0,5 segundos..... 77

Figura 4.8 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção vertical em relação à média móvel de 0,5 segundos. 77

Figura 4.9 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS. 78

Figura 4.10 – Resíduos da projecção da linha de base na direcção NS em relação à media móvel de 0,5 segundos. 78

Figura 4.11 Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW..... 79

Figura 4.12 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção EW em relação à media móvel de 0,5 segundos. 79

Figura 4.13 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical. 80

Figura 4.14 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção vertical em relação à media móvel de 0,5 segundos. 80

Figura 4.15 – Levantamento da base do ecoponto no local do ensaio de reflexão (a) e respectiva perturbação nos dados adquiridos (b). 81

Figura 4.16 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal. 82

Figura 4.17 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano EW-H. 83

Figura 4.18 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano NS-H. 83

Figura 4.19 - Local de implantação da EST2 para os ensaios da manhã do dia 21 de Abril de 2010: vista do Laboratório de Estruturas da FEUP (a) e vista do edifício do INESC (b). 84

Figura 4.20 Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS. 85

Figura 4.21 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção NS em relação à media móvel de 0,5 segundos. 85

Figura 4.22 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW. 86

Figura 4.23 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção EW em relação à media móvel de 0,5 segundos. 86

Figura 4.24 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical. 87

Figura 4.25 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical em relação à media móvel de 0,5 segundos. 87

Figura 4.26 – Índices Kp relativos aos dias 5 a 7 de Abril de 2010. Adaptado de: [54]. 89

Figura 4.27 – Comparação de deslocamentos das séries GNSS e LVDT para a direcção NS no ensaio de patamares realizado durante a ocorrência de uma tempestade solar. 90

Figura 4.28 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para aplicação de deslocamentos em patamares durante a ocorrência de uma tempestade solar. 90

Figura 4.29 - Comparação de deslocamentos das séries GNSS e LVDT para a direcção EW no ensaio de patamares realizado durante a ocorrência de uma tempestade solar. 91

Figura 4.30 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em patamares durante a ocorrência de uma tempestade solar. 91

Figura 5.1 – Esquema representativo da aplicação do método de níveis líquidos a uma ponte. 94

Figura 5.2 – Pormenor dos sensores utilizados: piezómetro existente no interior dos transdutores eléctricos (a) e célula de carga presente nos transdutores de flechas do LABEST (b). 96

Figura 5.3 – Esquema do circuito hidráulico do sistema de níveis líquidos. 97

Figura 5.4 – Pormenor da ligação do transdutor óptico (a) e do transdutor eléctrico (b) ao circuito.... 97

Figura 5.5 – Instalação dos transdutores activos sobre o prato da prensa do LABEST (a) e transdutor de referência ao lado do reservatório de alimentação do circuito hidráulico (b). 98

Figura 5.6 – Unidades de processamento e aquisição de dados: sensores de fibra óptica (a) e sensores eléctricos (b). 98

Figura 5.7 – Comparação dos deslocamentos obtidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa num ensaio previamente realizado. Adaptado de: [59]. 101

Figura 5.8 – Resíduos das leituras efectuadas pelo transdutor óptico. Adaptado de: [59]. 101

Figura 5.9 – Correlação entre os deslocamentos medidos pela prensa e pelo transdutor óptico..... 102

Figura 5.10 - Comparação dos deslocamentos obtidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa e respectivo resíduo. 103

Figura 5.11 - Correlação entre os deslocamentos medidos pela prensa e pelo transdutor óptico. ... 103

Figura 5.12 - Comparação dos deslocamentos verticais medidos pelos transdutores e respectivos resíduos. 104

Figura 5.13 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos. 105

Figura 5.14 - Comparação do deslocamento registado pela prensa, pelo transdutor óptico e respectivo resíduo. 106

Figura 5.15 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico. 106

Figura 5.16 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b). 107

Figura 5.17 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos. 107

Figura 5.18 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b). 108

Figura 5.19 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico. 108

Figura 5.20 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos sensores ópticos (a) e respectivo resíduo associado (b). 109

Figura 5.21 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico. 110

Figura 5.22 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo tradutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b). 110

Figura 5.23 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos. 111

Figura 5.24 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b). 112

Figura 5.25 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico. 112

Figura 5.26 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos. 113

Figura 5.27 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 114

Figura 5.28 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 115

Figura 5.29 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 115

Figura 5.30 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 116

Figura 5.31 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 116

Figura 5.32 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 117

Figura 5.33 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 117

Figura 5.34 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 118

Figura 5.35 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 119

Figura 5.36 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 120

Figura 5.37 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP3 (a) e SP2 (b). 120

Figura 5.38 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos sensores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b). 121

Figura 5.39 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 121

Figura 5.40 – Variação da leitura do sensor óptico do transdutor de referência. 122

Figura 5.41 - Variação da leitura de deslocamento do transdutor óptico activo. 123

Figura 5.42 – Diferença entre as leituras de deslocamento do transdutor óptico activo e de referência. 123

Figura 5.43 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP1 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b). 124

Figura 5.44 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP2 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b). 124

Figura 5.45 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP3 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b). 125

Figura 5.46 – Diferença dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP1 e pelos transdutores SP2 (a) e SP3 (b). 126

Figura 5.47 – Correlação entre a frequência de ensaio e o desvio-padrão dos resíduos de leitura dos transdutores ópticos e eléctricos. 128

Figura 6.1 – Corte longitudinal do viaduto atirantado sobre a VCI. Adaptado de: [64]. 130

Figura 6.2 – Viaduto atirantado sobre a VCI no Porto (Junho de 2002 – © F. Piqueiro / Foto Engenho, Lda). 131

Figura 6.3 – Instalação dos equipamentos de medição: estação de referência (a) e LVDT (b). 132

Figura 6.4 – Antena da estação móvel: fixação no pilar da guarda de protecção (a) e posicionamento relativamente à junta de dilatação (b). 133

Figura 6.5 – Variação do deslocamento e da temperatura medidos pelo LVDT e pelo sensor de temperatura. 133

Figura 6.6 – Comparação entre os deslocamentos LVDT e GNSS (1Hz) no ensaio do viaduto sobre a VCI. 134

Figura 6.7 – Comparação entre os deslocamentos LVDT e GNSS com representação de um ponto médio a cada 5 minutos (a) e respectivos resíduos (b). 135

Figura 6.8 – Vista geral da ponte da Lezíria sobre o rio Tejo. Adaptado de: [59]. 136

Figura 6.9 – Esquema da instrumentação da ponte da Lezíria. Adaptado de: [59]. 137

Figura 6.10 – Transdutor de flechas activo (a), transdutor de referência, circuito hidráulico e respectivo reservatório de água (b) instalado na ponte da Lezíria. Adaptado de: [59]. 138

Figura 6.11 – Evolução da flecha medida a meio vão do segundo tramo durante o período de um mês e correspondente evolução da temperatura (a) e detalhe correspondente a um período de três dias (b). Adaptado de: [59]. 139

Figura A1.1 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS. 151

Figura A1.2 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW. 151

Figura A1.3 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção Vertical. 152

Figura A1.4 – Nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal. 152

Figura A1.5 – Nuvem de pontos da linha de base no plano NS - Vertical. 153

Figura A1.6 – Nuvem de pontos da linha de base no plano EW - Vertical. 153

Figura A1.7 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS. 154

Figura A1.8 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW. 154

Figura A1.9 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical..... 155

Figura A1.10 – Nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal..... 155

Figura A1.11 – Nuvem de pontos da linha de base no plano NS - Vertical (a) e EW - Vertical (b). ... 156

Figura A2.1 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b). 159

Figura A2.2 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 159

Figura A2.3 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b). 160

Figura A2.4 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 160

Figura A2.5 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b). 161

Figura A2.6 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 161

Figura A2.7 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b). 162

Figura A2.8 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 162

Figura A2.9 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b). 163

Figura A2.10 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 163

Figura A2.11 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b)..... 164

Figura A2.12 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 164

Figura A2.13 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b)..... 165

Figura A2.14 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 165

Figura A2.15 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b)..... 166

Figura A2.16 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b). 166

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características das ondas portadoras em L1 e L2. 9

Quadro 2.2 – Coeficiente $K1$ determinado experimentalmente por *Smith/Weintraub e Thayer.* 15

Quadro 2.3 – Valores das constantes definidas nas funções de mapeamento de *Chao.* 16

Quadro 2.4 – Valores típicos do erro ionosférico para vários cenários de observação. Adaptado de: [11]. 18

Quadro 2.5 - Intervalos de flutuação máxima (nT) e respectivo índice Kp [35]. 24

Quadro 2.6 – Correspondência entre os índices Kp e G. 24

Quadro 2.7 – Frequências das portadoras emitidas pelos satélites GALILEO. Adaptado de [42]. 45

Quadro 2.8 – Principais características dos vários sistemas de navegação global por satélite. Adaptado de: [45]. 46

Quadro 3.1 – Desvio-padrão das séries registadas nas direcções NS e EW e vertical. 61

Quadro 4.1 – Grandezas dos desvios registados nas observações em bruto. 81

Quadro 4.2 – Desvio-padrão da amostra de dados, antes e após a mudança da estação 2 para um ambiente fortemente reflexivo. 82

Quadro 4.3 – Amplitude típica dos resíduos das observações para o ensaio realizado em ambiente reflexivo e em ambiente natural. 88

Quadro 4.4 – Comparação do desvio padrão das coordenadas em dias de actividade solar instável e normal. 92

Quadro 5.1 – Planeamento dos ensaios de medição de flechas realizados com sistema de níveis líquidos. 100

Quadro 5.2 – Comparação do desempenho dos transdutores SP2 e SP3. 127

Quadro 5.3 – Comparação do desempenho do transdutor óptico e do transdutor eléctrico. 127

Quadro 6.1 – Determinação experimental do coeficiente de dilatação térmica linear do tabuleiro do viaduto. 134

Quadro 6.2 – Parâmetros físicos medidos e localização das secções instrumentadas na ponte da Lezíria. Traduzido de: [59]. 137

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AS – *Anti-Spoofing*

C/A – *Coarse Acquisition*

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CS – *Commercial Service*

DEC – Departamento de Engenharia Civil

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

ESA – *European Space Agency*

EST1 – Estação 1

EST2 – Estação 2

EU – *European Union*

EUA – Estados Unidos da América

EW – Este-Oeste

FDMA – *Frequency Division Multiple Access*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GCC – *Galileo Control Center*

GDOP – *Geometric Dilution of Precision*

GGTO – *GPS/Galileo Time Offset*

Giove-A – *Galileo in orbit verification element-A*

GLONASS – *GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (russo)

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

GSS – *Galileo Sensor Stations*

GST – *Galileo System Time*

GTRF – *Galileo Terrestrial Reference Frame*

HDOP – *Horizontal Dilution of Precision*

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LAMBDA - *Least square AMBiguity Decorrelation Adjustment*

LHCP – *Left Hand Circularly Polarized*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NAVSTAR – *Navigation System with Time and Ranging*

NIMA – *National Imagery Mapping Agency*

NMEA – *National Marine Electronics Association*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NS – Norte-Sul

OS – *Open Service*

OTF – *On The Fly*

P-Code – *Precise Code*

PDOP – *Positional Dilution of Precision*

PRS – *Public Regulated Service*

RHCP – *Right Hand Circularly Polarized*

RINEX - *Receiver Independent Exchange Format*

SAR – *Search and Rescue Service*

SGS85 – *Soviet Geodetic System, 1985*

SoL – *Safety of Life*

SP*i* – Transdutor Eléctrico do Sensor de Pressão *i*

SU – *Soviet Union*

TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

TDOP – *Time Dilution of Precision*

TOA – *Transdutor Óptico Activo*

TOR – *Transdutor Óptico de Referência*

USNO – *United States National Observatory*

UTC – *Coordinated Universal Time*

VDOP – *Vertical Dilution of Precision*

WGS84 – *World Geodetic System, 1984*

1
INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A monitorização das estruturas de Engenharia Civil desde há longos anos vem sendo um campo chave na aplicação de novas tecnologias. O crescente nível de exigência, em termos de comportamento das estruturas, contribuiu para a necessidade de observação dos padrões de comportamento estrutural. De facto, os actuais códigos europeus de dimensionamento estrutural levam a que, na maior parte dos projectos, sejam os Estados Limites de Serviço (ELS) e não os Estados Limites Últimos (ELU) a condicionar o dimensionamento estrutural. Esta filosofia acaba por colocar a segurança como consequência de um bom desempenho estrutural.

A necessidade da implementação de sistemas de monitorização surgiu do reconhecimento das limitações inerentes às inspecções visuais no que respeita à caracterização da integridade das estruturas, bem como do uso de novas tipologias estruturais e da aplicação de novos processos construtivos. A sua aplicação, em particular no caso das obras de grande complexidade, tem permitido a redução do número de acidentes durante a fase construtiva e mesmo após a sua colocação em serviço [1].

Actualmente, as grandes obras de Engenharia Civil, entre as quais as obras de arte, são monitorizadas ao longo de todas as fases que compõem o seu período de vida útil. Durante a fase de construção, a instalação de sistemas de monitorização permite o processamento dos dados recolhidos pelos sistemas de aquisição, facilitando o acompanhamento da evolução comportamental da estrutura que está a ser analisada. Desta forma, estes dados poderão servir de apoio à tomada de decisões em tempo real ainda no decorrer da fase construtiva, no sentido de alterar ou corrigir algumas opções que, durante o processo construtivo, se revelem inadequadas. Eventualmente, estes dados poderão servir de confirmação às previsões obtidas tendo por base o modelo de cálculo considerado.

Após a fase de construção, são geralmente efectuados ensaios de recepção antes de colocar a estrutura em serviço. Nesta fase, a monitorização de secções representativas da estrutura permite fazer a verificação de segurança e a caracterização estrutural, estática e/ou dinâmica. Caso os resultados provenientes dos ensaios sejam favoráveis poder-se-á colocar a estrutura em funcionamento. Caso contrário, situação rara, será necessário proceder a alterações que permitam o bom funcionamento da estrutura em causa, colocando-a posteriormente em serviço.

Já na fase de exploração, a monitorização estrutural, com base na instrumentação de secções críticas ou com particular interesse na análise, permite a recolha de dados que poderão ser utilizados para três

finalidades principais. A primeira finalidade da análise estrutural está ligada ao acompanhamento do comportamento das estruturas, com particular interesse para o caso de estruturas complexas, permitindo a validação dos modelos e das considerações assumidas na fase de projecto ou eventualmente levando a que, face às realidades medidas e aos eventuais desvios detectados, novas opções sejam tomadas. A monitorização estrutural permite também obter um controlo mais apertado da real capacidade de carga das estruturas. Assim, em casos de carga não habituais, poderá ser emitido um alerta de perigo às entidades responsáveis pela manutenção das estruturas, caso determinado parâmetro ultrapasse um valor predefinido. Nesta vertente, a idealização de estruturas inteligentes pressupõe a aplicação de sistemas automáticos de monitorização capazes de controlar a resposta estrutural.

A compreensão do comportamento estrutural é uma das principais preocupações no domínio da avaliação da integridade de qualquer estrutura, e em particular no caso das obras de arte. Neste campo, a monitorização estrutural surge como um meio, cada vez mais eficiente e económico, capaz de dar resposta às crescentes exigências, quer no que respeita à avaliação estrutural de forma a garantir a utilização das estruturas em condições de segurança, quer no apoio à tomada de decisões por parte das organizações e/ou entidades interessadas na manutenção das respectivas infra-estruturas.

Portugal é um país com um vasto património de obras de arte. Muitas destas estruturas apresentam um pronunciado nível de degradação, pelo que é fundamental desenvolver acções de recuperação e conservação para garantir um nível de segurança compatível com a utilização em causa.

A rede nacional de estradas e caminhos-de-ferro inclui no seu traçado mais de 3500 obras de arte na rede viária e mais de 1000 obras de arte na rede ferroviária. Contudo, em Portugal, a monitorização ganhou tradição na observação de barragens. A aplicação desta tecnologia visava essencialmente o comportamento das estruturas e, eventualmente, a utilização dessa informação numa avaliação preliminar sobre o seu comportamento evolutivo.

Actualmente, existem instituições de referência a nível nacional e internacional com áreas de investigação no domínio da monitorização de estruturas. A nível nacional destacam-se o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), cuja representação tem sido dominada pelo papel do Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST). O LNEC, pelos trabalhos pioneiros na área da experimentação e observação estrutural de barragens e obras de arte, tem representado um papel de importância notória a nível nacional. O LABEST/FEUP é responsável pela monitorização de várias pontes e viadutos como por exemplo a ponte D. Luís I sobre o rio Douro, o viaduto atirantado sobre a VCI no Porto, viaduto metálico sobre a VCI junto ao nó da Boavista, a ponte pedonal Pedro e Inês em Coimbra sobre o rio Mondego, a nova ponte Hintze Ribeiro sobre o rio Douro, vários viadutos do Metro do Porto e muitas outras obras de carácter igualmente importante [1].

No caso particular da aplicação dos sistemas GNSS às obras de Engenharia Civil, recentemente o grupo Mota-Engil SGPS iniciou a fase de testes, recorrendo a equipamentos com base na tecnologia GNSS, no que respeita à monitorização da Ponte Vasco da Gama, sobre o rio Tejo em Lisboa. A nível nacional, esta aplicação revela-se um projecto único pela sua dimensão e inovação [2]. Internacionalmente, têm vindo a ser desenvolvidas aplicações práticas com o uso de equipamentos GNSS, nomeadamente no campo da dinâmica das estruturas [3], [4], [5].

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

O alcance da etapa final da conclusão do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, possibilitou a realização e entrega da presente dissertação à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como elemento para a satisfação parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Estruturas.

As bases de motivação do autor, na realização do presente trabalho, prendem-se com a possibilidade de enriquecimento ao nível da formação pessoal e científica, resultante do estudo mais aprofundado de uma área que compreende assuntos muito pouco abordados ao longo de todo o curso. A realização de ensaios, aliada a um contacto mais próximo com os procedimentos laboratoriais, permitiu uma maior aproximação ao campo da investigação científica. A contribuição para o desenvolvimento de estudos ligados à aplicação de Sistemas de Navegação Global por Satélite na área da monitorização estrutural, juntamente com o objectivo de disponibilizar à comunidade científica mais um documento de carácter pedagógico, fazem também parte da motivação para a realização desta dissertação. Por último, mas não menos importante, surge a vontade e o interesse pessoal do autor pelo assunto tratado. A sua origem surge da oportunidade de apoiar a FEUP, através do LABEST, na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias que permitam o crescimento de uma área de carácter emergente – a Civiónica.

Civiónica é a designação atribuída a uma área da Engenharia que emerge da aplicação da electrónica às estruturas de Engenharia Civil, com o objectivo de possibilitar a monitorização, o diagnóstico e a reabilitação estrutural mediante a aplicação e o uso combinado de redes de equipamentos electrónicos nas estruturas. A monitorização estrutural, incluída no seio da Civiónica, surge como um campo da Engenharia Civil que permite o conhecimento efectivo do desempenho das estruturas, quer na fase de construção quer em serviço, possibilitando a observação em contínuo do seu comportamento e do seu estado ao longo do respectivo tempo de vida útil. Desta forma, o crescimento da instrumentação das estruturas surge também como uma técnica de prevenção de dano, dando resposta, em conjunto com uma boa interpretação dos resultados obtidos, a uma necessidade fundamental na sociedade contemporânea, que se define cada vez mais exigente em termos de qualidade e de segurança.

O crescimento actual do número de estruturas de grande complexidade e importância social causa, naturalmente, o crescimento da necessidade de aplicação de sistemas de monitorização permanente na gestão e manutenção a longo prazo da condição comportamental das estruturas [6].

A realização da presente dissertação tem por objectivos a compreensão dos princípios de funcionamento dos Sistemas de Navegação Global por Satélite e o estudo das potencialidades no que respeita à sua utilização na monitorização. O interesse deste estudo justifica-se com a potencial aplicação do sistema no campo da monitorização estrutural, nomeadamente no caso particular das obras de arte. A realização de ensaios de índole laboratorial e a aplicação prática a casos reais de monitorização de deslocamentos surgem como um meio para a obtenção dos objectivos da dissertação.

O estudo do comportamento de um sistema de medição de flechas desenvolvido pelo LABEST, que se baseia no método dos níveis líquidos será também estudado, com o objectivo de caracterizar a resposta do sistema quando solicitado pela medição de deslocamentos em regime cinemático.

A motivação descrita e os objectivos apontados constituem os princípios de justificação da dissertação apresentada.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução, proporcionando ao leitor um enquadramento do tema na actualidade, apresentando-se ainda a motivação e os objectivos da sua realização.

No segundo capítulo, são apresentados conceitos teóricos gerais e os princípios fundamentais de funcionamento dos Sistemas de Navegação Global por Satélite, abordando-se assuntos com especial interesse para que o leitor possa compreender melhor os aspectos essenciais do tema abordado, assimilando quais os factores que mais influenciam o correcto funcionamento do sistema de posicionamento estudado.

Os ensaios de carácter estático e cinemático surgem no terceiro capítulo da dissertação. A sua apresentação tem por objectivo fazer a caracterização do comportamento do Sistema de Navegação Global por Satélite e avaliar a precisão dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

No quarto capítulo é feita a análise do comportamento dos equipamentos GNSS quando submetidos à acção de fontes de interferência. São apresentados os resultados procedentes da realização de dois tipos de ensaios, nomeadamente em ambiente reflexivo e durante a ocorrência de um pico de instabilidade geomagnética.

O estudo do comportamento cinemático de um sistema de medição de flechas, com base no método dos níveis líquidos, é também abordado no quinto capítulo da presente dissertação. Neste capítulo são apresentados os resultados decorrentes da medição de ciclos de deslocamento, caracterizados por sinusóides com diferentes períodos. São ainda comparados os resultados de medição dos diferentes tipos de transdutores utilizados nos ensaios realizados.

O sexto capítulo desta dissertação é dedicado à aplicação do Sistema de Navegação Global por Satélite na medição de deslocamentos de uma obra de arte, sobre a Via de Cintura Interna no Porto, e à demonstração da aplicação do sistema de medição de flechas, com base no método de níveis líquidos, a um caso de monitorização real da ponte da Lezíria sobre o rio Tejo, no Carregado.

No sétimo capítulo são apresentadas as considerações finais e as perspectivas de desenvolvimentos futuros que, no entender do autor, são importantes para uma investigação mais aprofundada do tema analisado. A sua realização futura tem por objectivo alargar o conhecimento de forma a desenvolver técnicas capazes de responder aos problemas que, actualmente, se colocam à aplicação dos Sistemas de Navegação Global por Satélite à monitorização das estruturas da Engenharia Civil.

2

O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é a designação genérica de um qualquer sistema de base espacial constituído por satélites, receptores e estações de controlo, capaz de fornecer um serviço global (isto é, estando disponível em qualquer ponto da superfície terrestre) de posicionamento e navegação (posição instantânea, velocidade e hora). Existem actualmente dois GNSS a operar, nomeadamente o sistema GPS (Norte-americano) e o GLONASS (Russo), encontrando-se ainda outros dois sistemas em desenvolvimento, o Galileo (Europeu) e o Compass (Chinês) [7].

Os antecessores dos sistemas de navegação por satélite foram os sistemas de base terrestre LORAN e OMEGA. No sistema OMEGA o posicionamento era calculado a partir das diferenças de fase, detectadas pelo receptor, entre os sinais recebidos de dois ou mais emissores. Este sistema utiliza ondas rádio de baixa frequência e o erro de posição associado é da ordem dos 6 km.

Também o sistema LORAN utilizava as ondas emitidas por dois ou mais emissores, mas em vez de determinar as diferenças de fase entre essas ondas, determina as diferenças entre os tempos de chegada de cada uma delas. As ondas utilizadas são também de baixa frequência e o respectivo erro de posicionamento é de cerca de 450 metros. Este sistema equipa o navio Gil Eanes (Figura 2.1).

O eLORAN (*enhanced LORAN*) é uma versão substancialmente melhorada do sistema LORAN, capaz de atingir precisões entre os 3 e os 20 metros. Este sistema modernizado, apresenta um custo de implementação reduzido e um conjunto de características[1] técnicas que o recomendam para sistema de reserva do sistema GPS [8].

[1] Os sistemas LORAN são sistemas de base terrestre, que utilizam portadoras de baixa frequência e alto nível energia. Estas características são exactamente opostas às apresentadas pelo sistema GPS e permitem que o LORAN cubra muitas regiões nas quais os sinais GPS se encontram obstruídos.



Figura 2.1 – Receptor LORAN do navio Gil Eanes.
Fonte: Fotografia de Nuno Cristelo.

O primeiro sistema de navegação por satélite foi o TRANSIT, um sistema desenvolvido pelo exército dos Estados Unidos da América, em 1960, e baseava-se no efeito Doppler. Os satélites, viajando em trajectórias conhecidas, difundiam os respectivos sinais numa frequência também conhecida. A frequência captada nos receptores, devido ao movimento do satélite em relação ao receptor, era ligeiramente diferente da frequência difundida. Através da monitorização, em intervalos curtos, desta mudança de frequência, o receptor era capaz de determinar sua localização. Este sistema utilizava um conjunto de seis satélites colocados em órbitas polares, a cerca de 360 km de altitude, garantindo precisão na ordem de 0.5 km. Contudo, o tempo necessário para o cálculo das coordenadas de um ponto era muito longo – mais de 15 minutos – sendo apenas possível realizar um cálculo em cada hora. Estes aspectos, que se tornaram em limitações, levaram a que o sistema TRANSIT se tenha tornado obsoleto quando comparado com o sistema GPS, tendo sido desactivado em 1996.

Neste capítulo, dão-se a conhecer as bases do sistema de navegação por satélite mais conhecido, o sistema GPS, sendo os seus princípios de funcionamento similares a todos os restantes GNSS.

2.2. A ARQUITECTURA DO SISTEMA GPS

O Sistema de Posicionamento Global por Satélite NAVSTAR – GPS (Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System) foi estudado e desenvolvido desde finais da década de 50 e oficialmente apresentado em Abril de 1973 pelo Ministério da Defesa (Department of Defense) dos Estados Unidos da América (EUA), para uso exclusivamente militar. A sua criação surgiu como resposta às necessidades militares de posicionamento estratégico sendo o sistema capaz de informar os seus utilizadores relativamente ao respectivo posicionamento tridimensional, velocidades de navegação e fornecendo também dados precisos de tempo, em qualquer lugar, a qualquer hora e sob quaisquer condições meteorológicas [9].

Em Julho de 1995 o sistema foi declarado operacionalmente completo, possuindo um total de 27 satélites (24 operacionais e 3 de reserva) distribuídos em 6 planos orbitais em torno da Terra. Estes planos definem um ângulo de 55º em relação ao plano equatorial e têm uma altitude média de 20200 km. A velocidade orbital de cada satélite é de aproximadamente 3,9 km/s resultando num período

orbital de 12 horas siderais (11h58). Desta forma é possível garantir que, pelo menos, quatro satélites são simultaneamente visíveis acima do horizonte em qualquer ponto da superfície terrestre [10].

O sistema é subdividido por três segmentos a designar: segmento espacial, segmento de controlo e segmento do utilizador. O segmento espacial é composto pelo conjunto dos satélites GPS, responsáveis por emitir o sinal GPS em duas frequências (L1 e L2) transmitindo também mensagens de navegação, almanaques[2] e dados relativos ao estado de conservação dos satélites. Na Figura 2.2 é esquematizado o segmento espacial do sistema.

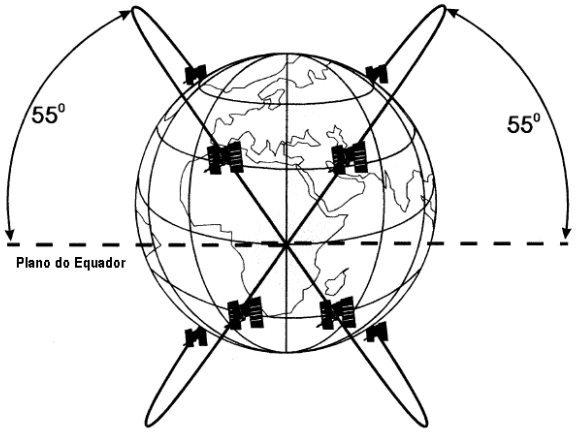


Figura 2.2 – Representação esquemática de duas das seis órbitas que compõem o segmento espacial do sistema GPS. Adaptado de: [11].

O segmento de controlo é o responsável pela operacionalidade e monitorização do sistema possuindo estações de controlo distribuídas por todo o mundo. Estas estações recebem os sinais GPS enviados pelos satélites e avaliam a necessidade de proceder ao cálculo de correcções que poderão ser posteriormente enviadas aos mesmos. Este segmento era inicialmente composto por cinco bases pertencentes à Força Aérea Norte Americana, situadas em Colorado Springs, Hawaii, Ascension, Diego Garcia e Kwajalein. A base de Colorado Springs detém a estação coordenadora (Master Control Station) e as últimas três, distribuídas de forma semelhante sobre o equador, possuem antenas terrestres sendo capazes de enviar informações aos satélites. Actualmente, com o desenvolvimento do sistema, o segmento de controlo dispõe de 17 estações de monitorização, 11 pertencentes ao NIMA (*National Imagery Mapping Agency*) e as restantes operadas pela Força Aérea norte-americana [12]. Na Figura 2.3 ilustram-se as estações de monitorização pertencentes ao segmento de controlo do sistema GPS.

[2] O almanaque é o conjunto de dados que permite estimar a posição ocupada por todos os satélites GPS num determinado instante.



Figura 2.3 – Estações de monitorização GPS da força Aérea Norte Americana e do NIMA.
Adaptado de: [13].

O segmento do utilizador detém todos os tipos de receptores GPS e respectivos componentes utilizados nas mais diversas áreas e para os mais variados fins, sendo geralmente divididos em receptores geodésicos e receptores de navegação.



(a) (b)

Figura 2.4 – Receptor de navegação (a) e receptor geodésico *Leica GMX 902 GG* (b).
Adaptado de: [14].

2.3. OS DADOS TRANSMITIDOS PELOS SATÉLITES

Os satélites GPS emitem os seus sinais em duas ondas electromagnéticas portadoras, L1 e L2. A frequência de cada uma das ondas resulta da derivação de uma frequência de oscilação fundamental,

f_0=10,23MHz, em que $f_{L1} = 154 \times f_0$ e $f_{L2} = 120 \times f_0$. Estas frequências situam-se no espectro de radiação ocupado pelas microondas, como ilustrado na Figura 2.5.

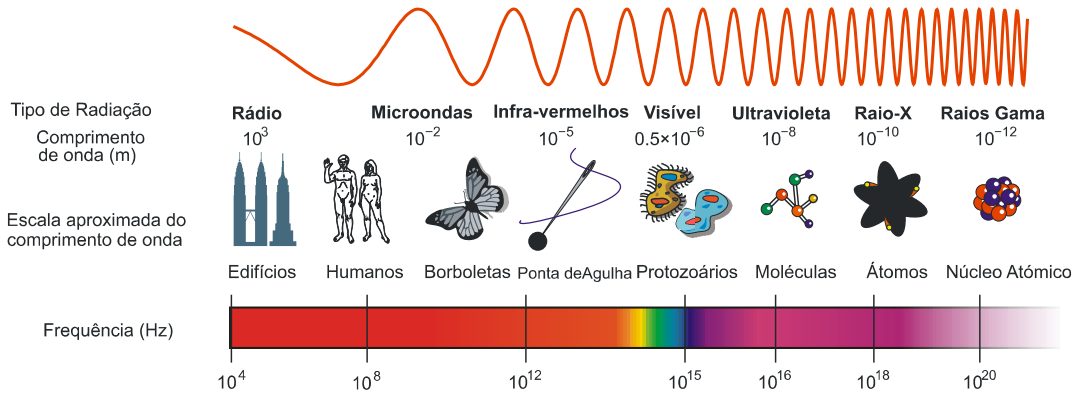


Figura 2.5 – Espectro de radiação.
Adaptado de: [15].

Actualmente, são transmitidos dois códigos nos sinais GPS transmitidos pelas portadoras L1 e L2. O código de uso civil, código C/A (*Coarse Acquisition*), é formado por uma sequência de sinais binários característica de cada satélite. Cada sequência é composta por 1023 bits e repete-se a cada milissegundo. O mesmo é dizer que o código C/A é transmitido com uma frequência de $1{,}023 \times 10^6$ bit/s, ou seja, 1,023 MHz. O código C/A, transmitido na portadora L1, é de acesso livre. Já o P-Code (*Precise Code*), código de uso militar, é transmitido em ambas as frequências, L1 e L2. O código P é constituído por uma sequência de bits transmitidos a uma cadência dez vezes superior à do código C/A, ou seja, a uma cadência de 10,23MHz. Tanto o código C/A como o código P, são utilizados para determinar a posição que um determinado receptor[3] ocupa no espaço, recorrendo para tal à técnica de análise de código, adiante referenciada. No Quadro 2.1 faz-se a caracterização das ondas portadoras e na Figura 2.6 esquematizam-se os códigos transmitidos em cada uma delas.

Quadro 2.1 – Características das ondas portadoras em L1 e L2.

Portadora	f_0 [MHz]	f [MHz]	λ [m]	Código Modelador
L1	10,23	1575,42	0,190	C/A e P
L2		1227,60	0,244	P

[3] Na realidade não é a distância entre receptor e satélites que é determinada mas sim a distância entre os satélites e o centro de fase da antena que está ligada ao receptor. O centro de fase da antena não coincide com o respectivo centro geométrico, devendo esta característica ser tomada em consideração quando se pretende um posicionamento de alta precisão.

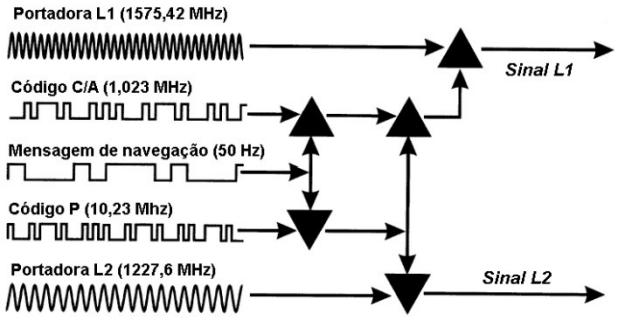
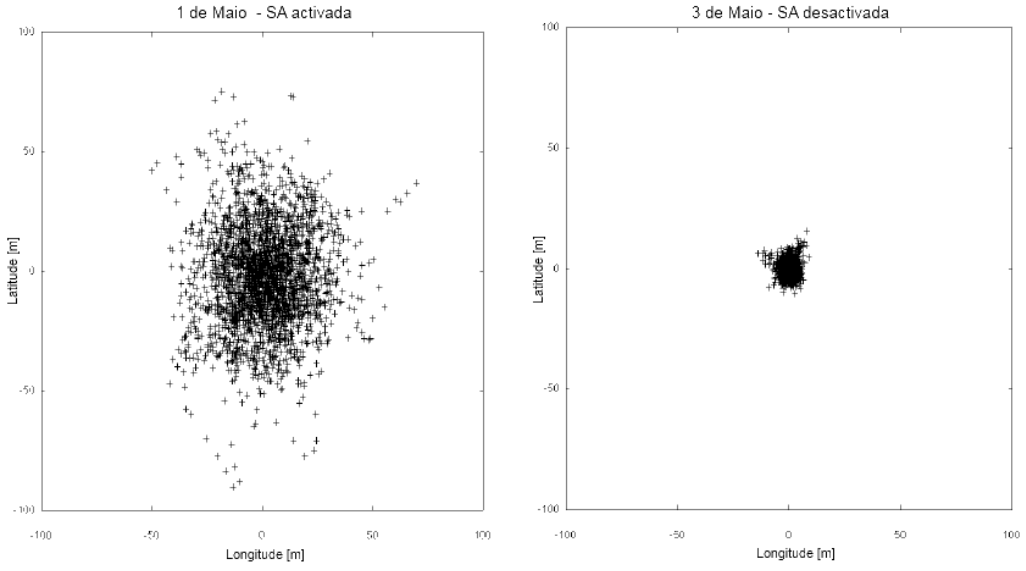


Figura 2.6 – Códigos modulados nas portadoras L1 e L2. Adaptado de: [11].

Como forma de proteger os interesses do Ministério da Defesa dos EUA, foram criados mecanismos capazes de alterar a precisão das soluções de posicionamento obtidas, ou até mesmo de negar o acesso ao sistema, de forma voluntária, a todos os utilizadores não autorizados. Desta forma, foi inicialmente implementada a funcionalidade de disponibilidade selectiva, SA (*Selective Availability*), em que, eram introduzidos no sistema erros de natureza aleatória de forma deliberada. Esta técnica, que perturbava apenas os receptores GPS de "uso civil", provocava um erro máximo que, em 95% dos casos, rondava os 100m na determinação das coordenadas do plano horizontal e os 156m na vertical [9]. Esta função foi implementada para prevenir a utilização do sistema GPS, para vantagem própria, por parte de tropas inimigas. Desta forma, os receptores autorizados continuavam a receber o sinal GPS isento de qualquer degradação intencional. No dia 1 de Maio de 2000, esta funcionalidade foi permanentemente desactivada, obtendo-se desde então uma maior precisão no posicionamento baseado no uso de receptores civis. Na Figura 2.7 mostra-se a diminuição da dispersão das coordenadas horizontais com a desactivação desta funcionalidade. Os testes foram efectuados no Kentucky (EUA), durante os dias 1 e 3 de Maio de 2000.



(a) (b)

Figura 2.7 – Variação da dispersão das observações efectuadas: (a) Selective Availability activada; (b) Selective Availability desactivada. Adaptado de: [11].

De acordo com a Figura 2.7, a circunferência que reúne 95% das posições calculadas reduziu o seu raio de 45m para 6,3m.

Para impedir o acesso de utilizadores não autorizados ao código P, o sistema GPS utiliza a técnica de *Anti-Spoofing* (AS). Desta forma, o sinal dos satélites é alterado através de uma "mistura" do código P com um código secreto, o código W, que funciona como ruído, resultando daqui o denominado código Y. Este código é então transmitido pelos satélites, em substituição do código P. Apenas os receptores autorizados, com acesso a uma chave apropriada de domínio e distribuição exclusivamente militar (Departamento de Defesa do EUA), são capazes de proceder à desencriptação deste código. Esta técnica foi implementada no dia 31 de Janeiro de 1994 com o objectivo de impedir que alguém possa utilizar o código P com intenção malévola [16].

2.4. FACTORES QUE INFLUENCIAM A PRECISÃO DE POSICIONAMENTO

A precisão com que são calculadas as coordenadas da posição ocupada por um determinado receptor GPS é afectada por factores que normalmente se agrupam da seguinte forma:

- Posição que os satélites utilizados nos cálculos ocupam relativamente ao receptor (arranjo espacial dos satélites relativamente ao receptor);
- Erros cometidos na determinação das posições dos satélites e nas medições das distâncias a eles medidas.

2.4.1. Posicionamento relativo do conjunto Satélites/Receptor

Demonstra-se que a precisão de posicionamento não depende apenas da precisão com que foram determinadas as distâncias receptor/satélites. Imagine-se ser possível obter vários posicionamentos em instantes distintos mantendo, para todos eles, constantes os efeitos das várias causas de erro bem como a posição do receptor, utilizando para todos eles sempre os mesmos satélites. Nesta situação verificar-se-ia a obtenção de diferentes níveis de precisão para os vários pontos determinados. Este fenómeno deve-se ao facto da qualidade do posicionamento ser fortemente afectada pela posição que os satélites utilizados nas observações ocupam relativamente ao receptor.

A posição relativa do receptor GPS e dos satélites utilizados num posicionamento é caracterizável, em termos do seu efeito na qualidade das coordenadas calculadas, por um conjunto de parâmetros genericamente designados por parâmetros DOP (*Dilution Of Precision*). Estes parâmetros são divididos em cinco tipos, de acordo com a(s) incógnita(s) a cuja determinação estão associados, nomeadamente [17]:

- HDOP – Parâmetro associado ao posicionamento no plano horizontal;
- VDOP – Parâmetro associado ao posicionamento vertical (determinação da altimetria);
- PDOP – Parâmetro associado ao posicionamento tridimensional;
- TDOP – Parâmetro associado à determinação da hora GPS;
- GDOP – Parâmetro associado à determinação de todas as incógnitas (associação dos parâmetros PDOP e TDOP).

O nível de precisão associado à obtenção de determinada incógnita, num qualquer receptor GPS, é tanto menor quanto maior for o valor do parâmetro DOP associado. Geometricamente, demonstra-se que o valor do parâmetro GDOP é inversamente proporcional ao volume do tetraedro formado pelos 4 vectores unitários definidos pelo conjunto receptor satélites observados. Assim, quanto maior for este

volume menor será o valor do parâmetro GDOP e consequentemente obter-se-á uma melhor precisão na solução de posicionamento conseguida. Na Figura 2.8 esquematiza-se esta constatação, simulando dois cenários de posicionamento relativo satélites/receptor distintos. No primeiro caso, o conjunto definido pelo receptor k e pelos satélites $S1$, $S2$, $S3$ e $S4$ (a cinzento na Figura) forma um tetraedro de maior volume do que no segundo caso, em que o novo conjunto é dado pelo receptor k e pelos satélites $S5$, $S6$, $S7$ e $S8$. Por esta razão, o primeiro arranjo da distribuição espacial dos satélites relativamente ao receptor proporcionará menores valor de GDOP do que o segundo, sendo consequentemente mais precisa a respectiva obtenção de coordenadas quando comparada com o outro arranjo.

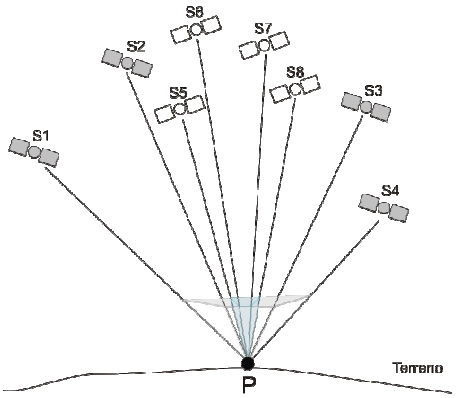


Figura 2.8 – Volume de dois tetraedros definidos para dois arranjos distintos da posição relativa receptor/satélites. Adaptado de: [18].

Actualmente, dada a existência de um grande número de satélites, muito devido à colocação em órbita dos satélites da constelação russa GLONASS, os *softwares* desenvolvidos pelos fabricantes e utilizado no processamento das observações contempla a escolha dos satélites que permitem a obtenção de um menor valor do parâmetro DOP com interesse para a observação que se pretende efectuar. Contudo, conhecendo o almanaque dos satélites, é possível fazer um planeamento de trabalhos, com especial interesse para as aplicações com grande exigência no que respeita ao nível de precisão associado. Desta forma, torna-se possível minimizar a perda de precisão devida ao posicionamento relativo entre satélites observados e receptor. A única desvantagem deste processo será a minimização do período temporal em que é adequado efectuar as observações.

2.4.2. Fontes de erro no posicionamento por satélite

As fontes de erro que afectam a precisão do posicionamento por satélite são divididas em quatro grupos, nomeadamente [19]:

- Erros associados aos satélites;
- Erros associados ao meio de propagação das ondas electromagnéticas;
- Erros associados ao conjunto antena/receptor;
- Estação/Efeitos Geofísicos.

2.4.2.1. Erros associados aos satélites

No grupo dos erros associados aos satélites, estes podem ser subdivididos em erros voluntários e erros involuntários, em função da sua origem ser ou não intencional. Os erros associados aos satélites compreendem a precisão dos relógios que equipam os satélites, bem como os erros relativos às efemérides[4] ou por exemplo os erros que existiam no modo de disponibilidade selectiva (*Selective Availability*) que, enquanto esteve operacional, pertencia ao subconjunto dos erros voluntariamente inseridos no sistema. Normalmente, os erros involuntários devem-se, na generalidade, a causas naturais ou, caso resultem de acção humana, não decorrem da incorrecta utilização dos equipamentos nem da aplicação errada de conceitos ou de técnicas de observação.

Um outro erro, conhecido como *Interfrequency Biases* (IfB) e *Differential Code Biases* (DCB) é o designado erro de *hardware* dos satélites. Este atraso deve-se ao facto dos sinais GPS L1 e L2 percorrerem caminhos distintos no *hardware* do satélite. O valor desse atraso é determinado durante a fase de testes dos satélites, e é posteriormente divulgado nas mensagens de navegação. Naturalmente este erro será diferente para cada satélite. Na mensagem de navegação, este valor é identificado como T_{GD} (*group delay*). Os valores do T_{GD} variam ao longo do tempo devendo ser estimados com dados adquiridos por receptores instalados em estações terrestres, nomeadamente pelo segmento de controlo. Torna-se necessário aplicar o T_{GD} em procedimentos que requeiram a correcção do erro do relógio do satélite. Quando é necessário corrigir o efeito do T_{GD} na portadora L2, este deve ser multiplicado por 1,64694, uma vez que os valores do T_{GD} são estimados em relação à portadora L1 [20].

2.4.2.2. Erros associados ao meio de propagação das ondas electromagnéticas

Os 50 km mais próximos da superfície terrestre contêm cerca de 99.9% da massa total da atmosfera e são habitualmente subdivididos em três zonas, nomeadamente a troposfera, a tropopausa e a estratosfera.

A troposfera é a camada atmosférica mais próxima do planeta Terra e atinge aproximadamente 12km de altitude média. A altitude da camada não é constante, diminuindo do equador onde atinge cerca de 17 km de espessura média para os pólos abrangendo nestas zonas cerca de 7 km de espessura média, como mostra a Figura 2.9.

[4] O conjunto de parâmetros orbitais e as correcções à hora do satélite constituem a efeméride do satélite.

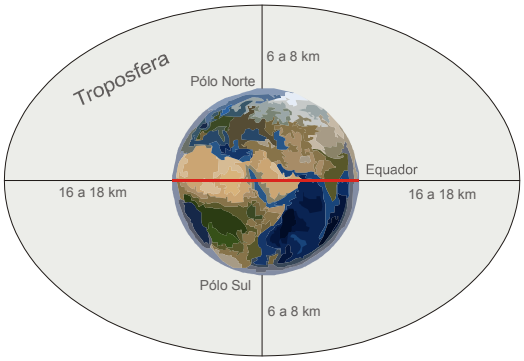


Figura 2.9 – Variação da espessura da camada Troposférica com a latitude.
Adaptado de: [21].

A camada troposférica é um meio não ionizado dada a presença de gases de vapor de água e na sua composição contendo cerca de 75% da massa total atmosférica e 99% do seu vapor de água. Nesta zona atmosférica a temperatura decresce com a altitude. A tropopausa é uma fina camada atmosférica que separa a troposfera da estratosfera. Esta camada é caracterizada por ser a região onde se dá a mudança de sinal do gradiente da temperatura com a altitude. A estratosfera desenvolve-se sobre a tropopausa e nela a temperatura cresce com a altitude. Esta camada não contém praticamente qualquer vapor de água. Estas informações podem ser observadas na Figura 2.10.

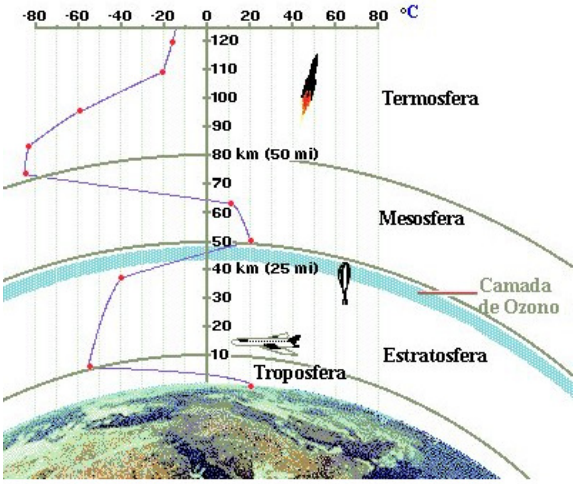


Figura 2.10 – Variação da temperatura nas camadas atmosféricas com a altitude. Adaptado de: [22].

Cerca de 80% do erro provocado pelo atravessamento da região não-ionizada da atmosfera é devido ao atravessamento da troposfera. Por esta razão este erro é geralmente denominado por atraso troposférico. Este erro provoca sempre um atraso nas ondas emitidas pelos satélites, quer na fase quer no código, pelo que as distâncias receptor/satélite observadas são sempre maiores do que as distâncias reais.

Existem vários modelos matemáticos que tentam simular este atraso, sendo a sua aplicação mais ou menos complexa em função os parâmetros de entrada de cada um deles. Um modelo simples, que resolve minimamente a influência deste efeito é o modelo apresentado por Mendes e Langley [23] definido por:

$$d_{trop} = d_h^Z m_h(\varepsilon) + d_w^Z m_w(\varepsilon) \tag{2.1}$$

sendo d_h^Z a componente hidrostática, designada assim por ser determinada admitindo a lei dos gases perfeitos a um gás em equilíbrio hidrostático e d_w^Z a componente húmida que é função da pressão parcial do vapor de água na direcção do zénite, dadas, respectivamente, pelos modelos de *Saastamoinen* (2.2) e *Baby* (2.4)

$$d_h^Z = 10^{-6} K_1 R_d \frac{P_s}{g_m} \tag{2.2}$$

sendo:

K_1 - constante determinada empiricamente. O seu valor foi determinado por *Smith* e *Weintraub,* em 1953, e por *Thayer,* em 1974, e podem ser consultados no Quadro 2.2;

R_d - constante específica dos gases ideais para o ar seco ($R_d = 287.05$ J kg^{-1}K^{-1});

P_s - pressão atmosférica [mbar];

g_m - magnitude da aceleração gravítica no centróide da coluna atmosférica, dada por:

$$g_m = 9{,}784(1 - 0{,}0026\cos 2\varphi - 0{,}00028H) \tag{2.3}$$

onde:

φ - latitude geocêntrica da estação;

H - altitude ortométrica da estação [km].

Quadro 2.2 – Coeficiente K_1 determinado experimentalmente por *Smith/Weintraub* e *Thayer*.

K_1	
Smith e *Weintraub* (1953)	*Thayer* (1974)
$77.61 \pm 0{,}01$	$77.60 \pm 0{,}014$

$$d_w^Z = 10^{-3} U \upsilon 10^{\gamma(T-273{,}15)} \tag{2.4}$$

A equação (2.4) resulta de um modelo semi-empírico que, segundo o seu autor, gera resultados comparáveis com modelos teóricos mais robustos, sendo a sua aplicação, contudo, mais prática e eficaz. O coeficiente U refere-se à humidade relativa, em percentagem, e os coeficientes υ e γ são coeficientes empíricos que modelam as variações climáticas sazonais da estação. A grandeza T é o valor da temperatura superficial, em Kelvin.

As parcelas $m_h(\varepsilon)$ e $m_w(\varepsilon)$ são as chamadas funções de mapeamento. Estas funções pretendem modelar a influência que o ângulo de elevação, ε, tem no atraso troposférico. Existe um variado conjunto de funções de mapeamento definidas por vários autores sendo aqui apresentadas as funções de mapeamento de *Chao* pela sua simplicidade [23]:

$$m_h(\varepsilon) = \left(\sin\varepsilon + \frac{A_1}{\tan\varepsilon + B_1}\right)^{-1} \quad \text{e} \quad m_w(\varepsilon) = \left(\sin\varepsilon + \frac{A_2}{\tan\varepsilon + B_2}\right)^{-1} \tag{2.5}$$

em que os valores das constantes A_1, A_2, B_1 e B_2 apresentam-se no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Valores das constantes definidas nas funções de mapeamento de *Chao*.

A_1	A_2	B_1	B_2
0,00143	0,00035	0,04450	0,01700

Ao contrário da componente hidrostática, que é bem modelada recorrendo apenas a dados atmosféricos obtidos na envolvente do receptor, a componente húmida não apresenta boa correlação com os dados atmosféricos superficiais, sendo portanto mais difícil de modelar. Desta forma, apesar da componente húmida ser responsável por apenas cerca de 10% do erro troposférico total, é esta a parcela à qual se atribui a maior parte da incerteza de modelação.

Para além do modelo de Saastamoinen, que resulta da aceitação de um conjunto de pressupostos relativos às camadas inferiores da atmosfera, existe também o modelo de Hopfield que se apoia, fundamentalmente, num grande volume de dados meteorológicos obtidos por numerosos balões-sonda lançados em várias localizações geográficas ao longo dos anos. Para além destes dois modelos, que são talvez os mais conhecidos no meio científico, existem outros que se encontram apresentados na bibliografia da especialidade.

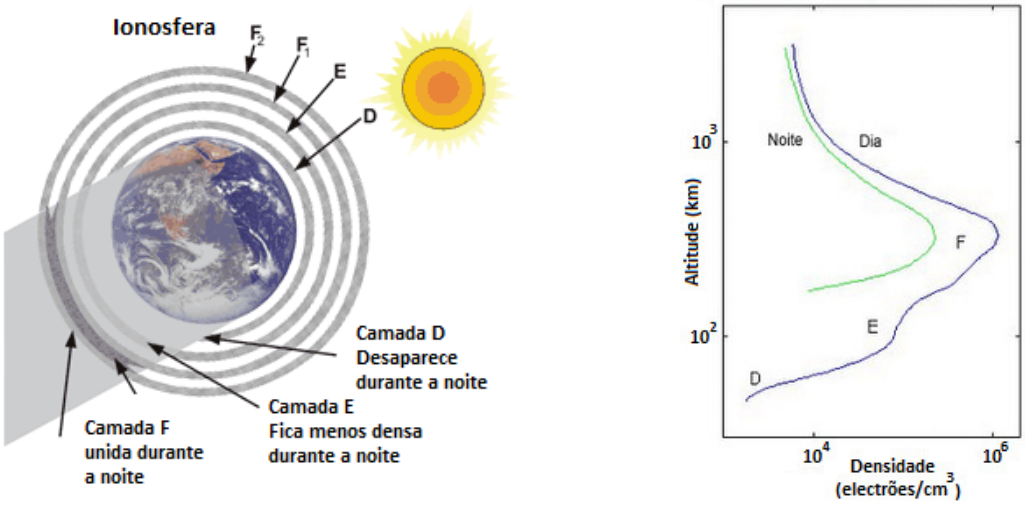
Um outro erro associado ao meio de propagação das ondas electromagnéticas emitidas pelos satélites é o chamado erro ionosférico. A ionosfera é uma camada caracterizada por conter partículas e moléculas electricamente carregadas devido à incidência da radiação solar. Na ionosfera a densidade de electrões livres varia de acordo com a composição química da alta atmosfera, hora do dia e estação do ano. Assim, esta camada é subdividida em quatro sub-camadas de acordo com as respectivas características eléctricas, nomeadamente a densidade de iões livres de cada uma delas. Nas várias camadas existem partículas com carga positiva e partículas com carga negativa que se atraem por forças eléctricas mas, devido à elevada carga eléctrica que cada uma delas tem em si concentrada, estas partículas são incapazes de se manterem ligadas de forma estável.

A composição iónica da ionosfera é variável ao longo do dia, dada a existência (dia) ou inexistência (noite) de radiação solar. Os iões formados e os electrões por eles libertados têm origem na desintegração dos átomos dos gases que compõem a alta atmosfera, por acção da incidência da radiação solar. Como o movimento de rotação da Terra faz com que existam alternadamente regiões ensolaradas e regiões de sombra, a actividade iónica desta camada não é constante fazendo com que as sub-camadas que a compõem sejam instáveis ao longo do dia. Também por esta razão não é possível definir com rigor a espessura da camada, sendo, contudo, grosseiramente admitido que os seus limites vão desde os 50km até aos 2000km. De acordo com o exposto, durante a noite, a sub-camada D desaparece pelo facto das partículas perderem a energia que possuíam enquanto irradiadas pelo Sol. Pela mesma razão sub-camada E fica menos densa durante a noite enquanto as sub-camadas F_1 e F_2 ficam instáveis e juntam-se criando uma única camada, a camada F.

O facto da ionosfera ser uma camada ionizada, provoca o encurvamento da trajectória das ondas electromagnéticas e a diminuição da sua velocidade de propagação. Ao contrário do encurvamento da trajectória das ondas, que pode ser desprezada especialmente para os satélites com ângulo de elevação superior a 5^o, o efeito da diminuição da velocidade de propagação da onda deve ser considerado.

A propagação de ondas electromagnéticas na camada ionosférica comporta-se analogamente à propagação de ondas sonoras em fluidos de diferentes densidades. A existência de vária sub-camadas com características eléctricas distintas provoca o chamado efeito de refracção ionosférico. Este efeito é tanto maior quanto maior for a densidade de electrões livres existente na camada, parâmetro designado por TEC (*Total Electron Content*). O TEC varia de acordo com a época do ano, sendo maior no Verão do que no Inverno, com a hora do dia, sendo maior durante o dia do que durante a noite, com a latitude sendo mínimo nas latitudes intermédias e bastante instável nas regiões polares e equatorial. Além disso, o TEC varia de acordo com os picos de actividade solar sendo máximo quando ocorrem as chamadas Tempestades Solares, que ocorrem em ciclos de mais ou menos 11 anos, e com a elevação do satélite observado [24].

A alteração das camadas com a incidência de radiação solar e a variação da densidade de electrões com a altura da camada, durante o dia e a noite, são apresentadas na Figura 2.11.



(a) (b)

Figura 2.11 – Alteração das sub-camadas da Ionosfera com a incidência da radiação solar (a) e variação da densidade de electrões com a altitude (b).

Adaptado de: (a) – [25] e (b) – [26].

O atravessamento da camada ionosférica acelera a fase das portadoras e provoca um atraso na propagação do código. Como resultado, estes efeitos provocam medições erradas das distâncias que separam um determinado receptor dos satélites observados, sendo a distância calculada inferior à real quando se procede à sua avaliação pela análise da diferença de fase da portadora e superior à real quando o processo de cálculo utilizado é o da análise de código. O Quadro 2.4 apresenta os valores típicos do erro ionosférico em função do ângulo de elevação dos satélites e da actividade solar existente durante o período de observação.

Quadro 2.4 – Valores típicos do erro ionosférico para vários cenários de observação [m]. Adaptado de: [11].

Elevação do satélite observado (°)	Período nocturno	Período diurno	
		Actividade solar normal	Actividade solar intensa
15	3.9	18	180
30	2.0	10	100
45	1.4	7	70
90	1	5	50

Estas diferenças serão tanto maiores quanto menor for a elevação dos satélites observados, dado que a distância das camadas atmosféricas atravessadas cresce com a diminuição da elevação, como ilustra a Figura 2.12.

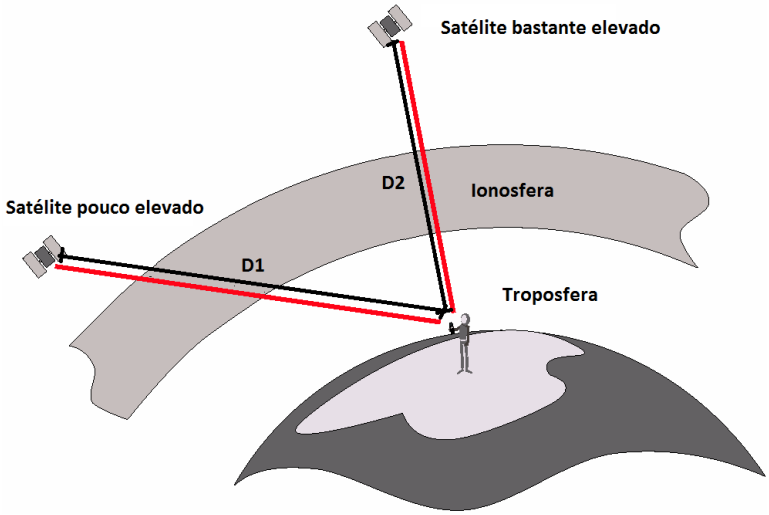


Figura 2.12 – Aumento da distância atmosférica percorrida pelo sinal GPS com a diminuição da elevação dos satélites observados.

Sendo a ionosfera um meio dispersivo, para condições ionosféricas idênticas o erro associado a este atraso é dependente da frequência da onda electromagnética que é transmitida. Verifica-se que o erro ionosférico é inversamente proporcional ao quadrado da frequência da onda electromagnética. Relembrando que o código P é transmitido nas duas portadoras com frequências distintas, L1 e L2, torna-se possível, para os receptores que sejam capazes de ler este código, anular, quase na totalidade, o erro associado ao atraso ionosférico. Contudo, como se disse, estando actualmente todos os satélites da constelação GPS a emitir no modo AS, apenas um conjunto limitado de receptores – os receptores autorizados pelo Departamento de Defesa Norte-Americano – serão capazes de ler o código W (código P encriptado no modo AS) e consequentemente mitigar o efeito do respectivo atraso/adiantamento.

Felizmente, na década de oitenta do século passado, descobriu-se que, para qualquer satélite do sistema GPS, a encriptação do código P nas portadoras L1 e L2 é efectuada da mesma forma. Esta descoberta permitiu fazer com que seja possível para qualquer receptor capaz de sintonizar as duas frequências de emissão das portadoras anular quase na totalidade o efeito do erro ionosférico. Assim,

mesmo sem ser capaz de efectuar a desencriptação do código, um receptor de dupla frequência, designados na literatura inglesa por receptores *codeless*, é capaz de anular o efeito do erro ionosférico no cálculo da pesudo-distância que separa o satélite p do receptor k (*Ionospheric Free*), de acordo com a seguinte igualdade [27]:

$$D^{p}_{k\,IF} = \frac{D^{p}_{k\,L2,P} - \alpha_f \times D^{p}_{k\,L1,P}}{1 - \alpha_f} \tag{2.6}$$

sendo

$D^{p}_{k\,IF}$ – distância que separa o receptor k do satélite p, corrigida do erro de atraso ionosférico;

$D^{p}_{k\,L2,P}$ - distância calculada com base no código P transmitido na portadora de frequência L2;

$D^{p}_{k\,L1,P}$ - distância calculada com base no código P transmitido na portadora de frequência L1;

α_f - constante de proporcionalidade dada por $\alpha_f = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}}\right)^2$.

Dado que os satélites da série IIR-M, mais recentes, emitem um segundo sinal de acesso civil na frequência L2, mesmo que o código P passe a ser encriptado de forma diferente em cada uma das frequências em que é transmitido a possibilidade de correcção deste erro manter-se-á acessível a todos os utilizadores que possuam um receptor capaz de efectuar observações em dois comprimentos de onda distintos, bastando para tal alterar apenas o código que serve de base às medições efectuadas.

Diga-se que a contabilização do atravessamento da ionosfera depende da técnica que é usada para a determinação da distância satélite-receptor. Para cada par receptor/satélite, o erro ionosférico que afecta a determinação da distância por análise de código é igual, mas de sinal contrário, ao erro ionosférico que afecta a mesma determinação por análise da portadora [11].

Este método de correcção, apesar de ser bastante eficaz, tem como desvantagem a necessidade do utilizador necessitar de um receptor de dupla frequência que actualmente são ainda bastante caros quando comparados com os receptores que operam em mono frequência. Os receptores mais correntes, mono frequência, não têm a possibilidade de fazer a correcção deste erro pela forma descrita. Assim, para minimizar o seu efeito, o segmento de controlo produz e calibra periodicamente modelos atmosféricos que são emitidos pelos satélites para todos os receptores e que tencionam modelar e corrigir este efeito sendo, contudo, a sua eficácia incompatível com as utilizações que requerem soluções posicionamento precisas. De facto, para utilizações mais exigentes, torna-se necessário desenvolver modelos que caracterizem localmente as condições ionosféricas e estes deverão ser incorporados de forma a que as suas previsões sejam fornecidas aos receptores em tempo real.

2.4.2.3. Erros associados ao conjunto antena/receptor

Os erros associados ao receptor e à antena que capta os sinais enviados pelos satélites fazem parte de um outro conjunto de erros que afecta a precisão das coordenadas obtidas na solução de posicionamento.

O ruído interno do receptor faz parte deste conjunto e é constituído pelas emissões electromagnéticas que resultam do próprio funcionamento do receptor podendo interferir com os sinais recebidos dos satélites e com o seu processamento. Os receptores de boa qualidade foram projectados e construídos

de modo a manterem muito baixo os níveis de ruído interno. À semelhança do que acontece no envio das ondas nos satélites também na sua recepção e descodificação as portadoras L1 e L2 são encaminhadas por partes distintas no *hardware* do receptor, dando origem ao erro de *hardware* do receptor [20]. Uma outra fonte de erro, ou pelo menos de instabilidade, é a determinação e a variação do centro de fase da antena. De facto, o centro geométrico da antena não coincide com o respectivo centro de fase, sendo este o local onde se faz a recepção do sinal. Para posicionamentos de alta e muito alta precisão, este é um factor a ter em conta [10].

Um erro bastante mais difícil de corrigir é o erro relativo ao *multipath*. O *multipath* é um fenómeno que resulta de múltiplas reflexões, totais ou parciais, do sinal emitido pelos satélites. As reflexões indesejadas sofridas pelas ondas emitidas pelos satélites são fenómenos puramente locais, pois resultam do ambiente físico existente nas imediações do receptor e resultam da presença de obstáculos na trajectória definida pelo sinal. São exemplos de ambientes fortemente reflexivos a existência de elementos metálicos ou a existência de uma grande superfície aquosa nas proximidades de uma antena receptora. Um sinal reflectido, ao ser captado e processado por um receptor, provoca uma medição de distância ao satélite segundo um trajecto que não é o da onda directa resultando como consequência uma solução para a distância que separa o receptor do satélite errada, apesar da medição efectuada pelo receptor ser correcta [16].

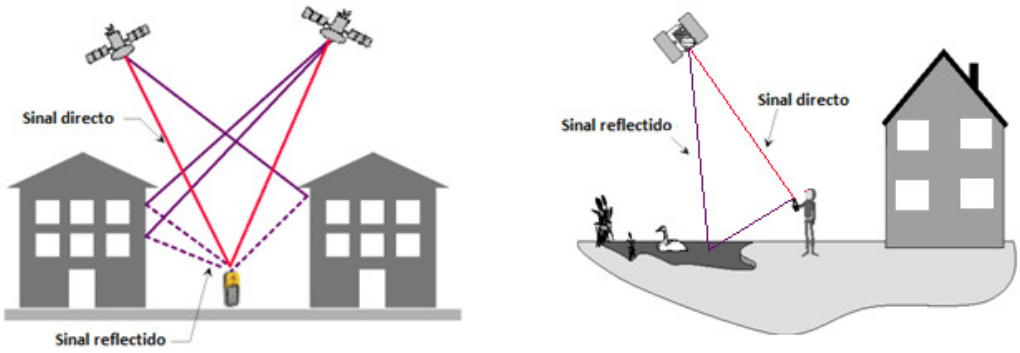


Figura 2.13 – Exemplos de ambientes reflexivos que provocam o efeito de *multipath*.

É impossível eliminar o erro devido ao *multipath* na sua totalidade existindo, contudo, várias formas de mitigar o seu efeito na determinação de coordenadas. Uma das soluções que mitigam este efeito é a utilização de antenas do tipo *choke ring*. As antenas *choke ring* possuem uma série de anéis metálicos concêntricos e apoiados numa base também metálica que protegem a antena, inferior e lateralmente, das reflexões de sinal vindas de cotas inferiores à cota a que se localiza a antena. Assim, esta recebe uma muito menor quantidade de sinal reflectido quando comparada com antenas normais, sem qualquer tipo de protecção capaz de diminuir a quantidade de sinal reflectido que é recebido. Actualmente, praticamente todos os fabricantes de aparelhos electrónicos navegação global por satélite possuem antenas deste tipo. Na Figura 2.14 são apresentadas duas antenas do tipo *choke ring* de dois fabricantes distintos.



(a) (b)

Figura 2.14 – Antenas GNSS do tipo *choke ring*: (a) – Fabricante: Leica Geosystems; (b) – Fabricante: Trimble.

Naturalmente, estas antenas são mais caras e mais pesadas do que as antenas de utilização corrente, sendo indicadas para utilização em ambiente especialmente reflexivos como por exemplo em ambiente urbano onde existem inúmeros obstáculos ao caminho directo das ondas e em zonas de vegetação densa. Contudo o uso das antenas do tipo *choke ring* traz desvantagens no que diz respeito às suas dimensões físicas, além de não evitar a captação de sinais reflectidos provenientes de cotas superiores à da antena.

Para responder à desvantagem no que respeita às dimensões e ao peso das antenas do tipo *choke ring*, foi aplicada uma nova tecnologia no desenvolvimento de novas antenas GPS, conhecida como *pinwheel* (Figura 2.15). Esse novo modelo de antena proporciona um desempenho semelhante ao alcançado pelas antenas *choke ring*, conseguindo-se contudo uma redução considerável do tamanho e peso [20]. Esta tecnologia é aplicada por diversos fabricantes de antenas receptoras de sinais GPS, entre os quais a LEICA Geosystems, por exemplo no seu modelo Leica AX1202 Geodetic Antenna, Figura 2.28.



(a) (b)

Figura 2.15 - Leica AX1202 Geodetic Antenna: (a) – Estrutura interna da base *pinwheel* da antena [28]; (b) – Aspecto exterior da antena [29].

Em aplicações de elevada precisão, a utilização de um ou de outro tipo de antenas é sempre aconselhada, uma vez que o erro total de posicionamento é, em grande parte, devido ao *multipath*.

Actualmente, tem-se tentado desenvolver processos para a mitigação deste efeito de forma electrónica, por análise de algumas propriedades do sinal. Por exemplo, sabe-se que o sinal reflectido, por efectuar um percurso maior do que o sinal directo chega à antena com um determinado atraso, tanto maior

quanto maior for o seu percurso. Esta informação pode ser utilizada para criar um filtro que impeça o processamento de sinal que chegue com um atraso superior a um determinado limite, por exemplo.

Uma outra propriedade que se pode ter em consideração na tentativa de combater o *multipath* é a polarização da antena. Tendo em conta que o sinal GPS emitido pelos satélites é polarizado circularmente no sentido anti-horário, técnica conhecida por *Right Hand Circularly Polarized* (RHCP), e que, teoricamente, os sinais ao serem reflectidos em condutores perfeitos invertem a polarização passando a *Left Hand Circularly Polarized* (LHCP), desta forma, a antena pode rejeitar parcialmente os sinais LHCP, conseguindo-se uma atenuação do efeito devido ao *multipath* [30].

O efeito do erro devido ao *multipath* sobre a medição da diferença de fase das portadoras é definido em [19], de onde se podem retirar as seguintes conclusões principais:

- O erro máximo devido ao efeito do *multipath* é aproximadamente igual a um quarto do comprimento de onda;
- A frequência do *multipath* é proporcional à distância percorrida pela onda reflectida, desde a superfície reflectora até à antena receptora e inversamente proporcional ao comprimento de onda dependendo também do ângulo de elevação do satélite observado.

Os satélites com baixo ângulo de elevação são mais susceptíveis ao fenómeno em questão levando a que a sua observação propicie o aumento deste efeito. Para além disso, das conclusões apresentadas ressalta o facto da frequência do *multipath* ser função do tempo, dada a sua movimentação contínua ao longo da respectiva órbita. Este facto torna a frequência do *multipath* variável e assim dificulta a aplicação de filtros electrónicos de bandas de frequência para atenuar este efeito, como são exemplo os filtros passa-baixo, passa alto ou passa-banda.

2.4.2.1. Estação/Efeitos Geofísicos

Os erros incluídos neste grupo são por exemplo o erro associado à falta de precisão na determinação das coordenadas da estação de referência, à rotação da Terra, ao movimento da crosta, ao movimento do pólo, à pressão da atmosfera e às marés e carga dos oceanos [31], [32].

2.4.3. A actividade solar e o sistema GNSS

2.4.3.1. O ciclo solar

A actividade solar é um fenómeno cíclico. Os seus picos de actividade máxima são atingidos de forma mais ou menos periódica ocorrendo em média a cada 12 anos. As tempestades solares e as auroras, boreais ou austrais, são uma consequência da actividade solar. A tempestade solar mais forte de que há registo ocorreu no ano de 1859. Nessa época, os fios dos telégrafos foram destruídos causando incêndios no continente americano e na Europa. Os registos das leituras do campo magnético terrestre sofreram fortes alterações e as auroras geraram luz de tal forma intensa que as pessoas conseguiam ler o jornal apenas com a luz que em si era reflectida. Nos dias de hoje, estamos perante o ciclo solar número 24 (desde que há registo). A Figura 2.16 mostra o registo dos ciclos de actividade nas últimas décadas (a preto) e as duas previsões daquele que será o ciclo que estamos neste momento a atravessar (ciclo número 24), por parte de dois físicos, Mausumi Dikpata do *National Center for Atmospheric Research* e David Hathaway, físico ligado às questões solares da NASA (National Aeronautics and Space Administration).

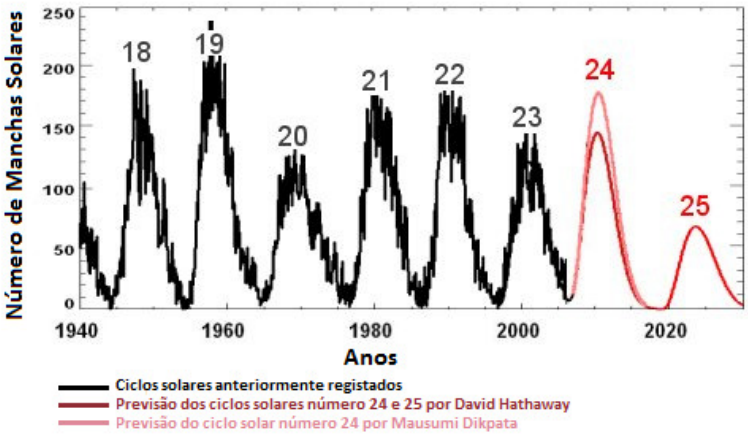


Figura 2.16– Registo da actividade solar e previsão do pico do ciclo solar número 24. Adaptado de: [33].

A menor actividade registada em 2007 levou os investigadores a definir Março de 2008 como a data de início do ciclo solar número 24, que atingirá o seu pico em finais de 2011 ou meados de 2012, segundo as previsões [34].

2.4.3.2. As Tempestades Geomagnéticas

As tempestades geomagnéticas ocorrem quando um grande fluxo de radiação emitido pelo Sol atinge a atmosfera e o campo magnético terrestres. O distúrbio ocorre quando surgem libertações maciças de massa da coroa solar. Quando as fortes rajadas de vento solar atingem a Terra, as ondas de radiação colidem com a magnetosfera, alterando a direcção e a intensidade do campo magnético terrestre. Em casos extremos, este fenómeno pode causar quebras na rede de energia eléctrica, interferência na correcta recepção de dados provenientes dos satélites de comunicações e de instrumentos de navegação, e efeitos imprevisíveis sobre o clima. As auroras boreais e austrais são maravilhas luminosas que surgem como consequência das tempestades geomagnéticas. Na Figura 2.17 é apresentada uma ilustração do campo magnético terrestre influenciado por uma erupção solar e uma aurora boreal.



(a) (b)

Figura 2.17 - Campo magnético terrestre influenciado por uma rajada solar (a) e aurora boreal (b). Adaptado de: [15].

2.4.3.3. Avisos lançados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)

Como se viu, a actividade solar tem grande interferência na comunicação dos receptores com os satélites. Estas interferências surgem como consequência da alteração das características do meio onde se propagam as ondas de sinal enviadas pelos satélites. A própria comunicação entre satélites poderá ser afectada por este fenómeno.

Para que seja possível ao público em geral estar a par do que se passa em termos daquilo que muitas vezes se designa por "Tempo Espacial", existe uma Agência Federal Norte-Americana que tem a sua base de acção focada na condição actualizada do estado marítimo e atmosférico – *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Desta forma, a monitorização do "Tempo Espacial" é uma das valências deste organismo federal. Sempre que surgem alterações das grandezas monitorizadas, são lançados alertas relativas às mesmas dentro de uma escala em função da "severidade" que se espera. Um dos indicadores é o índice K_p. O índice K_p está relacionado com as flutuações máximas das componentes horizontais observadas num magnetómetro, comparativamente a um dia calmo com baixa actividade solar. A tabela de conversão da flutuação máxima registada, em nanotesla (nT), para o índice K_p, varia de observatório para observatório, consoante a sua localização geográfica. Na prática, significa que os observatórios de maior latitude geomagnética requerem altos níveis de flutuação para atingirem um mesmo índice K_p. A conversão para o magnetômetro de Boulder é feita pelos limites mostrados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Intervalos de flutuação máxima (nT) e respectivo índice K_p [35].

nT	0-5	5-10	10-20	20-40	40-70	70-120	120-200	200-330	330-500	>500
K_p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Em caso de actividade solar bastante intensa, são feitas previsões do índice K_p de minuto a minuto, para que seja possível lançar avisos em "tempo-real". O valor final do índice K_p é apresentado no final de períodos de 3 horas, (00:00 – 03:00, 03:00 – 06:00, …, 21:00 – 24:00) verificando o valor dos desvios máximos positivo e negativo para que seja possível determinar a flutuação máxima total. Estes desvios podem ocorrer a qualquer momento dentro do referido período de 3 horas. Níveis de índice K_p iguais ou superiores a 5 indicam o limiar de uma tempestade geomagnética. A escala atribuída ao índice K_p é crescente de acordo com o nível de intensidade da tempestade geomagnética, de acordo com o Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Correspondência entre o índice K_p, a intensidade e o grau de severidade da tempestade solar.

K_p	5	6	7	8	9
Intensidade	G1	G2	G3	G4	G5
Severidade	Fraca	Moderada	Forte	Severa	Extrema

Posteriormente, estes resultados são publicados on-line através de um *site* na Internet [37] podendo ser consultados por qualquer utilizador. A Figura 2.18 mostra a forma como os resultados são disponibilizados ao utilizador. Os valores do índice K_p são estimados no Centro de Previsão Espacial da Força Aérea dos Estados Unidos da América usando dados dos magnetómetros das seguintes bases terrestres: Meanook - Canadá; Sitka – Alasca, Glenlea – Canadá, Saint Johns - Canadá, Ottawa - Canadá, Newport – Washington, Fredericksburg – Virginia, Boulder - Colorado, e Fresno - Califórnia.

Estes dados são disponibilizados através do programa de cooperação do *Geological Survey of Canada* (GSC) e do *U.S. Geological Survey*.

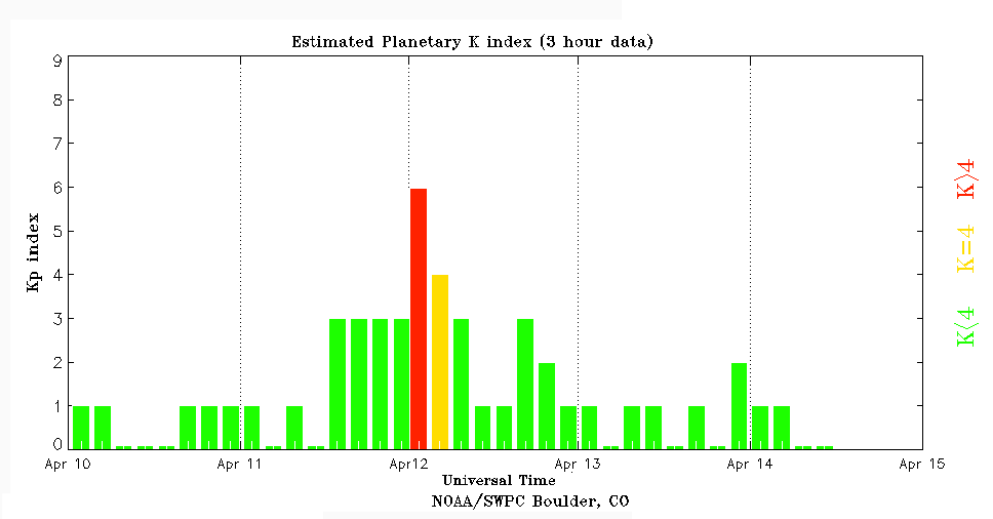


Figura 2.18 - Índices Kp relativos aos dias 10 a 14 de Abril de 2010. Adaptado de: [36].

A evolução do estado do "Tempo Espacial" pode também ser observada a partir de uma escala temporal de alertas/avisos disponibilizada pela NOAA através de [38] mais uma vez acessível a qualquer utilizador com acesso à Internet. Na Figura 2.19 são apresentados os alertas lançados em consequência das previsões efectuadas pelo *NOAA / Space Weather Prediction Center*, desde o dia 5 de Abril de 2010 até meados do dia 14 de Abril de 2010. Alguns dos alertas lançados podem ser posteriormente cancelados por não serem verificadas ou por não continuarem reunidas as condições que levaram ao seu lançamento.

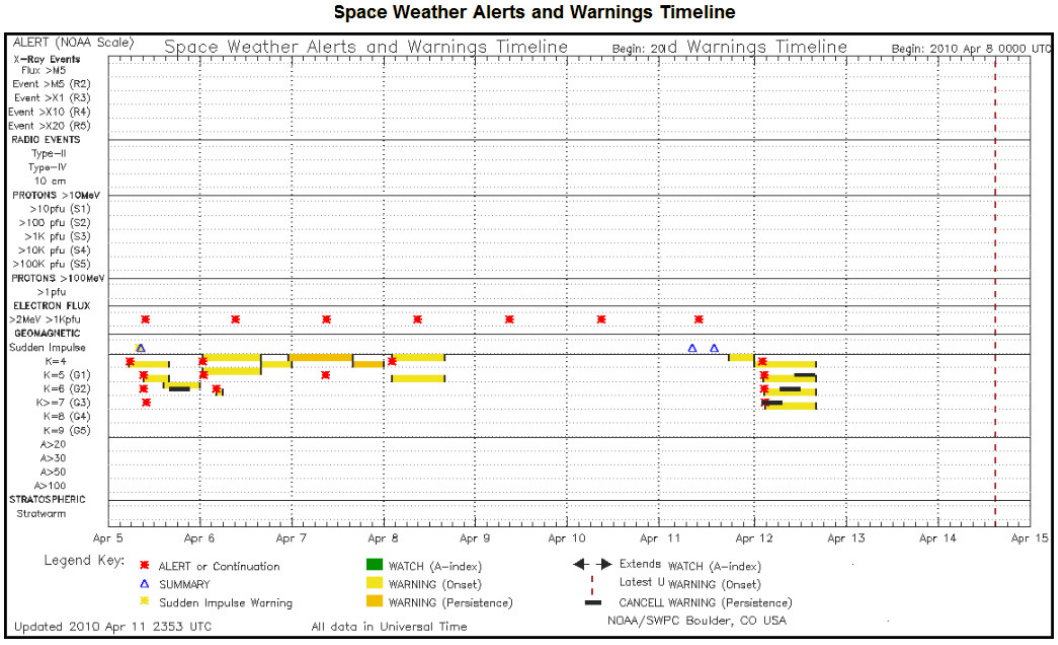


Figura 2.19 - Escala temporal de avisos/alertas relativos ao "Tempo Espacial" lançados pela NOAA [37].

A existência deste tipo de serviços permite que os dados obtidos pelas agências de monitorização espacial sejam disponibilizados aos utilizadores de equipamentos susceptíveis a sofrer interferências

destes fenómenos no seu correcto funcionamento. Desta forma, desde que exista um protocolo de comunicação entre as estações GPS e os organismos responsáveis pela emissão dos avisos, os utilizadores poderão ser alertados da existência de condições mais ou menos propícias à realização de determinadas tarefas.

Adiante, no Capítulo 4, será demonstrado que em situações extremas este fenómeno se traduz numa limitação às utilizações GNSS de alta e muito alta precisão, confirmando os avisos lançados por investigadores ligados ao estudo destes fenómenos [34].

2.5. DETERMINAÇÃO DAS PSEUDO-DISTÂNCIAS

Normalmente, designa-se por pseudo-distância a distância que um determinado receptor k mede a um satélite p, e diferencia-se da distância verdadeira que separa esse conjunto por conter o efeito dos erros que afectam a medição correcta da distância. Existem dois processos para o cálculo da pseudo-distância que separa um receptor de um satélite, ρ'^{p}_{k}, nomeadamente o cálculo por análise de código e o cálculo por análise de fase da onda portadora. Seguidamente, estes dois métodos são apresentados [16].

2.5.1. Pseudo-Distâncias por análise de código

Aquando da concepção e desenvolvimento do sistema GPS, foi desenvolvido um método de determinação das distâncias satélites/receptor com recurso à análise de código. Os receptores de utilização militar recorrem à análise do código P (ou Y quando este é encriptado) enquanto os receptores de uso civil analisam o código C/A. Cada satélite da constelação GPS emite um código próprio, quer no que respeita ao código C/A quer no que respeita ao código P. Desta forma, um receptor GPS "civil" reconhece e gera internamente réplicas do código C/A de cada satélite, acontecendo a mesma coisa para os receptores militares, que reconhecem e reproduzem internamente o código P (ou Y) de cada um dos satélites da constelação GPS. Em ambos os casos, civil ou militar, a análise de código é feita de igual forma tornando-se possível, por esta razão, explicar este método sem referir qual o tipo de código utilizado.

2.5.1.1. Pseudo-Distâncias em condições ideais

A pseudo-distância entre um determinado satélite p e um determinado receptor k, pode ser avaliada tendo em conta o atraso que a onda emitida pelo satélite tem em relação à réplica que localmente se reproduz no receptor, de acordo com a Figura 2.20. Este atraso, ignorando a contribuição de qualquer tipo de erro, é admitido igual ao tempo que a onda demorou a propagar-se, directamente e a velocidade constante, desde o satélite que a emitiu até ao receptor.

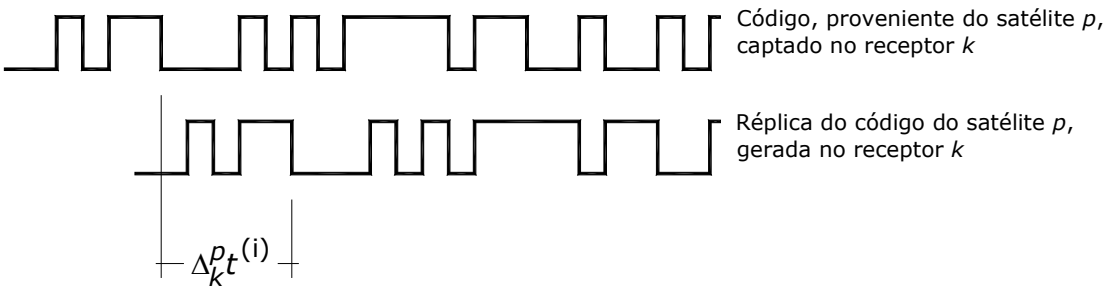


Figura 2.20 – Determinação do atraso entre o código gerado pelo satélite p e a sua réplica gerada no receptor k no instante i. Adaptado de: [11]

O código emitido por um dado satélite é um sinal binário que pode traduzir-se por uma função do tempo por:

$$y^p = g(t^p) \tag{2.7}$$

De acordo com (2.7), pode-se saber, para cada instante t, dado pelo relógio do satélite p, o bit (zero ou um) que o satélite emite nesse instante. O sinal binário emitido por cada satélite é regulado pelos relógios atómicos que transporta. Como os receptores GPS estão também equipados com relógios internos – relógios de quartzo, muito menos precisos que os relógios atómicos – e conhecem a função g, então o receptor k pode gerar um sinal binário dado por:

$$y_k = g(t_k) \tag{2.8}$$

sendo t_k o tempo dado pelo relógio do receptor.

Se admitirmos que $t_k = t^p$, isto é, que o relógio do receptor marca sempre a hora do satélite, então poderá ser medido com facilidade o intervalo de tempo que decorre entre a emissão dos sinais pelo satélite p e a sua recepção pelo receptor k, bastando para isso introduzir pequenos atrasos no relógio do receptor até que o sinal binário gerado internamente passe a coincidir com aquele que está a ser recebido do satélite. Determinando esse atraso, obtém-se o tempo que o sinal rádio emitido pelo satélite p demora até atingir o receptor k. Se admitirmos que a propagação dos sinais se faz livremente no vazio e que é desprezável o efeito do deslocamento do satélite em relação ao receptor, face à distância que separa os dois equipamentos, então este valor será o tempo de voo idealizado do sinal representado por $\Delta_k^p t(i)$ – ver Figura 2.20.

Decorre destes pressupostos que, num dado instante ou época de observação, a pseudo-distância do satélite p ao receptor k é dada por:

$$\rho'^p_k = c \times \Delta_k^p t^{(i)} \tag{2.9}$$

sendo

ρ'^p_k – pseudo-distância entre o ponto ocupado pelo satélite p no instante em que o sinal foi transmitido e o ponto ocupado pelo receptor k no instante em que o sinal for recebido;

c - velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no espaço ($3 \times 10^8\ m/s$);

$\Delta_k^p t^{(i)}$ - tempo de voo idealizado do sinal emitido desde o satélite p até à antena do receptor k.

É assim desta forma que se determina o valor da pseudo-distância pela análise de código.

2.5.1.2. Consideração da dessincronização dos relógios

De forma mais realista, a determinação do tempo de voo dos sinais emitidos pelos satélites deverá ser realizada considerando que, em geral, a hora do relógio do receptor não coincide com a hora dos relógios dos satélites. Desta forma, existirá uma diferença entre a hora dada pelo relógio do receptor k, t_k, e a hora do satélite p, t^p, em relação a uma determinada hora de referência, neste caso a hora GPS.

Desta forma, a existência de erros nos relógios do satélite e do receptor leva a que o atraso determinado pelo receptor seja diferente do verdadeiro valor do tempo de voo, $\Delta_k^p t^{(i)}$.

Generalizando, considerando a dessincronização dos relógios, a determinação da pseudo-distância entre o receptor e o satélite será dada por:

$$\rho'^p_k = \mathrm{c} \times \Delta_k^p t^{(i)} + \mathrm{c} \times (dt_k - dt^p) \tag{2.10}$$

sendo

$(dt_k - dt^p)$ - erro de sincronização devido ao atraso dos relógios.

2.5.2. Pseudo-Distâncias por análise de Fase da Portadora

2.5.2.1. Considerações Iniciais

Um fenómeno oscilatório simples que se propaga no espaço com uma velocidade angular ω e velocidade de propagação c (em que ω e c são constantes no tempo e no espaço), pode ser descrito por [11]:

$$A\,(x,t) = \mathrm{A}_0 \,\mathrm{sen}\left[\omega\left(t - \frac{x}{\mathrm{c}}\right) + \varphi_0\right] \tag{2.11}$$

sendo

A_0 - amplitude da onda;

ω - velocidade angular da onda; $\omega = 2 \times \pi \times f$;

f – frequência do fenómeno oscilatório, definida como o número de repetições do fenómeno por unidade de tempo;

t - o tempo;

x - o espaço;

c – velocidade de propagação da onda no meio;

φ_0 - fase inicial da onda.

Na equação (2.11), designa-se o argumento da função seno por fase da onda. Fixando um dado instante, t_0, a configuração da onda definida em (2.11) será dada por:

$$A\,(x, t_0) = \mathrm{A_0}\,\mathrm{sen}\left[\omega\left(t_0 - \frac{x}{\mathrm{c}}\right) + \varphi_0\right] \tag{2.12}$$

Tirando partido das propriedades da função seno, pode-se rearranjar a equação (2.12) rescrevendo-a da seguinte forma:

$$A\,(x, t_0) = -\mathrm{A_0}\,\mathrm{sen}\left(\frac{\omega x}{\mathrm{c}} - \alpha_0\right) \tag{2.13}$$

com

$$\alpha_0 = \omega \mathrm{t_0} + \varphi_0 \tag{2.14}$$

A função seno é uma função periódica com período igual a 2π. Desta forma a sua configuração será repetida de cada vez que o seu argumento dê um passo de 2π, ou seja, sendo α_0 constante para um determinado instante, a repetição da configuração da onda no espaço dá-se sempre que:

$$\frac{\omega x}{\mathrm{c}} = 2\pi \times N\ ;\ N \in \mathbb{N} \tag{2.15}$$

O período da oscilação, T, está relacionado com a frequência pela expressão:

$$T = f^{-1} \tag{2.16}$$

O comprimento de onda, λ, é dado por:

$$\lambda = \mathrm{c\,T} \tag{2.17}$$

onde c representa a velocidade de propagação da onda no meio, sendo neste caso igual à velocidade da luz no vazio.

Tendo em conta (2.16) e (2.17), rescrevendo (2.15) obtém-se:

$$x = N \times \lambda;\ N \in \mathbb{N} \tag{2.18}$$

Verifica-se que a configuração da onda descrita, num determinado instante t_0, repete-se no espaço em múltiplos naturais do respectivo comprimento de onda.

Se fixarmos agora a variável x, facilmente se conclui que a configuração ondulatória se repete em múltiplos de T, o período de propagação da onda. Adiante este conceito será utilizado para determinar as distâncias que separam um determinado receptor GPS dos satélites observados, através do método de cálculo de pseudo-distâncias por análise da fase da portadora. Na Figura 2.21 são esquematizadas as demonstrações anteriores.

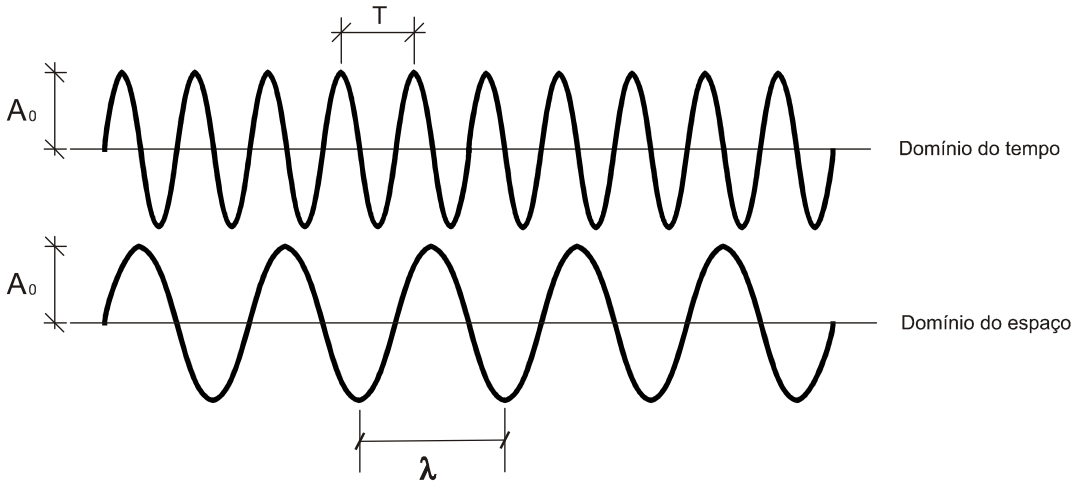


Figura 2.21 – Representação da configuração das ondas num referencial temporal e num referencial espacial.

2.5.2.2. Determinação da distância em condições ideais

Analogamente à técnica de análise de código, a análise de fase da onda portadora fornece também, ainda que de forma indirecta, a pseudo-distância entre satélites e receptor.

Genericamente, o princípio de funcionamento desta técnica baseia-se na medição da diferença de fase entre a onda recebida no receptor k, vinda do satélite p, e a réplica da onda, gerada internamente no receptor.

Imagine-se a situação idealizada em que a onda enviada pelo satélite p e recebida no receptor k está completamente coincidente com a onda internamente gerada pelo mesmo, como ilustrado na Figura 2.22. Seja também admitido que a propagação das ondas se faz no vazio e que os relógios dos satélites e do receptor estão perfeitamente sincronizados, não existindo ainda qualquer erro associado à medição das grandezas com interesse para a análise.

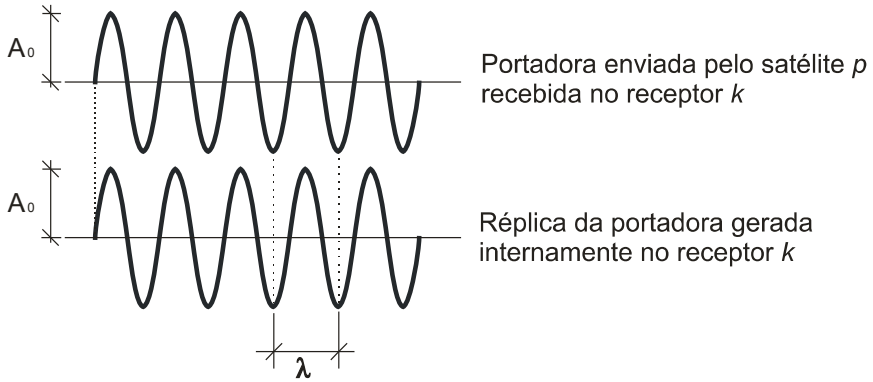


Figura 2.22 – Onda electromagnética recebida do satélite e gerada pelo receptor em fase.

Neste caso, diz-se que as ondas estão em fase, já que não existe desfasamento entre os seus pontos notáveis. Defina-se agora a distância que separa o satélite p e o receptor k da seguinte forma:

$$\rho_k^p = x^p - x_k \tag{2.19}$$

De acordo com (2.18), a equação (2.19) pode ser rescrita resultando:

$$\rho_k^p = N_k^p \times \lambda \; ; N_k^p \in \mathbb{N} \tag{2.20}$$

sendo N_k^p o número inteiro (natural) de ciclos da onda que separa a sua emissão no satélite p e a sua recepção no receptor k e designado por ambiguidade.

No caso geral, a onda gerada num receptor k não estará em fase com a onda recebida do satélite p, estando portanto desfasadas, como mostra a Figura 2.23. Nesta situação, a distância que separa o satélite p e o receptor k será dada pela equação (2.20) somando-lhe uma parcela que será dada por uma fracção do comprimento de onda, $\Delta\lambda$.

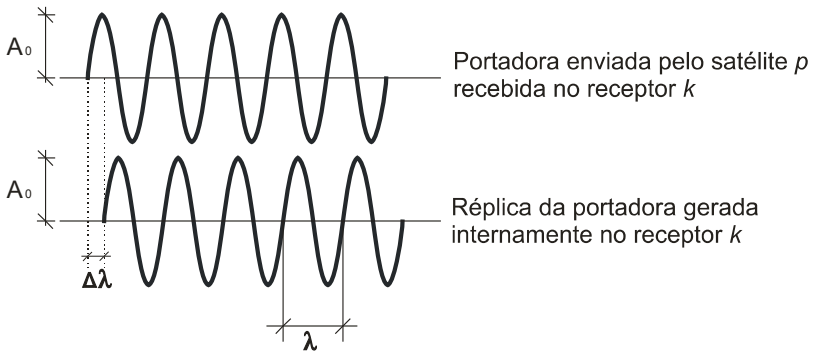


Figura 2.23 – Diferença de fase entre onda enviada pelo satélite e a sua réplica gerada no receptor.

Algebricamente, resulta do exposto a seguinte relação

$$\rho_k^p = N_k^p \times \lambda + \Delta\lambda_k^p; N_k^p \in \mathbb{N} \tag{2.21}$$

A onda emitida pelo satélite p num dado instante, t_0, é recebida pelo receptor k num instante posterior t_1.Dada a idealização da propagação das ondas no vazio, o tempo que a onda demora a realizar o percurso satélite/receptor, designado tempo de voo idealizado, t_k^p, admitindo que não existe qualquer erro associado às medições realizadas, é dado pela multiplicação da constante c^{-1} (inverso da velocidade de propagação da onda no meio) pela equação (2.21). Atendendo a (2.17) resulta a equação (2.22).

$$t^{i}{}_k^p = N_k^p \times T + \Delta T_k^p; N_k^p \in \mathbb{N} \tag{2.22}$$

Recordando a equação (2.12), a onda recebida em k, num instante t, é perfeitamente caracterizada e pode escrever-se como:

$$A_k^p\,(x,t) = \mathrm{A}_0\,\mathrm{sen}\left[\omega\left(t - t_k^p\right) + \varphi_0\right] \tag{2.23}$$

No mesmo instante, o receptor k está a gerar internamente uma réplica da onda definida por:

$$A_k\,(x,t) = \mathrm{A}_0\,\mathrm{sen}[\omega t + \varphi_0] \tag{2.24}$$

Desta forma, no instante t, a diferença de fase entre a onda emitida pelo satélite p e a sua réplica gerada pelo receptor k é definida pela diferença de argumentos das funções definidas em (2.24) e (2.23), ou seja,

$$\Delta\emptyset_k^p = \emptyset_k - \emptyset^p \tag{2.25}$$

Atendendo a (2.23), (2.24) e (2.25) obtém-se o valor da diferença de fase observada resultando:

$$\Delta\emptyset_k^p = \omega \times t^{i}{}_k^p \tag{2.26}$$

Recordando a equação (2.22), pode-se rescrever a equação (2.26) obtendo-se:

$$\Delta\emptyset_k^p = \omega\left(N_k^p \times T + \Delta T_k^p\right);\ N_k^p \in \mathbb{N} \ \wedge\ \Delta T_k^p \in \mathbb{Z} \tag{2.27}$$

A diferença de fase é um parâmetro calculado no receptor k e o respectivo valor está obrigatoriamente compreendido no intervalo $[0,2\pi[$ radianos.

Finalmente, usando as relações anteriores, pode definir-se a distância entre qualquer receptor k e qualquer satélite p em função da diferença de fase observada, pela equação dada por (2.28).

$$\rho_k^p = \lambda \times N_k^p + \frac{\lambda}{2\pi} \times \Delta\emptyset_k^p;\ N_k^p \in \mathbb{N} \ \wedge\ \Delta\emptyset_k^p \in [0,2\pi[\ rad \tag{2.28}$$

Contudo, tendo em conta que este método se baseia na medição da diferença de fase entre a onda recebida do satélite e a sua réplica gerada no receptor, para que seja possível calcular a pseudo-distância entre o satélite p e o receptor k é necessário determinar o valor da ambiguidade.

2.5.2.3. Consideração do erro dos relógios

Admita-se agora que quer os relógios do satélite p quer o relógio do receptor k têm desvios em relação a uma unidade temporal de referência – a hora GPS. Este cenário torna-se muito mais realista do que o admitido anteriormente. Assim, seja a hora dos relógios do satélite p dada por:

$$t^p = t + dt^p \tag{2.29}$$

em que

t^p - hora do relógio do satélite p;

t – hora de referência GPS;

dt^p - erro do relógio do satélite p.

Igualmente, a hora do relógio do receptor k será dada por:

$$t_k = t + dt_k \tag{2.30}$$

sendo

t_k - hora do relógio do receptor k;

t – hora de referência GPS;

dt_k - erro do relógio do receptor k.

Desta vez, a onda que é emitida pelo satélite p no instante t e recebida no receptor k depois de ter decorrido o tempo de voo idealizado – ver equação (2.22) – será de acordo com (2.11) dada por:

$$A^p\,(x,t) = \mathrm{A}_0\,\mathrm{sen}\left[\omega\left(t + dt^p - N_k^p \times T - \Delta T_k^p\right) + \varphi_0\right];\; N_k^p \in \mathbb{N} \;\wedge\; \Delta T_k^p \in \mathbb{Z} \tag{2.31}$$

No mesmo instante, a réplica gerada internamente pelo receptor k é dada por:

$$A_k\,(x,t) = \mathrm{A}_0\,\mathrm{sen}[\omega(t + dt_k) + \varphi_0] \tag{2.32}$$

Neste novo cenário, a diferença de fase registada para as ondas no instante t será:

$$\Delta\varphi_k^p = \varphi_k - \varphi^p \tag{2.33}$$

resultando:

$$\Delta\varphi_k^p = \omega\left(N_k^p \times T + \Delta T_k^p + dt_k - dt^p\right);\, N_k^p \in \mathbb{N} \;\wedge\; \Delta_k^p \in \mathbb{Z} \tag{2.34}$$

Recordando a equação (2.27) verifica-se, tal como esperado, que considerando os erros dos relógios do satélite p e do receptor k, a diferença de fase das ondas é igual à que já anteriormente se tinha calculado somada de uma nova parcela relativa à dessincronização de tempos, tal como mostra a equação (2.35).

$$\Delta\varphi_k^p = \omega \times t^{i}{}_k^p + \omega(dt_k - dt^p) \tag{2.35}$$

Tal como se disse, este parâmetro é determinado pelo receptor GPS e designa-se por diferença de fase aparente, por não estar corrigida dos erros dos relógios. Naturalmente, caso não se corrijam os erros de sincronização entre os relógios do satélite e o relógio do receptor, a distância entre satélite/receptor daqui decorrentes resultam logicamente erradas. Desta forma, a equação da pseudo-distância que separa o satélite p do receptor k, considerando apenas a existência dos erros de sincronização dos relógios, é dada por

$$\rho'^{p}_{k} = \lambda \times N_k^p + \frac{\lambda}{2\pi} \times \Delta\emptyset_k^p + c \times (dt_k - dt^p) \tag{2.36}$$

Pelo exposto, percebe-se que para efectuar o cálculo da pseudo-distância que separa o satélite observado e o receptor cujas coordenadas se pretende determinar, não basta conhecer a diferença de fase entre a onda emitida pelo satélite e a replicada pelo receptor. Assim, torna-se necessário conhecer também qual a ambiguidade que separa o conjunto satélite/receptor. A sua resolução vem sendo estudada desde o inicio do desenvolvimento do sistema *NAVSTAR – GPS* com o objectivo de aperfeiçoar os algoritmos aplicados na sua fixação para assim se conseguirem soluções rápidas e fiáveis.

2.5.2.4. Determinação da ambiguidade

Admita-se que um determinado receptor k está estacionado num ponto fixo. Apesar da imobilidade do receptor em relação à Terra, os satélites por ele observados movem-se de acordo com a sua órbita e os seus parâmetros orbitais. Desta forma, dada a movimentação dos satélites, os valores das grandezas

N_k^p e $\Delta\emptyset_k^p$ não permanecem constantes no tempo. Suponha-se que o receptor k observa o satélite p num instante inicial, t_0, e que nesse mesmo instante processa o valor relativo à diferença de fase inicial, $\Delta\emptyset_k^p(0)$. Admita-se que durante um determinado intervalo de tempo, $\Delta t = t_1 - t_0$, o receptor não perde o contacto com o satélite que está a observar fazendo assim uma monitorização da variação da diferença de fase aparente registada ao longo desse intervalo temporal. Se as condições apresentadas se verificarem então o receptor é capaz de determinar o número inteiro de ciclos que a diferença de fase aparente registou durante esse período de observação. Este valor será designado por n. Desta forma, pode escrever-se que a ambiguidade num instante t_1 é dada por:

$$N_k^p(t_1) = N_k^p(t_0) + n \tag{2.37}$$

sendo a ambiguidade no instante t_0 designada por ambiguidade inicial. Este processo é ilustrado na Figura 2.24.

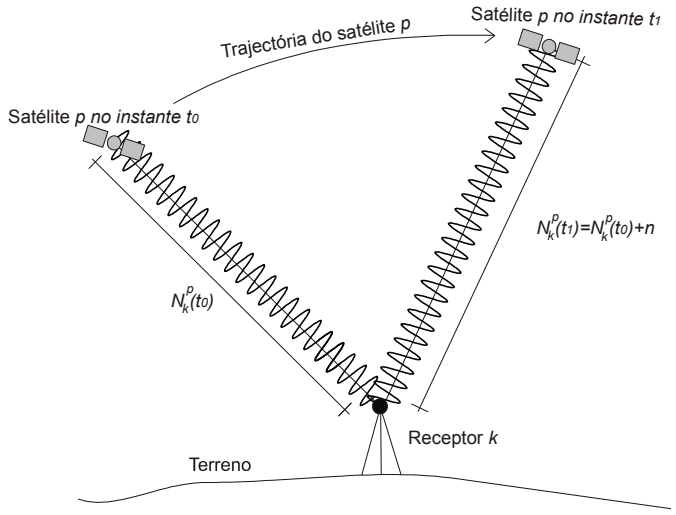


Figura 2.24 – Determinação da ambiguidade inicial.

Pelo exposto, conclui-se que em cada intervalo de observação existe uma ambiguidade desconhecida por cada par receptor/satélite observado. Em cada época de observações, o receptor k procede à medição da diferença de fase aparente, $\Delta\varphi_k^p$, e do número de ciclos que a diferença de fase completou nessa época de observação, n. Sempre que o receptor k registe uma falha de recepção de dados em relação ao(s) satélite(s) que esteja a observar, registando-se um salto de fase (*cycle slip*), a contagem de ciclos poderá ser perdida e nesse caso uma nova ambiguidade inicial (incógnita) é introduzida. O processo que permite determinar o valor da ambiguidade inicial designa-se por processo de resolução de ambiguidade existindo vários métodos para a sua fixação, por exemplo o método LAMBDA. A técnica actualmente mais utilizada pelos softwares comerciais para a fixação das ambiguidades iniciais é a técnica *On The Fly* (OTF). Esta técnica permite a fixação das ambiguidades iniciais de forma

precisa sem que seja necessário iniciar as observações pelo modo estático[5], em que por exemplo se conhecem as coordenadas de uma determinada estação. Além disso, a técnica OTF permite a fixação de ambiguidades com o receptor em movimento sendo desta forma uma mais valia para a aplicação do sistema GPS em modo cinemático[6]. Desprezando o erro dos relógios dos satélites, as expressões deduzidas mostram que a obtenção das coordenadas de um determinado ponto, recorrendo à técnica de análise de código, pressupõe a determinação de quatro incógnitas, nomeadamente as três coordenadas que o receptor ocupa e o valor do erro do relógio do receptor, dt_k. Na determinação do posicionamento por análise de fase, a estas quatro incógnitas junta-se uma nova incógnita por cada satélite observado, a designada ambiguidade inicial [10].

2.6. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE POSICIONAMENTO TRIDIMENSIONAL POR GNSS

A determinação do posicionamento absoluto de um determinado receptor consiste na resolução de um problema clássico de geometria, conhecido por trilateração. Este método permite a determinação de coordenadas de novos pontos em relação a pontos de coordenadas conhecidas (os pontos fixos), partindo do princípio que se conhecem as distâncias que os pontos fixos dos novos pontos. No caso do posicionamento com recurso a equipamentos GPS, os pontos fixos são as coordenadas que os satélites ocupam nos sucessivos instantes de observação. Estas coordenadas são conhecidas com elevado nível de rigor, uma vez que as órbitas dos satélites são constantemente monitorizadas.

Algebricamente, a equação da pseudo-distância medida por um receptor k a um satélite p, pode ser escrita de acordo com:

$$\rho'^{p}_{k} = \rho^{p}_{k} + I^{p}_{k} + T^{p}_{k} + R^{p}_{k} \tag{2.38}$$

sendo:

ρ'^{p}_{k} – pseudo-distância entre o satélite p e o receptor k, incluindo o erro de sincronização dos relógios;

ρ^{p}_{k} - distância verdadeira entre o satélite p e o receptor k;

I^{p}_{k} - erro devido ao atravessamento da camada ionosférica;

T^{p}_{k} - erro devido ao atravessamento da camada troposférica;

R^{p}_{k} – restantes erros associados à medição da distância pretendida.

O valor da distância verdadeira entre satélite p e receptor k é dado por:

[5] Posicionamento em modo estático – designação utilizada quando o receptor GPS se encontra parado num determinado ponto, ao longo do tempo.

[6] Posicionamento em modo cinemático – Designação utilizada quando o receptor se encontra em movimento, por exemplo no sector dos transportes.

$$\rho_k^p = \sqrt{(X^p - X_k)^2 + (Y^p - Y_k)^2 + (Z^p - Z_k)^2} \tag{2.39}$$

em que

ρ_k^p - distância verdadeira entre o satélite p e o receptor k;

X^p, Y^p, Z^p - coordenadas X, Y e Z do satélite p, relativamente a um referencial geocêntrico;

X_k, Y_k, Z_k - coordenadas X, Y e Z do receptor k, relativamente a um referencial geocêntrico.

Na equação (2.39), os termos X^p, Y^p, Z^psão grandezas conhecidas, uma vez que dispomos das efemérides dos satélites determinadas com bastante rigor e actualizadas sempre que necessário pelo segmento de controlo. Sendo também conhecido o valor da velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no espaço, admitido igual à velocidade de propagação da luz no vazio, restam como incógnitas as coordenadas da posição que o receptor k ocupa, X_k, Y_k e Z_k. Considerando o erro do relógio dos satélites desprezável, na determinação da pseudo-distância que o separa de um determinado receptor, para que se consiga determinar este conjunto de incógnitas são necessárias pelo menos quatro equações para que o sistema seja possível e determinado (as quatro incógnitas são as coordenadas X_k, Y_k, Z_k e o erro do relógio do receptor, dt_k). Para isso, basta que sejam efectuadas no mesmo instante t observações a pelo menos três satélites distintos. Assim, admitindo observações a quatro satélites, resulta o seguinte sistema de equações não lineares:

$$\begin{aligned}
\rho'^{p1}_k &= \sqrt{(X^{p1} - X_k)^2 + (Y^{p1} - Y_k)^2 + (Z^{p1} - Z_k)^2} + I_k^p + T_k^p + R_k^p \\
\rho'^{p2}_k &= \sqrt{(X^{p2} - X_k)^2 + (Y^{p2} - Y_k)^2 + (Z^{p2} - Z_k)^2} + I_k^p + T_k^p + R_k^p \\
\rho'^{p3}_k &= \sqrt{(X^{p3} - X_k)^2 + (Y^{p3} - Y_k)^2 + (Z^{p3} - Z_k)^2} + I_k^p + T_k^p + R_k^p \\
\rho'^{p4}_k &= \sqrt{(X^{p4} - X_k)^2 + (Y^{p4} - Y_k)^2 + (Z^{p4} - Z_k)^2} + I_k^p + T_k^p + R_k^p
\end{aligned} \tag{2.40}$$

em que as grandezas ρ'^{pi}_k representam a pseudo-distância do satélite i ao receptor k e todas as outras variáveis têm o significado anteriormente definido. É desta forma possível determinar as incógnitas que caracterizam o posicionamento tridimensional do receptor GPS bem como determinar o respectivo valor de dessincronização. Relembre-se que, caso a determinação da pseudo-distância seja realizada por análise de fase, a estas quatro incógnitas junta-se mais uma incógnita por cada satélite observado, a designada ambiguidade inicial.

Dada a grandeza da velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no vazio, se a dessincronização atingir o valor simbólico de 1 nanossegundo o erro associado à pseudo-distância calculada é de aproximadamente 30 centímetros. Na realidade, a solução de posicionamento é obtida recorrendo à observação dos n satélites observáveis num determinado ponto do planeta e num determinado instante t. Assim, existindo redundância de dados, consegue-se minimizar o conjunto dos erros que afectam a solução obtida (por exemplo utilizando o Método dos Mínimos Quadrados) resultando uma solução mais precisa.

2.7. TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO

Neste subcapítulo será apresentada uma breve noção sobre duas das técnicas de posicionamento utilizadas na determinação de coordenadas. As técnicas de posicionamento podem ser subdivididas em dois grupos, nomeadamente:

- Posicionamento autónomo;
- Posicionamento diferencial.

2.7.1. Posicionamento autónomo

O método de posicionamento autónomo consiste na determinação das coordenadas globais absolutas de um determinado ponto ou conjunto de pontos. Tendo em conta que a distância que separa o receptor k do satélite p pode ser determinada de acordo com o apresentado em 2.5 e 2.5.2, e admitindo que os erros que afectam a precisão do posicionamento são convenientemente atenuados ou eliminados, se as coordenadas dos satélites observados forem conhecidas será possível determinar também as coordenadas do receptor que efectuou as referidas observações aos satélites. De facto, a posição que cada satélite ocupa no espaço em cada instante, é definida nas efemérides transmitidas na mensagem de navegação. Esta posição é referenciada a um *datum* geodésico rectangular, o WGS84 (*World Geodetic System*, definido em 1984). Assim, num determinado instante t, conhece-se o posicionamento relativo entre os satélites observados e a estação cujas coordenadas se pretendem conhecer e conhecem-se também as coordenadas dos satélites observados, sendo possível definir as coordenadas do receptor que efectuou as observações, tal como se ilustra na Figura 2.25. A precisão das coordenadas obtidas será tanto maior quanto menores forem os erros associados à sua determinação, tal como visto anteriormente.

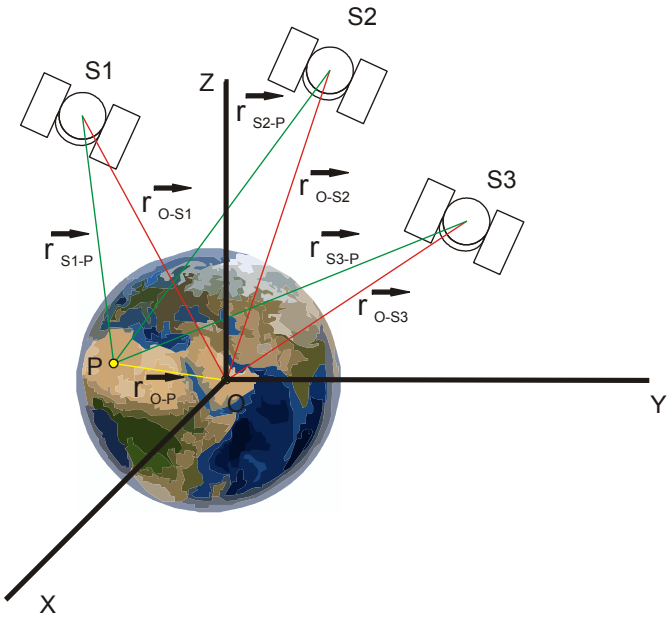


Figura 2.25 – Determinação das coordenadas de um ponto em posicionamento autónomo.

2.7.2. Posicionamento Diferencial

A precisão obtida pelo posicionamento absoluto, apesar de impressionante face à escala planetária, é incompatível com a precisão imposta pelas obras de Engenharia Civil. Um conceito extremamente importante, para contornar esta limitação, prende-se com a utilização da técnica de posicionamento diferencial. Esta técnica de posicionamento, que tem por base o conceito de posicionamento relativo, pode ser utilizada tanto na análise de código como na análise de fase das portadoras. Contudo, para aplicações com exigência de elevada precisão, face aos níveis de precisão conseguidos, é comum recorrer-se à técnica de posicionamento diferencial.

A consideração das técnicas de posicionamento relativo permitem minimizar ou até mesmo cancelar os efeitos de erros sistemáticos que afectam de forma semelhante ambas as estações, como por exemplo os erros das órbitas dos satélites, erros de refracção ionosférica e troposférica ou erros de sincronização dos relógios.

Admitindo que as coordenadas da estação de referência são perfeitamente conhecidas, pode-se calcular o vector que une as duas estações, obtendo-se desta forma as coordenadas da estação móvel. Através desta técnica, é possível eliminar, ou pelo menos atenuar fortemente, os erros que sejam comuns às observações feitas pelo conjunto estação de referência/estação móvel. No caso do posicionamento diferencial por análise de fase da portadora, as observações são combinadas linearmente, dando origem a observações derivadas das observáveis básicas obtidas em cada estação, nomeadamente por [10]:

- diferenças de fase simples;
- diferenças de fase duplas;
- diferenças de fase triplas.

2.7.2.1. Diferenças de fase simples

Designa-se por diferença de fase simples a diferença entre duas observações efectuadas por dois receptores, k e m, em relação a um mesmo satélite p e num mesmo instante t. Admita-se que os receptores k e m observam o satélite p, numa dada época, de forma simultânea e sem que ocorra perda de recepção de sinal em nenhum deles, como esquematizado na Figura 2.26.

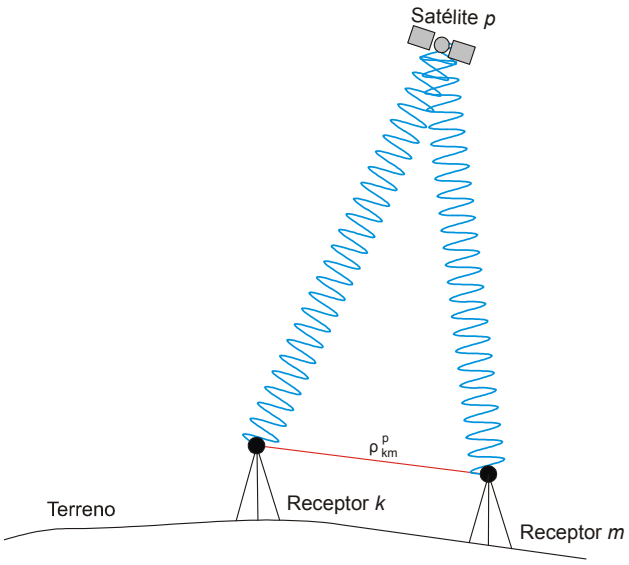


Figura 2.26 - Representação esquemática do método das diferenças simples.
Fonte: O autor.

Recordando (2.34), e não desprezando nenhuma das fontes de erro que afectam a medição das pseudo-distâncias, podemos reescrever a diferença de fase medida pelo receptor k em relação à fase da portadora emitida pelo satélite p, em função do tempo, t, da seguinte forma:

$$\Delta\varphi_k^p(t) = \frac{f}{c} \times \rho_k^p(t) + f \times (dt^p - dt_k) + N_k^p - I_k^p(t) + T_k^p(t) + M_k^p(t) + \delta^p(t) + \delta_k(t) + r_k^p(t) \qquad (2.41)$$

sendo:

$\Delta\varphi_k^p(t)$ – diferença de fase medida pelo receptor k em relação ao satélite p em função do tempo;

f - frequência da portadora;

c - velocidade de propagação da onda no espaço;

$\rho_k^p(t)$ - distância verdadeira que separa o receptor k do satélite p, em função do tempo;

$dt^p - dt_k$ - dessincronização entre a hora do relógio do satélite p e do receptor k;

N_k^p - ambiguidade inicial do conjunto receptor k / satélite p, em ciclos;

$I_k^p(t)$ - parcela não corrigida do avanço ionosférico sofrido no trajecto desde o satélite p até ao receptor k, em ciclos;

$T_k^p(t)$ - parcela não corrigida do atraso troposférico sofrido no trajecto desde o satélite p até ao receptor k, em ciclos;

$M_k^p(t)$ – erro devido ao efeito do *multipath,* convertida em ciclos;

$\delta^p(t)$ - atraso de *hardware* do satélite p, convertido em ciclos;

$\delta_k(t)$ - atraso de *hardware* do receptor k, convertido em ciclos;

$r_k(t)$ – ruído associado às medições realizadas pelo receptor k ao satélite p, convertido em ciclos.

A diferença de fase medida pelo receptor m, no mesmo instante t, pode ser escrita de forma semelhante à equação (2.42). Assim, escrevendo a equação de diferenças simples entre os receptores k e m, virá:

$$S_{km}^{p}(t) = \Delta\varphi_{k}^{p}(t) - \Delta\varphi_{m}^{p}(t) \tag{2.42}$$

resultando:

$$S_{km}^{p}(t) = \frac{f}{c} \times \rho_{km}^{p}(t) - f \times dt_{km}(t) + N_{km}^{p} - I_{km}^{p}(t) + T_{km}^{p}(t) + M_{km}^{p} + \delta_{km}(t) + r_{km}^{p}(t) \tag{2.43}$$

Como seria de esperar, criando uma combinação linear através da subtracção das observações de fase de cada receptor, k e m, as parcelas comuns aos dois receptores anulam-se. Da equação (2.47), conclui-se que pela aplicação das diferenças simples de observação de fase, a observação derivada (a linha de base) resulta sem a influência do erro da hora reportada pelo satélite e sem a influência do erro devido ao *hardware* do mesmo.

2.7.2.2. Diferenças de fase duplas

O princípio das diferenças duplas é o mesmo das diferenças simples mas desta vez implicando que os dois receptores efectuem observações simultâneas a dois satélites, tal como ilustrado na Figura 2.27.

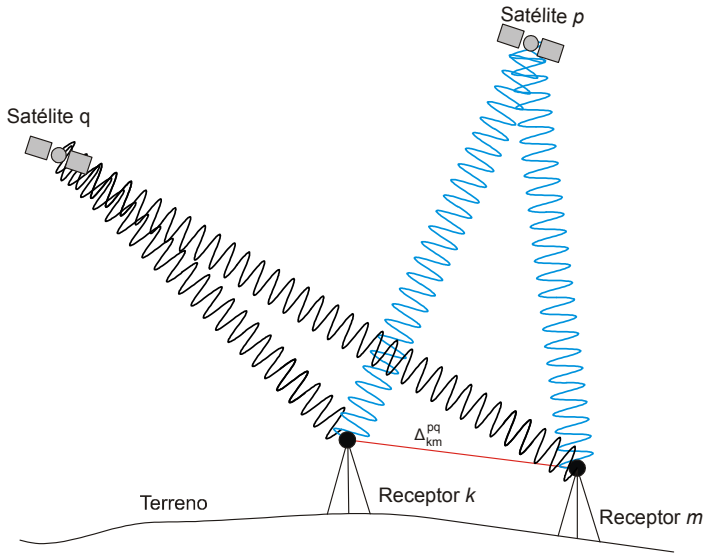


Figura 2.27 – Representação esquemática do método das diferenças duplas.

Se p e q forem os satélites observados, então poder-se-á escrever uma equação de diferenças duplas de acordo com:

$$\Delta_{km}^{pq}(t) = S_{km}^{p}(t) - S_{km}^{q}(t) \tag{2.44}$$

Expandindo a equação (2.44) obtém-se a equação de dupla diferença de fase, como expresso na equação (2.45):

$$\Delta_{km}^{pq}(t) = \frac{f}{c}\left[S_{km}^{p}(t) - S_{km}^{q}(t)\right] + N_{km}^{pq} - I_{km}^{pq}(t) + T_{km}^{pq}(t) + M_{km}^{pq} + r_{km}^{pq} \tag{2.45}$$

Para além de não depender dos erros dos relógios dos receptores, dt_k e dt_m, a equação de diferenças duplas não dependerá também dos erros devidos aos designados erros de *hardware* dos receptores, δ_{k} e δ_{m}.

Normalmente, os erros devidos ao *multipath* e ao ruído associado às medições realizadas não são modelados. Além disso, para linhas de base de pequena extensão e compostas por estações com características técnicas idênticas, caso as condições ambientais a que estão expostas sejam semelhantes, as parcelas correspondentes aos efeitos dos erros ionosférico, troposférico, *multipath* e ruído presentes na equação (2.45) são desprezáveis (porque quase se anulam totalmente após combinação linear entre observações de estações), resultando em:

$$\Delta_{km}^{pq}(t) = \frac{f}{c} \times S_{km}^{pq}(t) + N_{km}^{pq} \tag{2.46}$$

Contudo, caso os receptores não estejam sujeitos a condições semelhantes relativamente ao meio que os rodeia, tal como no caso do posicionamento diferencial, os erros que não sejam comuns a ambos os receptores não serão anulados. A dupla diferença de fase é a mais utilizada de entre as várias possibilidades existentes, por ser o modelo matemático que fornece a melhor rigidez geométrica à solução. Assim, para além do que fazem as distâncias simples, as duplas diferenças de fase eliminam os erros relativos aos receptores e outros erros que afectem, de forma idêntica, as pseudo-distâncias entre cada receptor e cada satélite (por exemplo o erro troposférico nas camadas mais próximas do solo).

2.7.2.3. Diferenças de fase triplas

As diferenças de fase triplas de fase resultam da combinação linear de duas diferenças de fase duplas obtidas em instantes sucessivos e podem escrever-se da seguinte forma:

$$\nabla_{km}^{pq}(t) = \Delta_{km}^{pq}(t_2) - \Delta_{km}^{pq}(t_1) \tag{2.47}$$

O desenvolvimento da equação (2.47) resulta em:

$$\nabla_{km}^{pq}(t) = \frac{f}{c}\left[S_{k}^{p}(t_2) - S_{k}^{p}(t_1) - S_{m}^{p}(t_2) + S_{mk}^{p}(t_1) - S_{k}^{q}(t_2) + S_{k}^{q}(t_1) + S_{m}^{q}(t_2) - S_{m}^{q}(t_1)\right] \tag{2.48}$$

que pode ser escrita, de acordo com a notação adoptada, na sua forma compacta como:

$$\nabla_{km}^{pq}(t) = \frac{f}{c}\left[S_{km}^{pq}(t_2) - S_{km}^{pq}(t_1)\right] \tag{2.49}$$

Caso os receptores não registem saltos de fase entre os instantes t_1 e t_2, então a ambiguidade inicial será constante no tempo. Desta forma, na tripla diferença de fase, as ambiguidades iniciais anulam-se e, consequentemente, a linha de base resulta sem a necessidade da sua determinação. Este facto tem particular interesse em linhas de base bastante extensas, para que exista menos um factor de imprecisão associado à determinação das coordenadas da estação móvel. Contudo, caso os receptores percam a recepção de sinal por parte dos satélites entre épocas de amostragem sucessivas, então o exposto deixará de ser verdadeiro. Neste caso, o valor resultante do cálculo das diferenças triplas, para o intervalo de tempo em que o contacto com o satélite foi perdido, resultará errado e será mostrado como um *outlier*. Por esta razão, a tripla diferença de fase é muitas vezes usada para detectar saltos de fase, quer automaticamente pelos softwares existentes nos receptores, quer manualmente pelos utilizadores em trabalho de pós-processamento.

2.8. SISTEMAS DE COORDENADAS

Como se viu, o sistema GPS permite a determinação do posicionamento global de um determinado receptor. Desta forma, para que as coordenadas obtidas tenham utilidade e significado para o utilizador, torna-se necessário definir um referencial geral em relação ao qual se está a definir a posição ocupada.

A forma do planeta Terra pode ser definida recorrendo a formulações matemáticas, mais ou menos complexas, de acordo com o nível de precisão pretendido. Em geral, a curvatura da Terra é aquela que se obtém admitindo-se que os oceanos se prolongam através das regiões continentais. Assim, define-se Geóide como o sólido delimitado pela superfície definida pelo nível médio das águas do mar. Consequentemente, o Geóide tem uma forma aproximadamente esférica sendo ligeiramente achatado nos pólos. Para se definir um sólido com a forma aproximada da Terra (um elipsóide), basta definir correctamente os comprimentos do eixo maior e menor do respectivo sólido. Assim, para definir totalmente um elipsóide, torna-se necessário definir também o seu posicionamento relativamente ao sólido de referência (o Geóide). Denomina-se por *datum* geodésico o conjunto de parâmetros que permitem definir tal posicionamento.

Quando se pretende modelar a totalidade do globo, define-se uma superfície de referência que se adeqúe às características globais do planeta, resultando deste procedimento a definição de um *datum* global. Contudo, compreende-se que os pressupostos anteriores poderão levar a que em determinadas regiões do globo, o *datum* global defina e posicione o elipsóide adoptado, em relação ao Geóide, de forma não satisfatória. Para definir de forma conveniente a realidade local de determinada região, independentemente do que se passa a nível global, definem-se os chamados *data* locais.

É sempre possível transformar as coordenadas de um *datum* para outro *datum*. No entanto, as transformações necessárias são, regra geral, realizadas por fórmulas aproximadas.

O sistema GPS utiliza como referencial um *datum* global designado por WGS84 (*World Geodetic Syste*m, 1984). Este *datum* foi definido em 1984 e a sua superfície esférica achatada é definida por um eixo maior de comprimento igual a 6378,137km no equador e por um eixo menor de comprimento igual a 6356,752314km nos pólos [38].

As coordenadas geodésicas de um determinado ponto podem ser expressas sob a forma de coordenadas geodésicas elipsoidais ou sob a forma de coordenadas geodésicas rectangulares, sendo possível transformar as coordenadas elipsoidais em coordenadas rectangulares e vice-versa. Este tema

encontra-se muito bem tratado na bibliografia da especialidade pelo que a sua abordagem não será mais aprofundada.

2.8.1. Coordenadas Geodésicas Elipsoidais

As coordenadas de um dado ponto P podem ser referenciadas em relação à superfície de um determinado elipsóide, tal como se esquematiza na Figura 2.28.

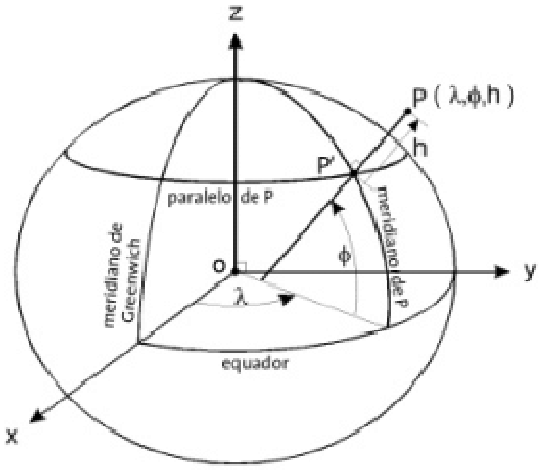


Figura 2.28 – Representação das coordenadas geodésicas elipsoidais de um ponto [11].

O ponto *P'* surge como projecção do ponto *P*, sendo esta realizada definindo como projectantes versores normais à superfície do elipsóide que passem pelo ponto *P*. Assim, é possível definir para o ponto P um determinado meridiano e um determinado paralelo, definindo-se ainda três grandezas (dois ângulos e uma dimensão), nomeadamente:

- Longitude elipsoidal (λ) – Ângulo formado pelo diedro definido pelos meridianos de Greenwich e do ponto P, definido entre 0 e 180º, sendo convencionalmente positivo para Este do meridiano de Greenwich e negativo para Oeste do mesmo;
- Latitude elipsoidal (ϕ) – Ângulo formado entre o plano do equador e a normal ao elipsóide que passa no ponto *P*, variando de 0 a 90º e sendo convencionalmente positivo para Norte do equador e negativo para Sul do mesmo;
- Altitude elipsoidal (h) – Distância da normal que separa o ponto *P* da sua projecção sobre o elipsóide, sendo positiva quando o ponto *P* se situa acima do elipsóide de referência e negativa quando se situa abaixo da mesma.

2.8.2. Coordenadas Geodésicas Rectangulares

De forma semelhante, depois de definido um elipsóide de referência, pode ser também definido um referencial cuja origem seja alocada ao centro do elipsóide definido, cujo eixo dos *ZZ* esteja alinhado com o eixo de menor dimensão do elipsóide, o eixo dos *XX* passe pelo ponto de cruzamento do meridiano de Greenwich com o equador e que o eixo dos *YY* defina, em conjunto com os eixos anteriores, um referencial directo, tal como indicado na Figura 2.29. Um referencial definido desta

forma designa-se por referencial geodésico rectangular e é a base das coordenadas geodésicas rectangulares.

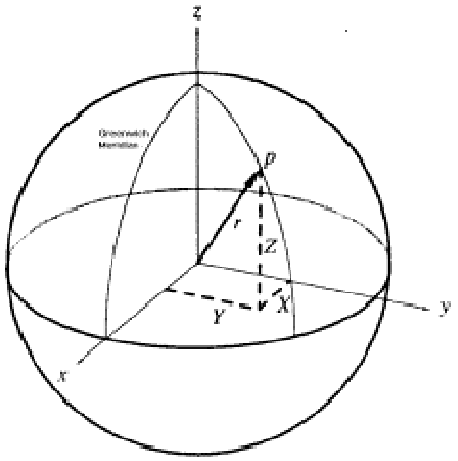


Figura 2.29 – Referencial geodésico rectangular [11].

Assim, para cada ponto P, é possível definir as coordenadas X_P, Y_P e Z_P num referencial geodésico rectangular.

2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Actualmente, estão em funcionamento o conjunto de satélites do sistema americano GPS e a constelação de satélites do sistema russo GLONASS, encontrando-se em fase de testes alguns satélites do futuro sistema de navegação global europeu (GALILEO) recentemente lançados. À semelhança do sistema GPS, o sistema GLONASS foi desenvolvido pelo Ministério da Defesa da Federação Russa, durante a Guerra Fria, para permitir a navegação e o comando de mísseis balísticos. O segmento espacial do GLONASS dispõe de 21 satélites, distribuídos por três planos orbitais sensivelmente a 19100 km de altitude. Este sistema de navegação foi declarado completo em 1995 mas rapidamente se desintegrou face ao "colapso" da economia russa. Em 2001, o governo russo comprometeu-se a restaurar o sistema de modo a torná-lo operacional, tendo posteriormente recebido ajuda nesse sentido por parte da Índia [39].

De forma idêntica ao sistema GPS, o sistema GLONASS emite sinais em duas bandas, L1 e L2. Contudo, ao contrário do sistema GPS que usa a técnica de CDMA (*Code Division Multiple Access*) para diferenciar cada um dos satélites que emite o sinal, o GLONASS utiliza a técnica de FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) de acordo com a banda utilizada. A gama de frequências do sistema GLONASS é definida a partir da frequência central dos canais, de acordo com [40]:

$$L1 = 1602 + 0{,}562n\ [MHz]$$
$$L2 = 1246 + 0{,}4375n\ [MHz] \quad (2.50)$$

sendo n=1,2,…,24 o número do canal utilizado.

Contudo, com os novos satélites, o sistema GLONASS passará a utilizar a técnica CDMA, que é também utilizada pelos demais GNSS existentes. Esta medida irá permitir uma maior facilidade de interoperabilidade entre os vários sistemas. Comparativamente com a técnica CDMA, a técnica

FDMA tem a vantagem de permitir a identificação muito mais rápida dos satélites rastreados, já que para os diferenciar basta aferir qual a frequência do sinal transmitido enquanto na técnica CDMA é necessário demodular o código transmitido na onda, para posteriormente se conseguir identificar qual o satélite que o emitiu.

GALILEO é a designação atribuída ao sistema europeu de navegação global por satélite, em homenagem ao cientista italiano Galileo Galilei. A sua implementação é da responsabilidade da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* - ESA), em parceria com a União Europeia (*European Union* – EU). Este será o primeiro sistema de posicionamento e navegação por satélite especificamente criado para uso civil e, naturalmente, será inter-operável com os demais sistemas GNSS existentes. Prevê-se que o GALILEO esteja totalmente operacional em 2014, sendo que o primeiro satélite desta constelação - Giove-A (*Galileo in orbit verification element* – A) - foi lançado em 28 de Dezembro de 2005. Os primeiros sinais deste sistema de navegação por satélite foram transmitidos pelo Giove-A em 12 de Janeiro de 2006 [41]. A constelação GALILEO será composta por trinta satélites distribuídos por três planos orbitais (dispondo cada plano orbital de nove satélites operacionais e um de reserva) com 56^{o} de inclinação e a uma altitude de 23222km. Quanto aos sinais transmitidos, o GALILEO transmitirá L1, E5 A/B e E6 utilizando as quatro portadoras indicadas no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Frequências das portadoras emitidas pelos satélites GALILEO. Adaptado de [42].

L1	E5A	E5B	E6
1575 MHz	1176 MHz	1207 MHz	1278 MHz

O segmento de controlo do GALILEO irá dispor de dois centros de controlo (GCC – *Galileo Control Centers*), um deles responsável pela geração das mensagens de navegação e pelo sistema de tempo ficando o outro responsável pela monitorização da integridade do sistema. Serão globalmente distribuídas cerca de trinta estações (GSS – Galileo Sensor Stations) que serão responsáveis por adquirir dados provenientes dos satélites e de os enviar aos GCC, dando apoio à determinação de órbitas e sincronização de tempo dos satélites [43].

O sistema GALILEO disponibilizará seis tipos de serviços de acordo com a necessidade dos utilizadores sendo eles [42]:

- Serviço de acesso livre (OS – *Open Service*)
- Serviço de segurança de vida (SoL – *Safety of Life*)
- Serviços comerciais (CS – *Commercial Service*)
- Serviço de busca e salvamento (SAR – *Search and Rescue Service*)
- Serviço para público autorizado (PRS – *Public Regulated Service*).

Também a República Democrática da China está a desenvolver o seu próprio sistema de navegação global por satélite designado por COMPASS. Esta última constelação irá corresponder ao alargamento da cobertura para a escala mundial do sistema de navegação regional por satélite que a China dispõe actualmente, o *Beidou* (*Big Dipper* em inglês, Grande Ursa em português). Assim, o COMPASS terá um conjunto de trinta e cinco satélites, dos quais cinco são geoestacionários dando maior cobertura à China e os restantes trinta proporcionarão abrangência global de sinal.

O plano de implementação do COMPASS prevê a cobertura de toda a China e regiões adjacentes até 2010 e cobertura global até 2020 [44]. Contudo, o lançamento de satélites para este sistema de

navegação global tem-se retardado. No Quadro 2.8 é feito um resumo das principais características de três dos quatro sistemas de navegação global por satélite apresentados.

Quadro 2.8 – Principais características dos vários sistemas de navegação global por satélite. Adaptado de: [45].

	GPS	GLONASS	GALILEO
Início do desenvolvimento	1973	1972	2001
Lançamento do 1º satélite	27/06/1977	12/10/1982	28/12/2005
Número de satélites	28	24	30
Planos orbitais	6	3	3
Inclinação	55º	64.8º	56º
Altura da órbita	20233km	19100km	23222km
Período	11h 58 min	11h 15 min	≈14h
Sistema de Referência	WGS84	SGS85	GTRF
Sistema de Tempo	Tempo GPS	Tempo GLONASS	Tempo GALILEO (GST)
Correcção do Tempo	UTC (USNO)	UTC (SU)	GGTO
Características do Sinal	Identificação por código	Identificação por frequência	Identificação por código
Frequências	L1, L2, (L5)	L1, L2, (L5)	E5A, E5B, E6, L1
Códigos	Diferente para cada satélite	Idêntico para cada satélite	Diferente para cada satélite
Influências artificiais no sistema	S/A (até 05/2001); AS	Nenhuma	Sinais PRS serão restritos.

Todos estes sistemas GNSS permitem que o posicionamento se faça de forma autónoma sendo ao mesmo tempo inter-operáveis, garantindo desta forma, através da visibilidade de um maior número de satélites em cada ponto, uma maior cobertura global. Assim, a existência de observações redundantes, isto é, observações em número superior ao número mínimo necessário para a resolução do problema, torna possível o emprego de técnicas estatísticas adequadas à estimativa dos valores mais prováveis para as incógnitas a determinar.

Naturalmente, os GNSS estão em constante manutenção e melhoramento dado o período de vida relativamente curto de cada um dos satélites que compõem os vários sistemas.

Com o lançamento do primeiro satélite da série IIR-M (satélite IIR-M14), ocorrido em 2005, iniciou-se uma nova era na utilização, para fins civis, do sistema GPS. Este satélite foi o primeiro a

transmitir, em L2, um segundo código civil (código L2C), em conjunto com um código militar modernizado (código M) [10].

Recentemente, a empresa Boeing anunciou ter recebido os primeiros sinais em órbita do satélite GPS IIF-1, lançado no passado dia 27 de Maio. Este será o primeiro satélite GPS de uma nova geração de satélites que fornecerão sinais de navegação mais precisos, em relação aos seus antecessores, principalmente graças ao melhoramento da tecnologia aplicada aos relógios atómicos em uso nos novos satélites. Os primeiros sinais enviados pelo GPS IIF-1 mostram que o satélite está em bom funcionamento e pronto para iniciar os testes operacionais. Para além dos códigos actuais, os satélites da série IIF irão emitir na frequência L5 ($f_{L5} = 115 \times f_0 = 1176.45$ MHz) um sinal mais robusto, que proporcionará também a sua aplicação a serviços de busca e salvamento. A bordo deste novo satélite, inclui-se também um processador reprogramável que permitirá continuar a desenvolver a tecnologia actualmente empregue [46].

Encontra-se actualmente em desenvolvimento uma nova geração de satélites (a geração III) e a modernização do segmento de controlo. Os satélites desta terceira geração irão emitir em L1, para além dos códigos já actualmente emitidos nesta frequência, um novo código civil, o código L1C. Este código será compatível com os códigos de acesso livre de outros sistemas de posicionamento global. Assim, o código L1C estará disponível após o lançamento do primeiro satélite da terceira geração de satélites GPS, previsto para 2014 [47].

A China acaba também de lançar o quarto satélite do seu próprio sistema global de posicionamento e navegação por satélite – Compass. O satélite, geoestacionário, faz parte da constelação de 35 equipamentos que, de acordo com o plano chinês, em 2012 irá fornecer serviços de posicionamento, navegação e tempo em toda a região da Ásia e Pacífico atingindo o alcance global em 2020 [48].

A existência de vários GNSS gerou esforços no sentido de se desenvolverem receptores capazes de rastrear os vários sistemas de navegação disponíveis. Assim, a interoperabilidade dos vários GNSS deixa prever um aumento da precisão do sistema e, consequentemente, da utilidade dos sistemas de navegação global.

3
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO GNSS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo é feita a caracterização do equipamento utilizado na realização dos ensaios levados a cabo e do *software* usado no tratamento dos dados obtidos. O presente conjunto de ensaios teve por objectivo caracterizar o comportamento do equipamento GNSS utilizado. Começa-se por definir o referencial utilizado para definir a posição relativa das antenas GNSS utilizadas. O posicionamento da estação móvel, aqui definida por estação 2 (EST2) foi definido segundo um referencial local, com origem na antena da estação 1 (EST1) e com os seus eixos coincidentes com as direcções geográficas Norte-Sul (NS), Este-Oeste (EW) e direcção vertical, respectivamente. O sentido positivo dos eixos do referencial é definido de Sul para Norte, de Oeste para Este e de baixo para cima, como ilustrado na Figura 3.1.

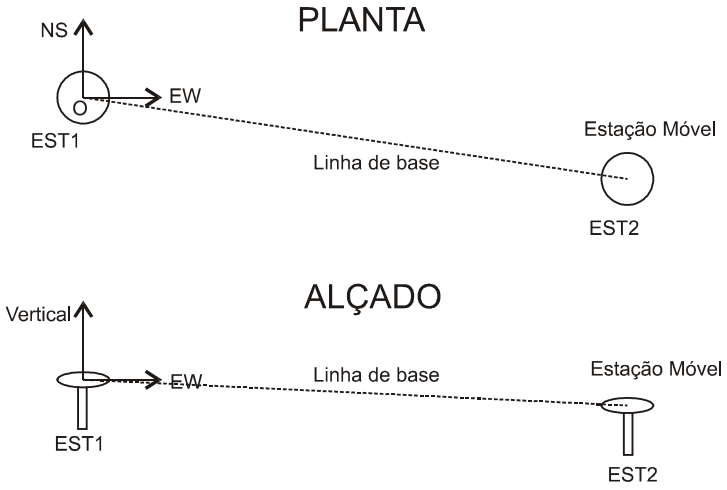


Figura 3.1 – Esquematização do referencial local utilizado.

Este referencial cartesiano local, com origem num ponto P_0 de coordenadas geodésicas elipsoidais $(\phi_0, \lambda_0, h_0 - \text{as coordenadas da EST1})$, foi obtido em relação ao referencial rectangular utilizado pelo GPS (WGS84). Para determinar as coordenadas do referencial local, processaram-se os ficheiros RINEX relativos à EST1.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO E DO *SOFTWARE* UTILIZADO

Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas estações de recepção de dados GNSS. Uma delas, designada por EST1, é definida como a estação de referência, posicionada num ponto fixo de coordenadas assumidamente conhecidas[1] enquanto a outra, EST2, é a estação móvel, que poderá ser deslocada ou permanecer fixa no espaço.

Cada uma das duas estações de recepção de dados, EST1 e EST2, são caracterizadas pelo seguinte equipamento:

- Antena geodésica compacta GNSS Leica AX1202 GG (Figura 3.2);
- Receptor de alta precisão com dupla frequência (GPS + GLONASS) Leica GMX902 GG (Figura 3.3 (a));
- Conversor RS-232/*Ethernet* Moxa NPort 5100A Series (Figura 3.3 (b));
- Cabos de alimentação/comunicação de dados.

Para efectuar a ligação entre os cabos de rede das duas estações e o computador portátil foi utilizado um *switch*.



Figura 3.2 - Antena geodésica compacta GNSS Leica AX1202 GG.

[1] As coordenas da estação de referência, EST1, foram determinadas usando dados relativos a ficheiros RINEX de dois ou três dias, com durações de observação de 30 minutos por cada ficheiro tratado.



(a) (b)

Figura 3.3 – Receptor Leica GMX902 GG (a) e conversor Moxa NPort 5100A Series (b).

As estações, após serem ligadas entre si pelo *switch*, são ligadas a um cabo *ethernet* que as conecta por protocolo TCP/IP (ligação de rede) a um computador que armazena a informação recebida, permitindo o posterior tratamento dos dados. Na Figura 3.4 é esquematizada a arquitectura do sistema.

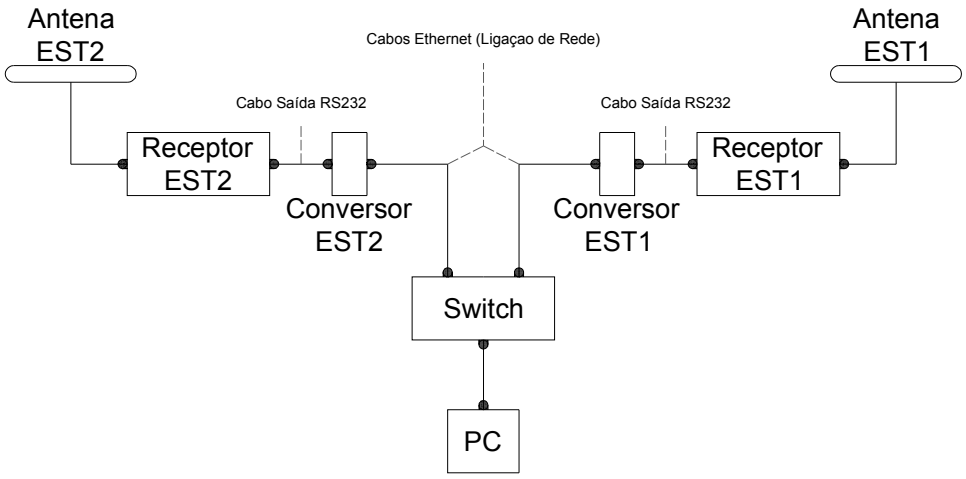


Figura 3.4 – Arquitectura do sistema instalado.

Em alguns dos ensaios realizados, nomeadamente nos ensaios cinemáticos, tornou-se necessário estabelecer uma referência para permitir comparar os deslocamentos registados pelo sistema GNSS. Deste modo, foram também empregues instrumentos de medição independentes, considerados como referência do deslocamento realmente imposto. Os transdutores de deslocamento utilizados foram os designados LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

O princípio de funcionamento deste tipo de transdutores consiste no fornecimento de um sinal eléctrico de intensidade variável em função do valor da grandeza medida. Desta forma, o equipamento é electricamente alimentado e ligado a um equipamento de aquisição de dados (*DataTaker*) que posteriormente permite a descarga dos dados obtidos, utilizando para tal um computador. Assim, o transdutor de deslocamentos fornece como parâmetro de saída um determinado valor de intensidade de corrente eléctrica, em mA, que varia em função do deslocamento medido. A intensidade de corrente de saída será tanto maior quanto maior for o deslocamento medido e vice-versa. Este princípio baseia-se

na existência de três enrolamentos (um principal e dois secundários) e um núcleo central. O enrolamento primário ao ser percorrido por uma corrente alternada cria um campo magnético que excita o núcleo central. Os enrolamentos secundários possuem tensão induzida por parelha de fluxo com o enrolamento primário. Normalmente estes enrolamentos encontram-se ligados em série e em oposição de forma a produzir tensões desfasadas em cada um deles. Assim, quando o núcleo está na posição centrada em relação aos enrolamentos, a tensão induzida em cada um dos enrolamentos secundários é a mesma. Contudo, assim que o núcleo se desloca (com o movimento que o transdutor está a medir), a tensão induzida nos enrolamentos aumenta num deles e diminui no outro.

O sinal de saída do LVDT é então condicionado de modo a situar-se numa gama de 4 a 20 mA, de tal modo que a relação entre deslocamento e intensidade de corrente de saída seja linear para um determinado domínio de deslocamentos [49]. O tratamento dos resultados obtidos fez-se recorrendo à calibração da constante de proporcionalidade que define a relação linear entre intensidade de corrente e deslocamento medido. Este tema não será aprofundado por se encontrar bastante tratado na bibliografia da especialidade e por se considerar não ser do âmbito da presente dissertação.

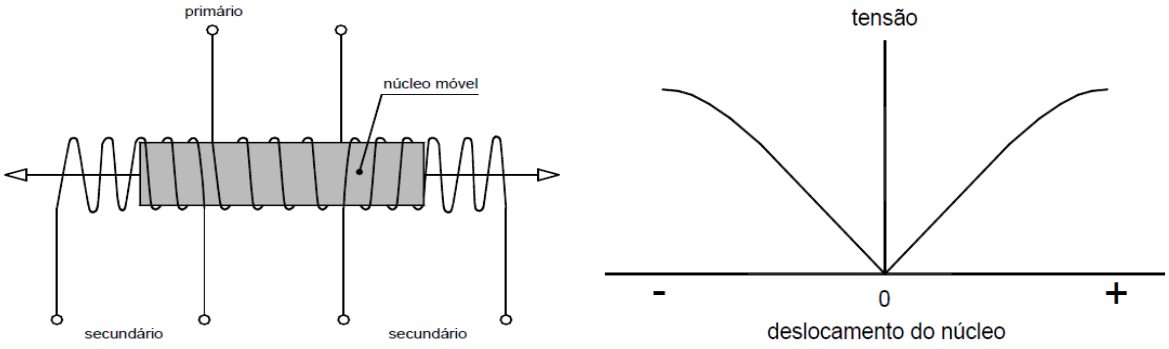


Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um LVDT: estrutura básica (a) e amplitude da tensão de saída (b). Adaptado de: [49].

Nos ensaios cinemáticos em ambiente controlado, adiante apresentados, foi utilizado um transdutor de deslocamentos da *UniMeasure*, modelo *HX-P420*. Na aplicação do sistema GNSS à medição do deslocamento da junta de dilatação de um viaduto, abordada no Capítulo 6, o transdutor que registou o deslocamento de referência foi o LVDT modelo DCTH2000C/371A da RDP. Estes transdutores são ilustrados na Figura 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.6 – Transdutor de deslocamentos: (a) *UniMeasure* HX-P420 e (b) RDP DCTH2000C/371A.

Alguns dados provenientes do sistema GNSS utilizado foram tratados no software desenvolvido pelo fabricante dos equipamentos de recepção, a Leica Geosystems. Este *software*, Leica GNSS Spider e Leica GNSS Quality Control, a par do conjunto de equipamentos cedidos por empréstimo ao LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foi incluído no empréstimo, tendo sido disponibilizada uma licença de utilização em versão de demonstração.

Dada a falta de informação no que respeita às técnicas que o software fornecido aplica no tratamento de dados, foi utilizado um *script* capaz de efectuar a leitura e o tratamento de dados contidos em ficheiros no formato NMEA (National Marine Electronics Association). O formato NMEA representa um conjunto de especificações de dados para comunicação de dispositivos electrónicos de navegação. Este tipo de ficheiros contém informação sobre a posição, velocidade e hora que foram determinadas pelo receptor GNSS utilizado.

Dada a elevada frequência de aquisição que o sistema GNSS estudado permite definir, permitindo uma frequência máxima de aquisição de dados de 20 Hz, foi necessário utilizar um *software* robusto e com elevada capacidade no processamento do grande volume de dados. Desta forma, foi utilizado o software *MATLAB* versão R2009b da *Mathworks*.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos de recepção de sinal GNSS foram instalados na cobertura do edifico H da FEUP. As antenas, apoiadas numa base metálica suportada por prismas de betão, localizaram-se sobre uma pequena cobertura de resguardo de máquinas de ar condicionado e de tubos de ventilação. Dada a orientação do edifício, as antenas ficaram quase alinhadas com a direcção geográfica Este-Oeste (EW). Na Figura 3.7 esquematiza-se o posicionamento das antenas da EST1 e da EST2.

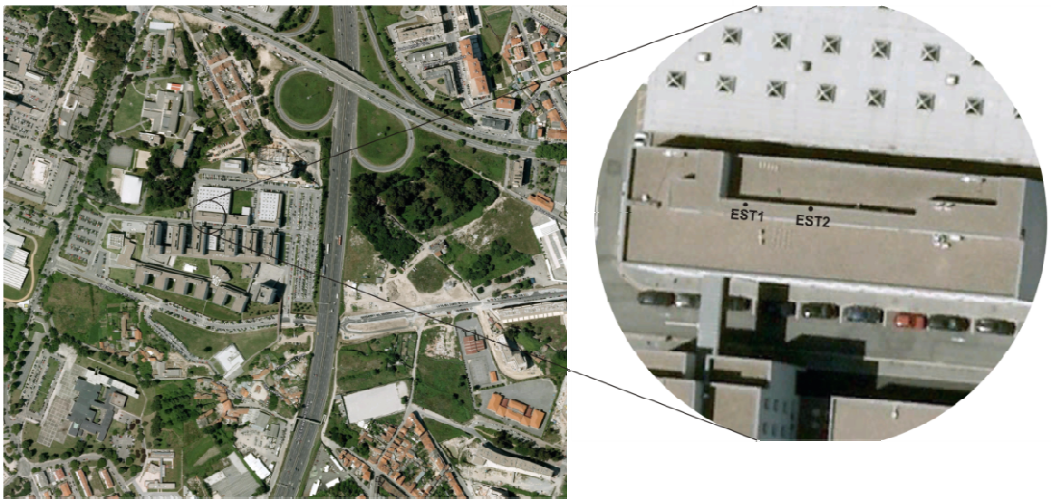


Figura 3.7 - Ilustração do posicionamento das antenas das estações na cobertura do edifício H da FEUP. Adaptado de: [50].

3.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

Inicialmente, com o objectivo de compreender melhor o funcionamento dos equipamentos de posicionamento global utilizados, as estações permaneceram estáticas, durante alguns dias, sobre a cobertura do edifício H nos locais esquematizados na Figura 3.7. Durante esse período, o sistema ficou ligado a um computador portátil (ver Figura 3.8) que procedia ao armazenamento dos dados recebidos. Este conjunto de observações foi designado por ensaios estáticos.

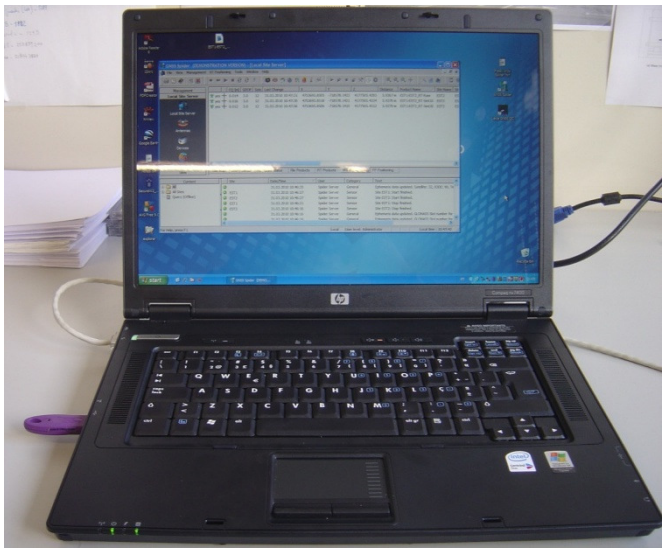


Figura 3.8 – Unidade de armazenamento e processamento dos dados recebidos.

Com os dados recolhidos, foi possível definir com bastante rigor as coordenadas da estação de referência, EST1, através do processamento de ficheiros em formato RINEX fornecidos pelo *software* Leica GNSS Spider.

Posteriormente, foi feita uma análise comparativa entre os resultados apresentados pelo *software Leica GNSS Quality Control* e o *script MATLAB* utilizado. Esta análise comparativa foi feita com o objectivo de simular, com o *script MATLAB,* os resultados obtidos com o *software Leica GNSS Spider/Quality Control*. O *software Leica GNSS Spider* fornece ao utilizador ficheiros de observações em vários tipos de formato, nomeadamente ficheiros RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), ficheiros RAW, que fornecem as observações em bruto sem aplicação de nenhum tipo de filtros ou suavização e ficheiros com relatórios dos testes de controlo de qualidade efectuados às observações. Assim, dispondo dos ficheiros de observações em bruto (ficheiros RAW), foram-lhes aplicados filtros de médias móveis simples centradas de dimensão variável.

O conceito do filtro de médias móveis simples consiste na procura da tendência de comportamento das observações efectuadas, diminuindo a respectiva dispersão (o ruído) referida a um determinado período temporal. Assim, para cada intervalo de tempo, definido pela dimensão do filtro, será calculado o respectivo valor médio aritmético, já que os pesos atribuídos a cada observação foram os mesmos. A tendência de comportamento assim definida poderá reflectir o comportamento local das observações, no caso da aplicação de um filtro de pequenas dimensões, ou reflectir o comportamento global da amostra analisada no caso de aplicação de filtros de maior dimensão.

Na Figura 3.9 é apresentada a interface do *software Leica GNSS Qualiy Control*, para a representação gráfica da variação temporal da distância ente as estações projectada na direcção EW, considerando as observações em bruto (a azul), a média móvel de 10 segundos (a amarelo) e a média móvel de trinta segundos (a vermelho). Calcular uma média móvel de 10 segundos, para uma frequência de aquisição de 20 Hz, corresponde a calcular a média de um conjunto de 200 observações. As observações foram efectuadas no período de uma hora (sensivelmente desde as 16h04 até às 17h04) do dia 19 de Março de 2010.

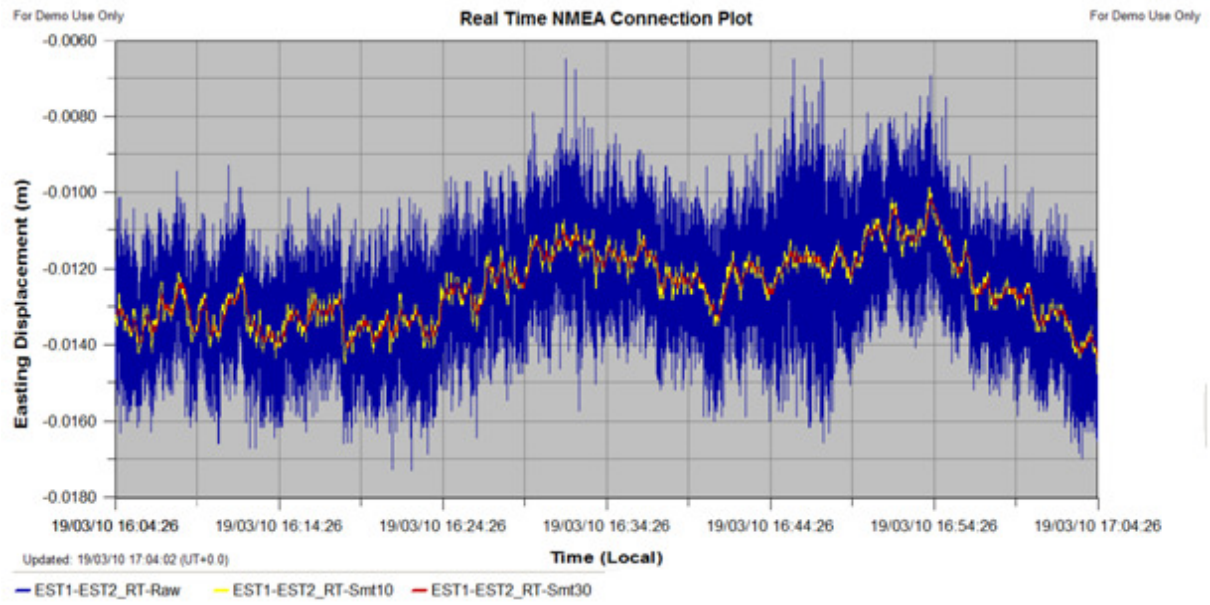


Figura 3.9 – Variação temporal da distância entre as estações processada pelo *software Leica GNSS Quality Control*.

Observando a Figura 3.9 verifica-se que a dispersão do resultado é bastante reduzida com a aplicação deste tipo de filtro. Naturalmente, a suavização da curva será tanto maior quanto maior for a dimensão do filtro, como se comprova pela menor dispersão da curva a vermelho (média móvel de 30 segundos) em relação à curva a amarelo (média móvel de 10 segundos). Contudo, verifica-se que quanto maior

for a dimensão do filtro aplicado maior será a dificuldade de resposta da curva a movimentos súbitos, já que a quantidade de pontos distantes da "perturbação", utilizados no cálculo do valor médio, será também maior.

O *script MATLAB* utilizado, para além do tratamento dos dados em bruto (RAW) colhidos pelos receptores GPS/GLONASS, possibilita o tratamento desses dados com a aplicação de filtros de médias móveis de dimensão definida pelo utilizador, bem como a análise estatística dos valores obtidos. A representação gráfica das séries temporais é também um *output* com particular utilidade. Na Figura 3.10 é apresentada a representação gráfica correspondente aos dados em bruto recolhidos pelas estações (semelhante à Figura 3.9, mas desta vez utilizando o *script MATLAB* desenvolvido), onde o eixo das abcissas representa o tempo, em minutos.

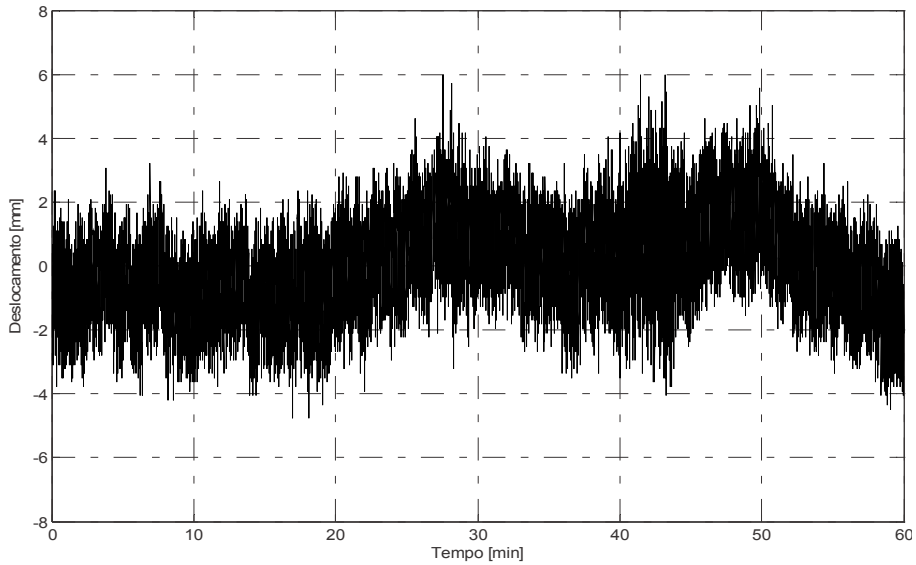


Figura 3.10 - Variação temporal da distância entre as estações das observações em bruto utilizando o *script MATLAB* desenvolvido.

Na Figura 3.11 apresenta-se a reprodução total da Figura 3.9 realizada com o *script* desenvolvido. Analisando as figuras com algum detalhe, verifica-se que os comportamentos são em tudo semelhantes, sendo a amplitude entre o valor máximo e mínimo observados definida em 11mm em ambas as figuras.

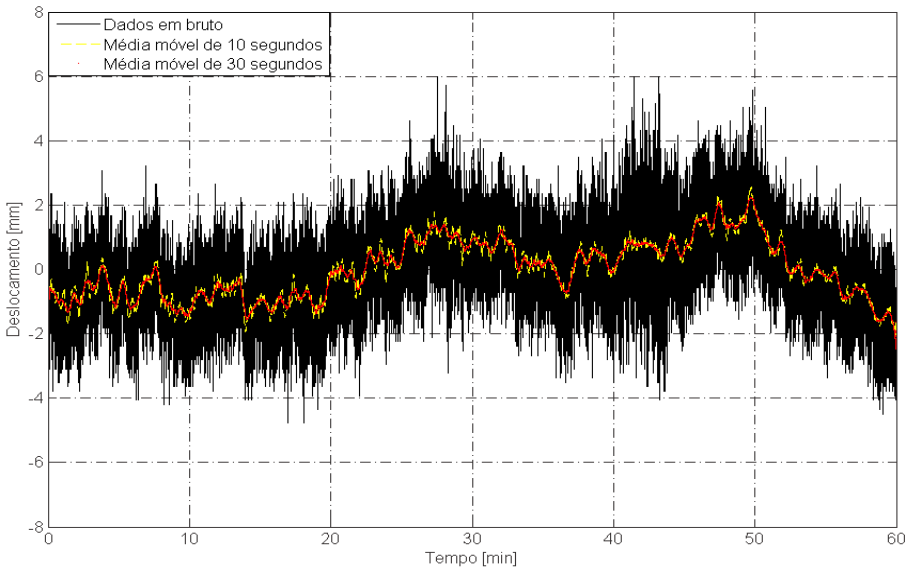
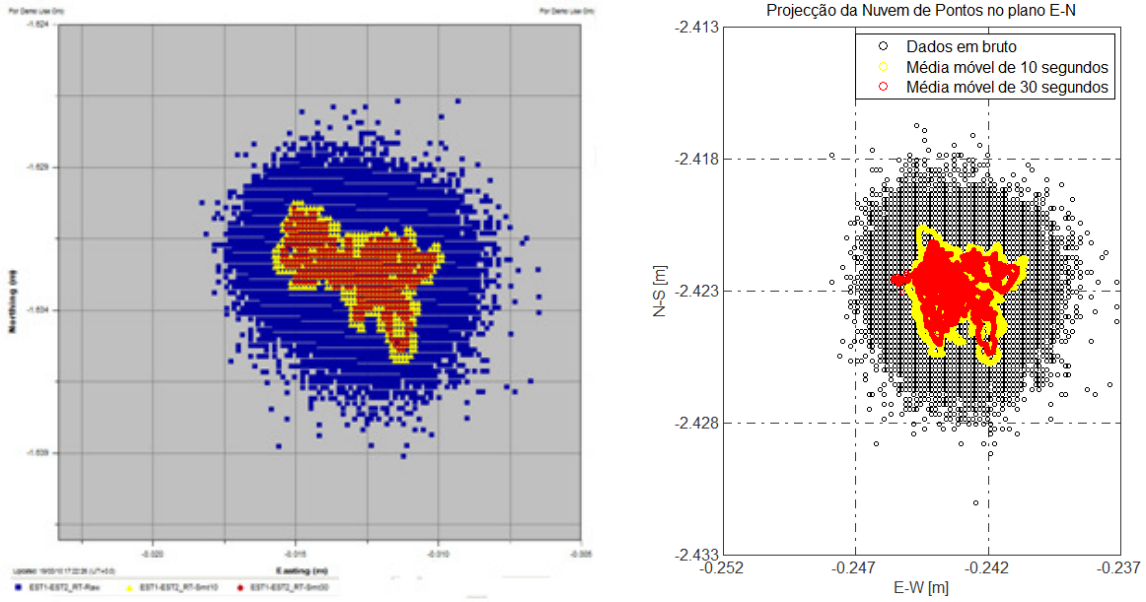


Figura 3.11 - Variação temporal da distância entre as estações das observações em bruto e com aplicação de filtros de médias móveis de 10 e 30 segundos utilizando o script desenvolvido.

Para que a dispersão das coordenadas se torne mais perceptível, é útil fazer a representação temporal da nuvem de pontos que resultam das observações efectuadas. Como se verifica na Figura 3.12, a dispersão no plano horizontal das observações em bruto é semelhante nas duas orientações geográficas (Norte-Sul e Este-Oeste), dado que a nuvem definida tem aproximadamente a forma de um círculo.



(a) (b)

Figura 3.12 – Representação gráfica da nuvem das coordenadas horizontais utilizando: (a) *software Leica GNSS Quality Control*; (b) *script MATLAB*.

Na Figura 3.12 (b) é apresentada a nuvem de pontos realizada em *MATLAB* equivalente à representada na Figura 3.12 (a). Enquanto nas observações em bruto os resultados dados pelos dois *softwares* são muito semelhantes, na representação das observações filtradas por médias móveis os resultados são ligeiramente diferentes. Esta diferença pode dever-se ao facto do *software Leica GNSS Spider* aplicar

o filtro de médias móveis directamente nas observações enquanto *o script MATLAB* aplica as médias móveis após o processamento dos dados. Uma outra hipótese, com alguma credibilidade, é a possibilidade do *software Leica GNSS Spider* utilizar uma média móvel pesada, com pesos maiores para as observações mais próximas do instante cujo valor filtrado se pretende determinar e pesos menores para as observações mais "afastadas" desse instante, enquanto no *script MATLAB* foi utilizada uma média móvel simples, atribuindo igual peso a todas as observações. Além disso, enquanto na Figura 3.12 (a) as séries filtradas (a amarelo e a vermelho) assumem uma forma mais próxima de uma elipse, apesar dos dados em bruto que lhe deram origem serem representados numa forma circular pouco distorcida, na Figura 3.12 (b) a forma das mesmas séries é concordante com a forma dos dados em bruto. Esta constatação poderá ser motivada pela aplicação de diferentes pesos no cálculo das médias móveis para cada uma das direcções geográficas. Contudo, para o caso dos dados em bruto, a representação é bastante semelhante, sendo esta constatação uma validação do correcto funcionamento do *script* utilizado.

Fazendo um estudo idêntico para a variação da componente vertical, verifica-se que a amplitude entre os valores máximo e mínimo é bastante maior quando comparada com a amplitude das componentes horizontais anteriormente apresentadas, situando-se neste caso em 28mm, tal como ilustrado na Figura 3.13.

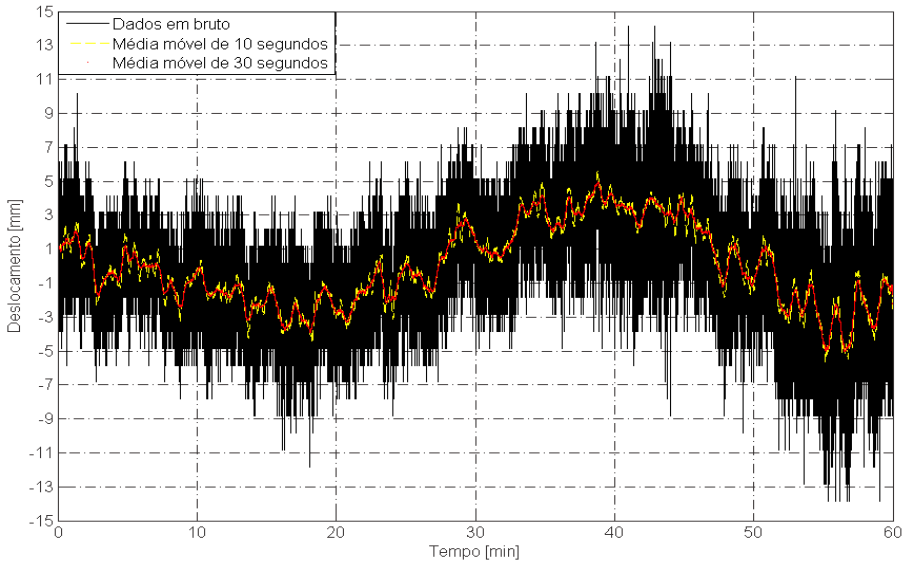
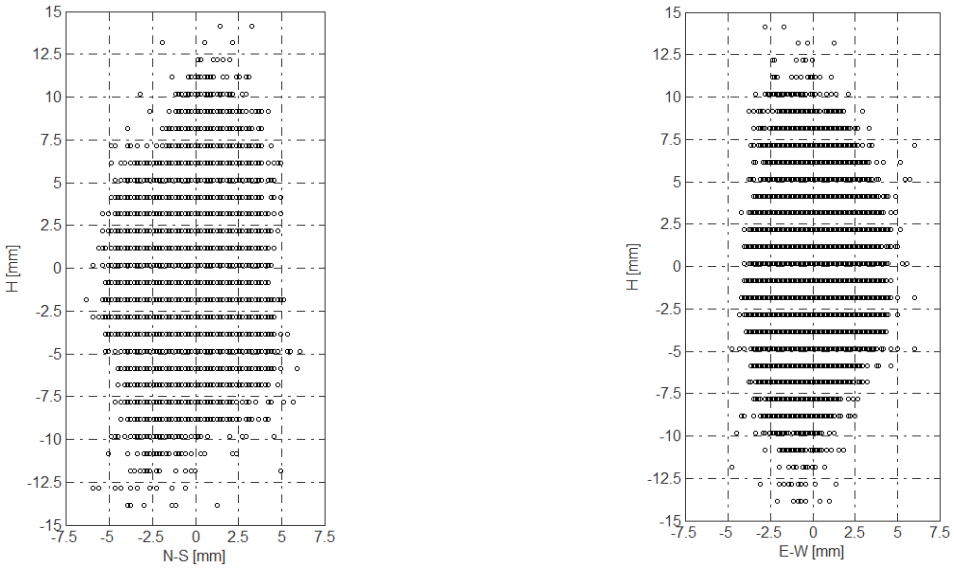


Figura 3.13 - Variação temporal do desnível entre as estações para observações em bruto e com aplicação de filtros de médias móveis de 10 e 30 segundos utilizando o *script* desenvolvido.

Representando novamente as projecções da nuvem de pontos referentes às coordenadas da linha de base projectada nos três planos espaciais, nomeadamente no plano horizontal e nos dois planos verticais definidos pelos eixos do referencial local adoptado, constata-se que a amplitude de variação das coordenadas pertencentes ao plano horizontal é semelhante, sendo no caso representado a amplitude da direcção NS ligeiramente superior à da direcção EW. Já na componente vertical das coordenadas, a amplitude da variação revela-se duas a três vezes superior à respectiva amplitude nas direcções NS e EW. Esta análise torna-se mais clara com a visualização dos gráficos da Figura 3.14.



(a) (b)

Figura 3.14 – Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano H-EW (a) e no plano H-NS (b).

Definindo-se resíduo como a diferença entre o valor da observação em bruto e o respectivo valor da média móvel, da Figura 3.15 à Figura 3.17 são apresentados os resíduos das observações nas direcções NS, EW e vertical, respectivamente.

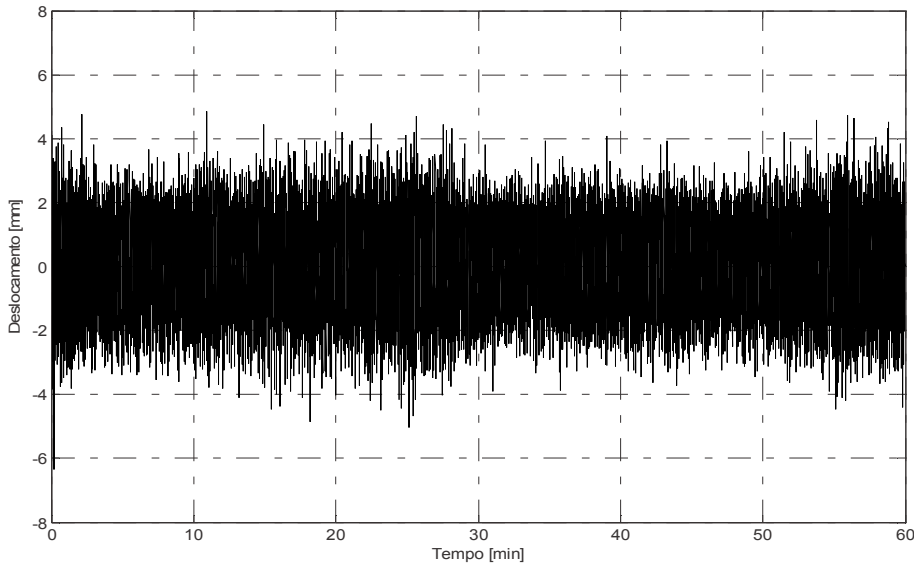


Figura 3.15 - Resíduos da linha de base projectada na direcção NS em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos.

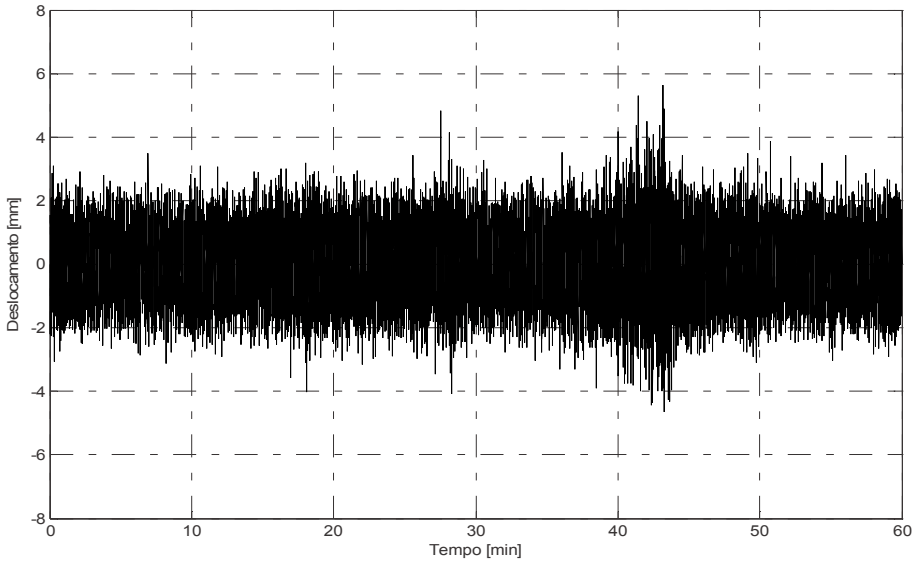


Figura 3.16 - Resíduos da linha de base projectada na direcção EW em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos.

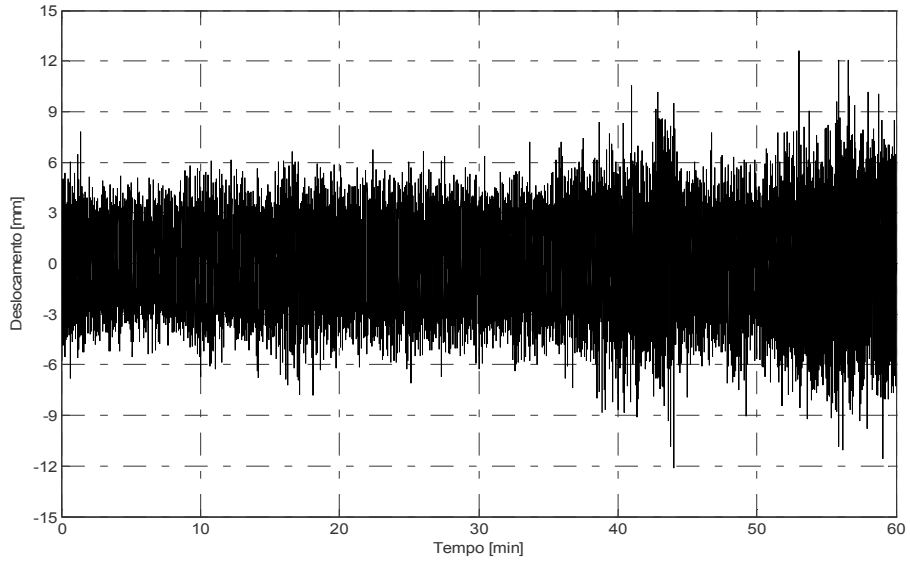


Figura 3.17 - Resíduos da linha de base projectada na direcção vertical em relação à média móvel de dimensão igual a 10 segundos.

Para avaliar o grau de dispersão dos dados recolhidos, em relação ao seu valor médio, adoptou-se o cálculo dos valores do desvio-padrão dos dados em bruto, das médias móveis de dimensão igual a 10 e a 30 segundos e dos correspondentes resíduos, presentes no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Desvios-padrão das séries registadas nas direcções NS e EW e vertical.

	Desvio padrão da amostra [mm]				
	Dados em bruto	Filtro de 10 segundos		Filtro de 30 segundos	
		Média Móvel	Resíduos da Média Móvel	Média Móvel	Resíduos da Média Móvel
NS	1.4	0.9	1.1	0.8	1.1
EW	1.3	0.9	0.9	0.9	0.9
Vertical	3.2	2.4	2.1	2.3	2.1

Analisando o Quadro 3.1, conclui-se que o desvio-padrão associado às observações apresentadas diminui significativamente com a aplicação do filtro de médias móveis simples, tal como esperado. Na Figura 3.18 apresentam-se os valores da redução do desvio-padrão conseguida através da aplicação de filtros de médias móveis para as orientações NS, EW e para a direcção vertical.

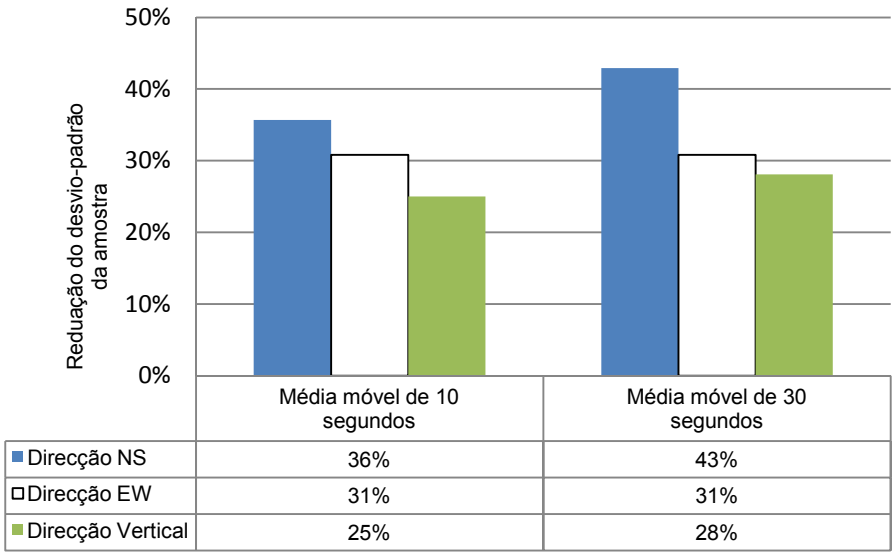


Figura 3.18 – Redução do desvio-padrão pela aplicação de filtros de médias móveis aos dados em bruto.

Comparando os valores apresentados na Figura 3.18, conclui-se que a aplicação da média móvel de 30 segundos não resultou numa maior redução do desvio-padrão da amostra de coordenadas da direcção EW. Dada a elevada dispersão das observações registadas na direcção vertical, substancialmente superior à dispersão obtida na direcção NS, o ganho na redução do desvio-padrão, pela aplicação da média móvel de 30 segundos, torna-se menor nas coordenadas pertencentes ao plano vertical do que nas coordenadas contidas plano horizontal, tal como esperado. Conclui-se assim que a aplicação do filtro de média móvel de dimensão superior não resultou num ganho significativo na redução do desvio-padrão da amostra analisada. Naturalmente, à medida que se aumenta a dimensão da média móvel aplicada consegue-se diminuir o valor do respectivo desvio-padrão resultando, contudo, uma maior amplitude associada aos resíduos da amostra. Face ao potencial prejuízo vindo da aplicação de filtros de grande extensão, no que respeita à capacidade de resposta a oscilações de elevada frequência, aliada ao facto de não se conseguir um ganho substancial na qualidade das coordenadas obtidas, optou-se pela aplicação de filtros de pequena extensão na análise dos restantes ensaios realizados. De

acordo com os dados apresentados neste subcapítulo, verifica-se que a aplicação de filtros de média móvel permite a obtenção de resultados mais precisos. No caso apresentado, a amplitude de variação dos deslocamentos, representados na Figura 3.13, passou de 28mm, para os dados em bruto, para cerca de 11mm, aplicando o filtro de média móvel de 30 segundos. Verifica-se também que a precisão dos resultados é pior na direcção vertical do que na horizontal.

3.5. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS CINEMÁTICOS

Depois de estudar o comportamento do equipamento GNSS enquanto as antenas das estações permaneceram imóveis ao longo do tempo, o passo seguinte foi analisar a resposta dos equipamentos à presença de movimento, com a realização de ensaios de carácter cinemático. Com este objectivo, foi desenvolvida uma plataforma que permitiu o deslocamento da antena da estação móvel (EST2) apenas numa determinada direcção, definida pelo experimentador, numa amplitude máxima de 400mm enquanto a antena da estação de referência (EST1) continuou fixa na posição inicial. Dado que os deslocamentos impostos à antena da estação móvel foram aplicados manualmente, tornou-se necessário determinar com o máximo rigor possível a grandeza dos deslocamentos aplicados ao longo do tempo. Para tal, foi utilizado um LVDT que permitiu, em conjunto com um equipamento de aquisição de dados (*DataTaker* DT800), fazer a aquisição e o armazenamento de dados a uma frequência de 20 Hz, igualando a frequência de aquisição definida para o equipamento GNSS. Desta forma, foi posteriormente possível fazer a comparação entre a série temporal de dados registada pelo LVDT e a série obtida pelo equipamento GNSS. Na Figura 3.19 esquematiza-se o procedimento do ensaio e a disposição dos equipamentos de medição e na Figura 3.20 apresenta-se a plataforma de ensaio, bem como os equipamentos montados e prontos a iniciar os ensaios.

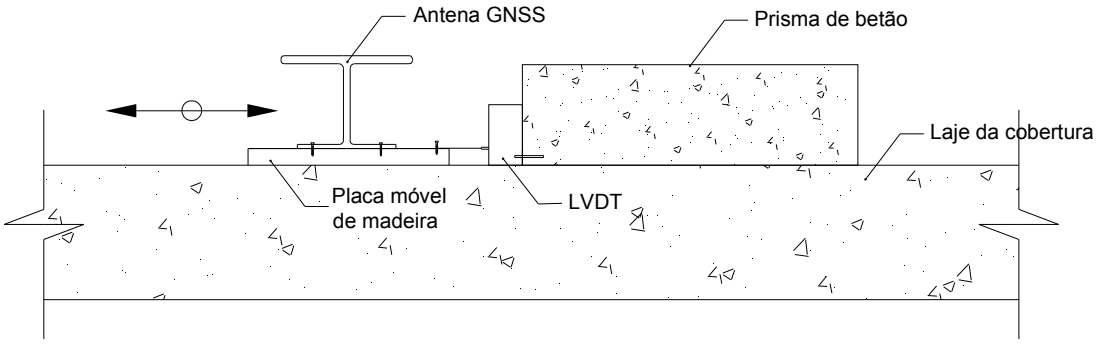


Figura 3.19 – Disposição dos equipamentos de medição nos ensaios dinâmicos.

Os ensaios cinemáticos foram divididos em três grupos, nomeadamente ensaios com aplicação de deslocamentos em patamar, ensaios com aplicação de deslocamentos de forma contínua ao longo do tempo e ensaios de movimentação harmónica. O primeiro grupo de ensaios foi efectuado com o intuito de avaliar a capacidade de resposta do sistema GNSS à mudança sucessiva e repetida entre o estado estático (patamares) e o estado cinemático (intervalos de aplicação dos deslocamentos). Os ensaios do segundo e terceiro grupos pretenderam avaliar a resposta do sistema à aplicação de deslocamentos de forma relativamente rápida e o dinamismo de resposta dos equipamentos quando solicitados por movimentos harmónicos de menor período.



Figura 3.20 – Plataforma de madeira utilizada nos ensaios cinemáticos e disposição dos equipamentos após montagem.

Seguidamente faz-se uma descrição sucinta dos ensaios realizados. Cada par de ensaios compreendeu os seguintes passos: a antena da estação de referência (EST1) foi mantida fixa sobre o respectivo prisma de betão enquanto a antena da estação móvel (EST2) foi sofrendo deslocamentos bem caracterizados no tempo. Esta caracterização foi feita pela representação da série temporal das posições registadas pelo LVDT. Os ensaios consistiram em movimentar a antena da EST2 sobre a cobertura, de forma controlada, aplicando deslocamentos de amplitude aproximadamente igual a 50mm, intercalados com patamares de paragem de cerca de 30s, ou aplicando um deslocamento contínuo de amplitude máxima de 400mm. Refira-se que o transdutor de deslocamento LVDT, usado como referência, tem um campo de medida que pouco excede os 400mm. Desta forma, os deslocamentos sofridos pelo conjunto placa móvel/antena GNSS aplicaram-se desde a posição inicial da antena até um máximo de 400mm, regressando posteriormente o conjunto, de igual forma, à posição inicial. Na Figura 3.21 apresenta-se a orientação da antena móvel durante os referidos ensaios, realizados em duas direcções ortogonais entre si e aproximadamente coincidentes com as orientações geográficas NS e EW. Na Figura 3.22 ilustra-se a movimentação da antena móvel durante a realização de um ensaio.



(a) (b)

Figura 3.21 – Orientação da antena móvel nos ensaios realizados: direcção EW (a) e direcção NS (b).

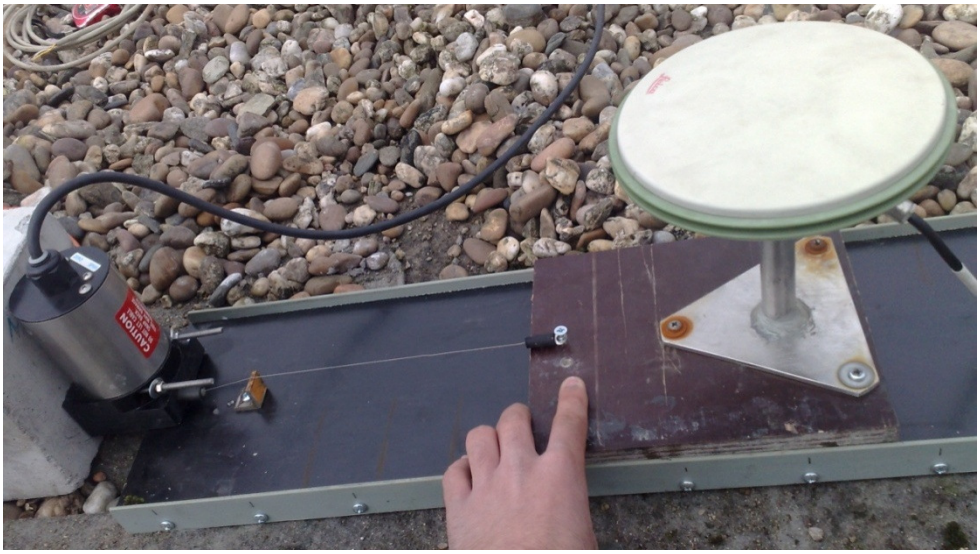


Figura 3.22 – Ilustração do deslocamento da antena móvel durante os ensaios cinemáticos realizados.

3.5.1. Ensaios por patamares de deslocamento

O conjunto de deslocamentos aplicados à antena móvel pode ser representado num gráfico cujo eixo das abcissas representa o tempo e o eixo das ordenadas representa o deslocamento instantâneo ao qual a antena foi submetida. Desta forma, pode-se fazer uma análise comparativa entre os deslocamentos medidos pelo transdutor de referência, o LVDT, e os deslocamentos avaliados pelo sistema GNSS. Na Figura 3.23 apresenta-se a comparação temporal das séries de deslocamentos registados pelos dois sistemas de medição utilizados nos ensaios. Analisando a figura, verifica-se que ambas as séries

apresentam comportamento semelhante, tal como esperado. No patamar dos 350mm é notória a dissonância de medições realizadas pelos sistemas. Um dos factos realçados na Figura 3.24, onde se representam os resíduos correspondentes à diferença entre a série de deslocamentos registados pelo sistema GNSS e pelo transdutor de referência, é a existência de picos de resíduos localizados nas zonas de transição entre os patamares (período estático) e a aplicação de um novo deslocamento à antena. Em certos casos, esses picos chegam a atingir cerca de 15mm. Contudo, analisando cuidadosamente a Figura 3.24, verifica-se que o respectivo sinal dos picos de resíduos é sempre positivo sugerindo uma resposta às variações súbitas, entre o estado de repouso e o estado em que a antena se encontra animada por movimento, mais rápida por parte do sistema GNSS do que a resposta do transdutor de referência. Este facto deve-se não só à inevitável dessincronização entre as séries registadas por cada um dos dois sistemas de medição utilizados na realização dos ensaios mas também ao facto de, esporadicamente, existirem "buracos" nas observações GNSS causados pela perda de recepção de sinal. Para minimizar o efeito do problema, no caso de não haver coincidência temporal do conjunto de observações discretas efectuadas por cada um dos sistemas de aquisição (GNSS e *DataTaker*), optou-se pela interpolação linear dos dados GNSS entre os valores das duas observações mais próximas do instante considerado. Pelo exposto, os picos de erro registados na Figura 3.24 não constituem uma realidade reflectindo apenas uma consequência de carácter local quer da, ainda que pequena, dessincronização de sistemas de aquisição, quer da existência de hiatos de observação por parte do sistema GNSS.

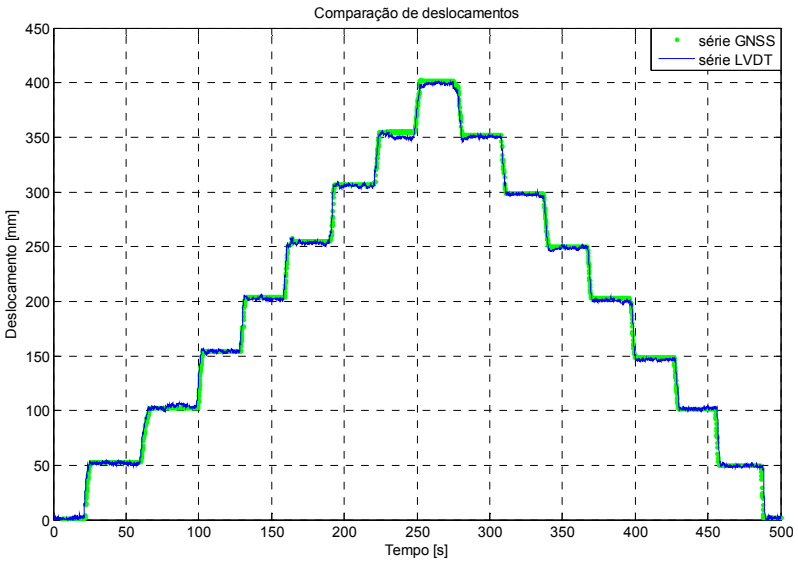


Figura 3.23 - Ensaios cinemáticos por patamares de deslocamentos na direcção NS.

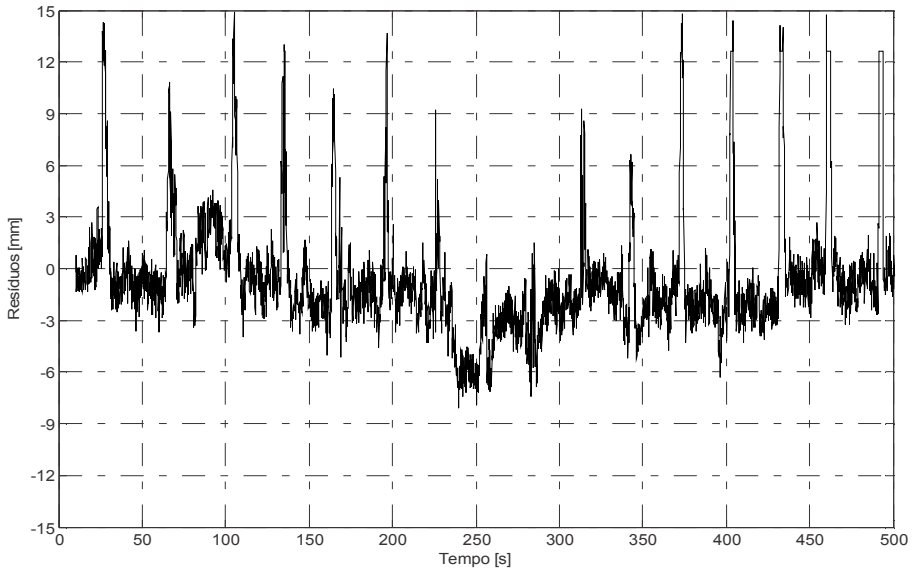


Figura 3.24 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para a aplicação de deslocamentos em patamares.

Analisando da mesma forma os ensaios realizados na direcção EW, as conclusões retiradas da Figura 3.25 e da Figura 3.26 são semelhantes às anteriormente formuladas. De igual forma, tal como expectável, a amplitude dos resíduos na zona de patamares (uma vez que os picos registados nas zonas de transição de estado não reflectem da melhor forma a realidade) é semelhante em ambas as direcções do plano horizontal, nomeadamente as direcções NS e EW, não ultrapassando significativamente o patamar dos 5mm.

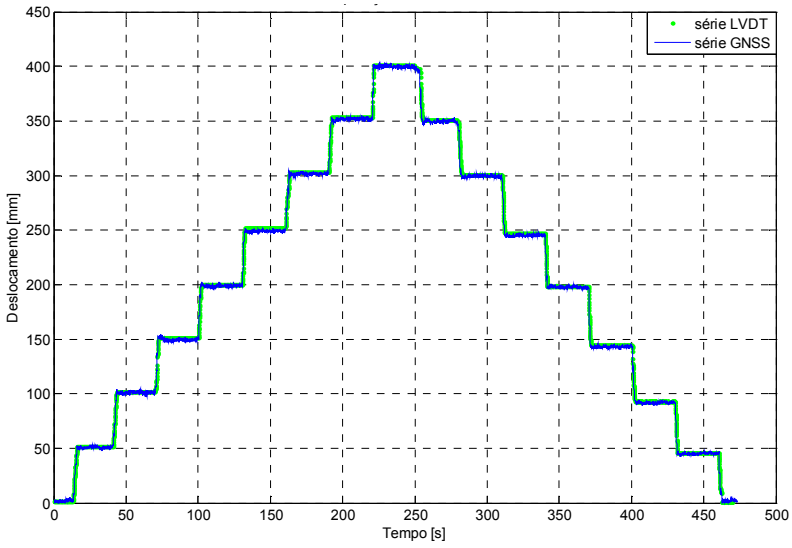


Figura 3.25 – Ensaios dinâmicos por patamares de deslocamentos na direcção EW.

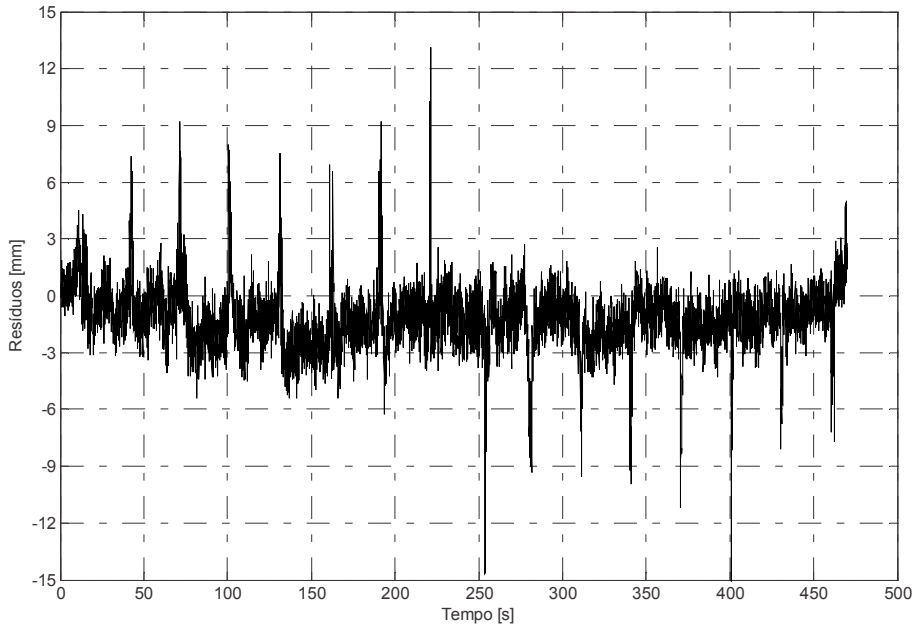


Figura 3.26 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em patamares.

3.5.2. Ensaios por aplicação contínua de deslocamento

Tal como dito no início do subcapítulo, o conjunto de ensaios em que a aplicação de deslocamentos à antena GNSS foi feita de forma contínua teve como principal objectivo a avaliação do comportamento do sistema GNSS quando submetido à aplicação de deslocamentos a uma velocidade não desprezável. Na Figura 3.27 verifica-se mais uma vez um bom acompanhamento do movimento imposto à antena.

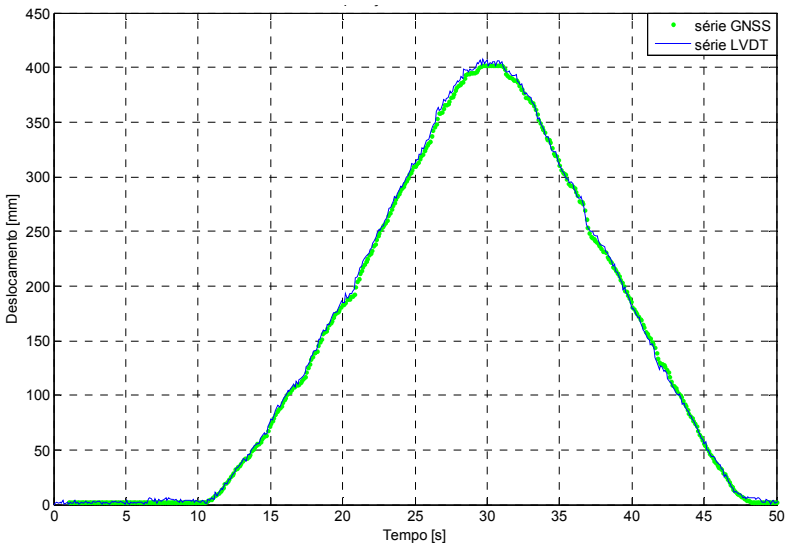


Figura 3.27 - Ensaios cinemáticos por aplicação contínua de deslocamentos na direcção NS.

Por análise da Figura 3.28 constata-se que a zona de maior diferença de deslocamentos, medidos pelos dois sistemas, coincide com a zona de inversão do sentido de deslocamento. Esta zona, por ser a zona onde se inicia a inversão do sentido de deslocamento aplicado à antena GNSS, é caracterizada pela

existência de uma variação gradual da grandeza da velocidade aplicada até que, após a inversão do sentido, se volta novamente a um aumento gradual do valor da velocidade aplicada, sendo desta forma uma zona de transição quer da grandeza quer do sentido da velocidade manualmente imposta. Fazendo uma leitura mais aprofundada desta parte do gráfico, quer na Figura 3.27 quer na Figura 3.28, verifica-se que o deslocamento medido pelo sistema é superior ao registado pelo LVDT.

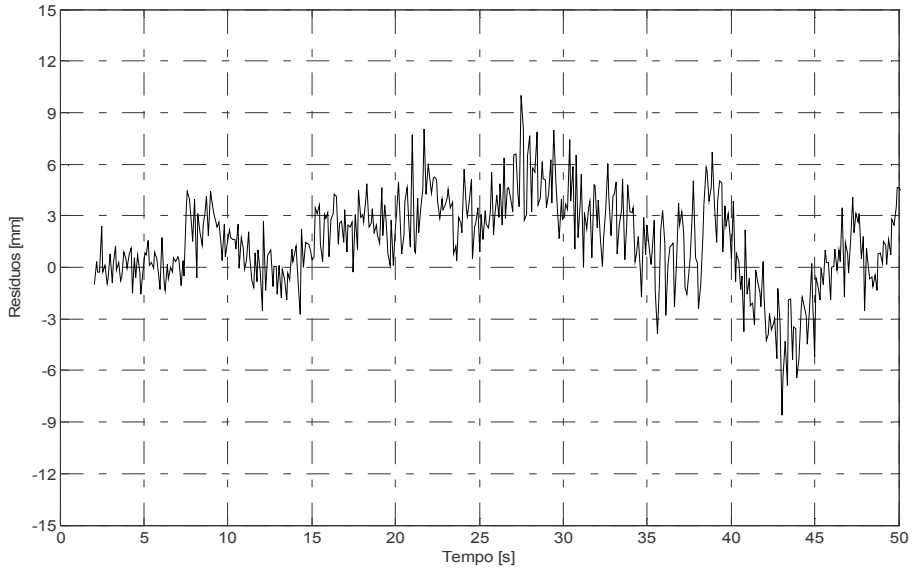


Figura 3.28 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para aplicação de deslocamentos em contínuo.

Os ensaios realizados na direcção EW foram em tudo semelhantes aos levados a cabo na direcção NS, exceptuando-se a velocidade média de aplicação de deslocamentos que, neste caso, foi de aproximadamente 28,6mm/s enquanto na direcção NS se situou sensivelmente nos 17,0mm/s. A assimetria dos ramos ascendente e descendente da Figura 3.29, expressa pela existência de duas quebras de continuidade no deslocamento e, consequentemente, na velocidade aplicada à antena móvel, resulta do encravamento da base de madeira da antena, provocado pelo acumular de pequenos detritos na base de deslizamento que acabaram por, espontaneamente, provocar a imobilização da base da antena. A amplitude dos resíduos obtidos neste ensaio situa-se praticamente durante todo o ensaio entre os ±4mm.

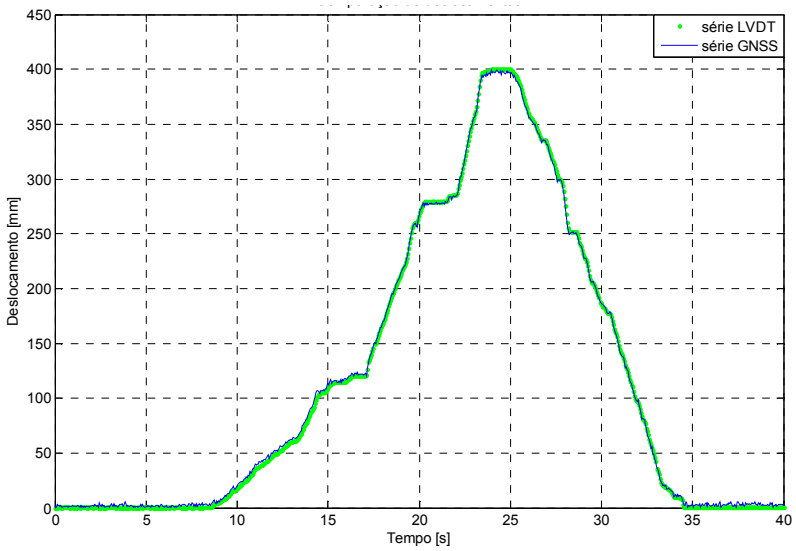


Figura 3.29 - Ensaios cinemáticos por aplicação contínua de deslocamentos na direcção EW.

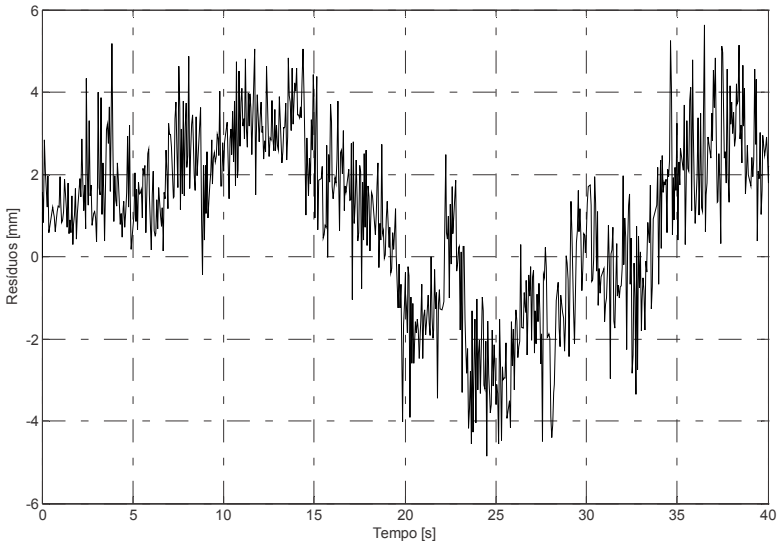


Figura 3.30 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em contínuo.

3.5.3. Ensaios por aplicação de deslocamentos harmónicos

O presente conjunto de ensaios, de carácter cíclico, materializa o teste mais exigente do grupo de ensaios levados a cabo com o sistema GNSS. O nível de exigência imposto, deveu-se não só ao carácter cíclico de período relativamente reduzido dos deslocamentos aplicados à antena móvel, mas também à aleatoriedade das amplitudes de deslocamento aplicadas. Tal como nos ensaios anteriormente apresentados e analisados, este grupo de ensaios foi realizado manualmente. Tal como qualquer outro sinal, a série de deslocamentos registada pelo LVDT pode ser decomposta em séries de Fourier, obtendo-se desta forma uma estimativa da frequência fundamental que compõe o respectivo

sinal. Na Figura 3.31 é apresentada a lei temporal de deslocamentos impostos obtida pelo transdutor de referência bem como a série de deslocamentos captada pelo sistema GNSS.

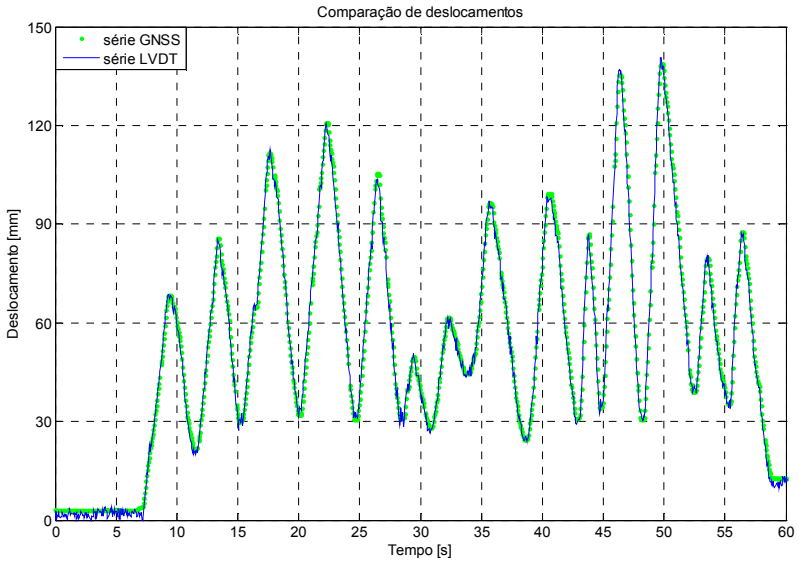


Figura 3.31 – Ensaio dinâmico cíclico na direcção NS.

Utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), define-se a Figura 3.32. Analisando o respectivo gráfico, cujo eixo das abcissas foi superiormente limitado a 1Hz, verifica-se que o sinal da Figura 3.31 contém um pico nos 0,213 Hz correspondendo a esta frequência um período de sensivelmente 4,7s. Obtendo a diferença entre as séries representadas na Figura 3.31, conclui-se que os resíduos variam entre os ±4mm durante todo o período de ensaio.

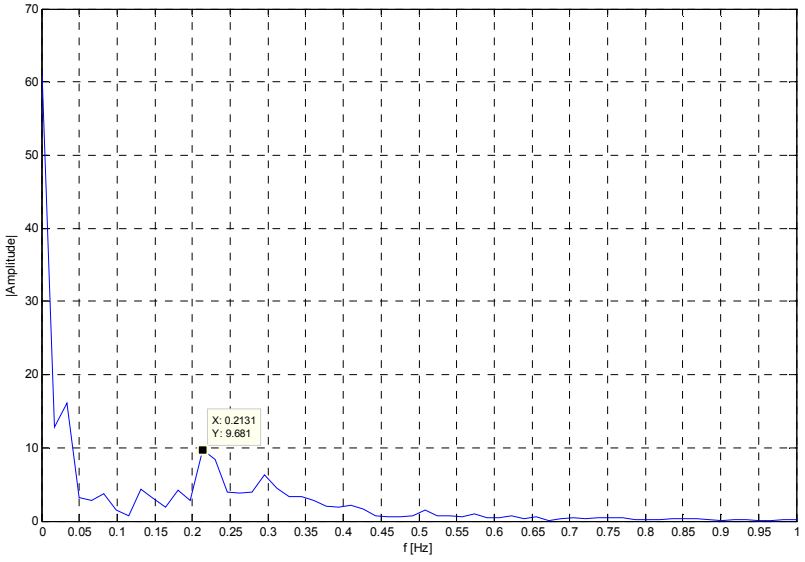


Figura 3.32 – Espectro de composição do sinal do ensaio cíclico da direcção NS utilizando o algoritmo da FFT.

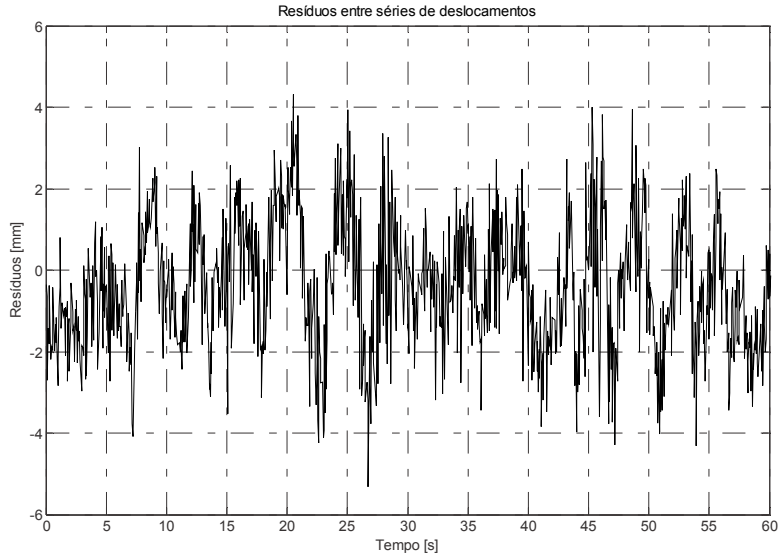


Figura 3.33 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para ensaio cíclico.

De forma semelhante ao que se fez na direcção NS, decompondo a série de deslocamentos aplicados na direcção EW em séries de Fourier, regista-se um pico sensivelmente aos 0,244 Hz correspondendo a um período de aproximadamente 4,1s. Olhando para a Figura 3.34, verifica-se que a série GNSS acompanha bem a tendência dos deslocamentos impostos à antena móvel, mesmo nas zonas onde os deslocamentos aplicados foram de pequena amplitude. Em termos de caracterização cinemática, este foi o ensaio com maior grau de exigência, já que se intercalaram ciclos de grande e de pequena amplitude de deslocamento.

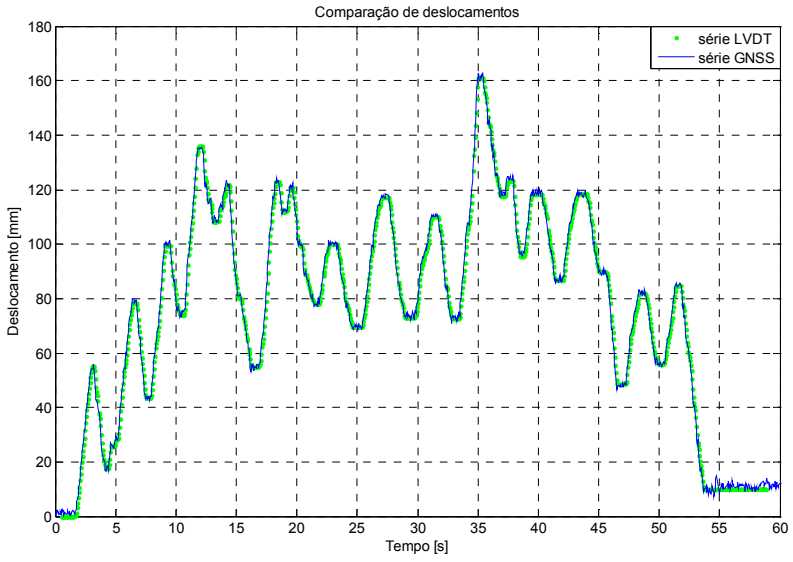


Figura 3.34 – Ensaio dinâmico cíclico na direcção EW.

Neste ensaio, a amplitude dos resíduos é de 8mm (±4mm) como se ilustra na Figura 3.35. A sua caracterização no tempo é semelhante à que foi feita no ensaio anterior. Contudo, pontualmente, os resíduos deste ensaio oscilam entre os ±5mm. Na Figura 3.36 faz-se uma comparação estatística dos resíduos associados aos ensaios cinemáticos realizados neste trabalho.

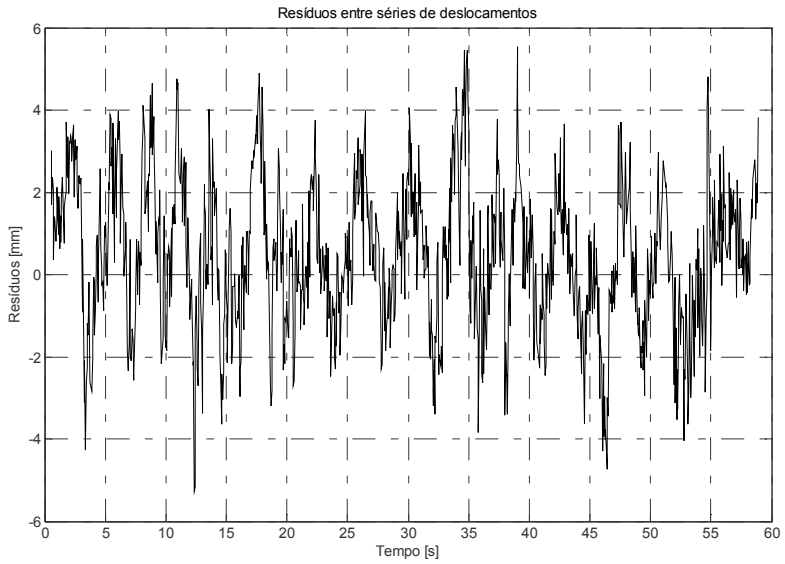
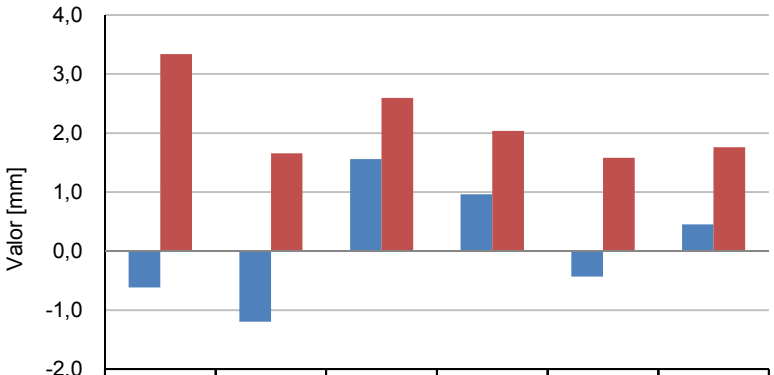


Figura 3.35 – Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para ensaio cíclico.



	NS	EW	NS	EW	NS	EW
	Ensaio de Patamares		Ensaio contínuo		Ensaio cíclico	
Média [mm]	-0,613	-1,193	1,559	0,963	-0,430	0,450
Desvio-padrão [mm]	3,338	1,654	2,594	2,034	1,580	1,758

Figura 3.36 – Valor médio e desvio-padrão dos resíduos dos ensaios cinemáticos.

4

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA GNSS SUBMETIDO A FONTES DE INTERFERÊNCIA

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora seja relativamente complexo e bem elaborado, os sinais do sistema GNSS são exposto a diversos tipos de interferências, intencionais ou não, que podem causar alterações na precisão das medições ou até mesmo inviabilizar a sua utilização [52], [53].

Desta forma, a aplicação do sistema GNSS em ambientes com potenciais fontes de interferência pode ser comprometida, face ao efeito que as referidas fontes poderão ter nos resultados obtidos. No decorrer deste trabalho, foram realizados ensaios que possibilitaram a observação do comportamento do sistema quando submetido a uma das causas mais comuns do erro associado ao cálculo das pseudo-distâncias, as reflexões. A existência de condições favoráveis à ocorrência de erros de medição, associados à interferência da actividade solar com o sistema GNSS, foi também abordada.

No presente capítulo, são apresentados alguns resultados relativos a ensaios realizados em ambiente reflexivo, bem como se dão a conhecer os resultados de um ensaio cinemático, realizado durante um período com alterações do campo magnético terrestre, geradas pela existência de um pico de actividade solar.

4.2. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS EM AMBIENTE REFLEXIVO

Dada a existência de alguns picos nas observações GNSS registadas ao longo do tempo, nos dias 20 e 21 de Abril realizaram-se dois ensaios em tudo semelhantes, excepto no que respeita ao ambiente que envolveu o local de posicionamento da estação 2 (ver Figura 4.1), com o objectivo de associar a causa dos referidos picos a fenómenos de reflexão de sinal (*multipath*).

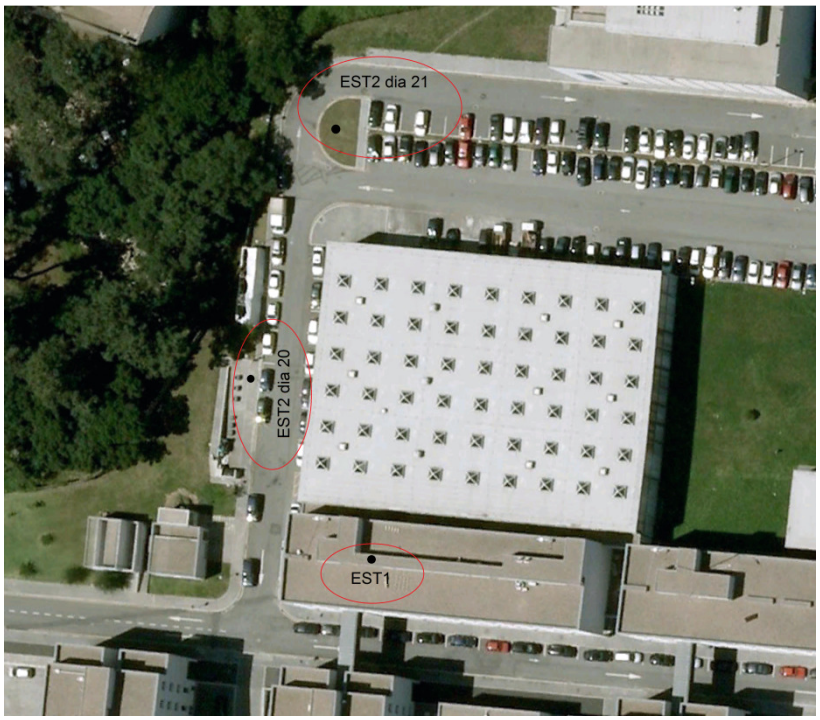


Figura 4.1 – Localização das estações nos ensaios de reflexão.

No dia 20 de Abril, o ensaio consistiu em colocar a estação 2 a adquirir dados durante o período de sensivelmente 2 horas, numa zona próxima a objectos metálicos (caixotes do ecoponto) e a um painel metálico que faz parte do edifício envolvente. Na Figura 4.2 identifica-se o local de implantação da estação 2 nos ensaios da manhã do dia 20 de Abril de 2010.



(a) (b)

Figura 4.2 – Local de implantação da EST2 para os ensaios da manhã do dia 20 de Abril de 2010.

4.2.1. Análise de dados relativos aos 30 minutos que antecederam a mudança da EST2

Da Figura 4.3 à Figura 4.8 apresentam-se os gráficos relativos à análise de cerca de meia hora de observações correspondentes aos trinta minutos imediatamente anteriores à mudança de posição da estação 2. Esta análise foi feita com o objectivo de verificar a estabilidade das observações no período imediatamente anterior à mudança de posição da antena da estação 2 para que desta forma fosse possível, pela posterior análise dos dados obtidos no período de ensaio, concluir acerca da influência das reflexões na qualidade das medições efectuadas pelo sistema GNSS.

Na Figura 4.3 representa-se a variação temporal da projecção da linha de base na direcção NS com aplicação de uma média móvel de 0,5 segundos e, na Figura 4.4, representam-se os respectivos resíduos em relação à média móvel.

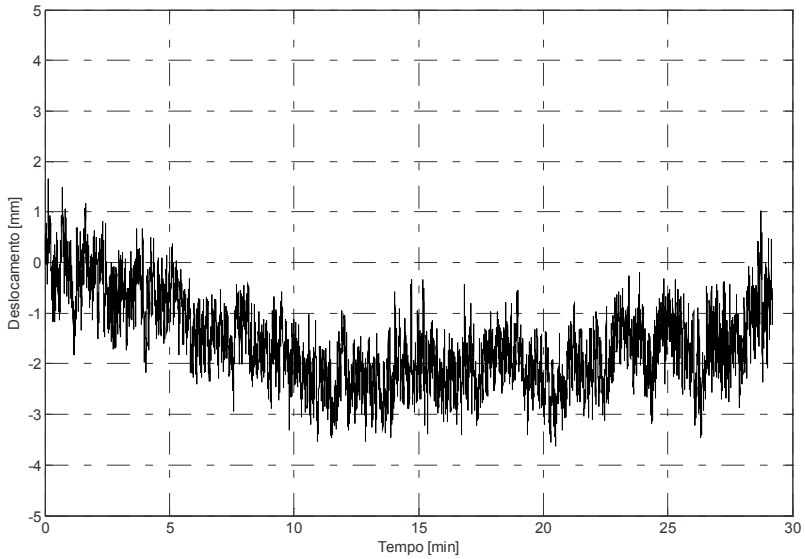


Figura 4.3 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS com aplicação de média móvel de 0,5 segundos.

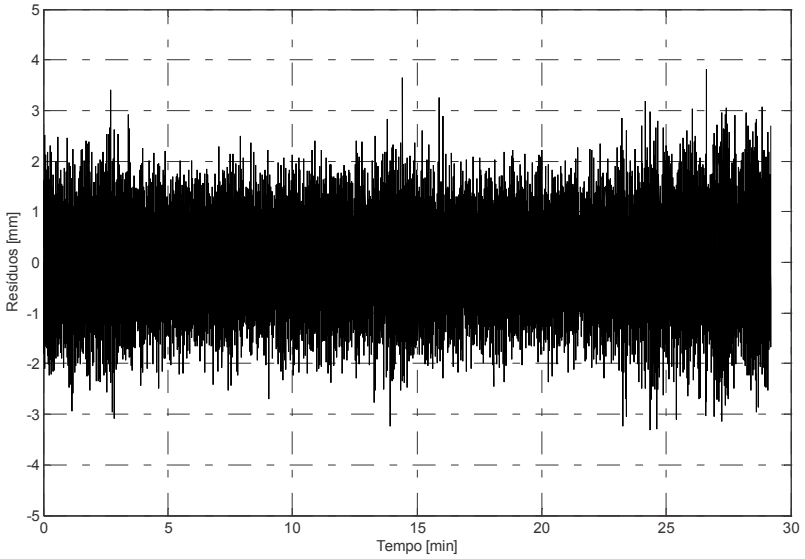


Figura 4.4 – Resíduos da projecção da linha de base na direcção NS em relação à média móvel de 0,5 segundos.

De forma análoga, reproduzem-se os gráficos ilustrados na Figura 4.5 e na Figura 4.6. Analisando os resíduos das direcções NS e EW, representados na Figura 4.4 e na Figura 4.6, verifica-se que as suas amplitudes são semelhantes e situam-se maioritariamente entre ±2mm.

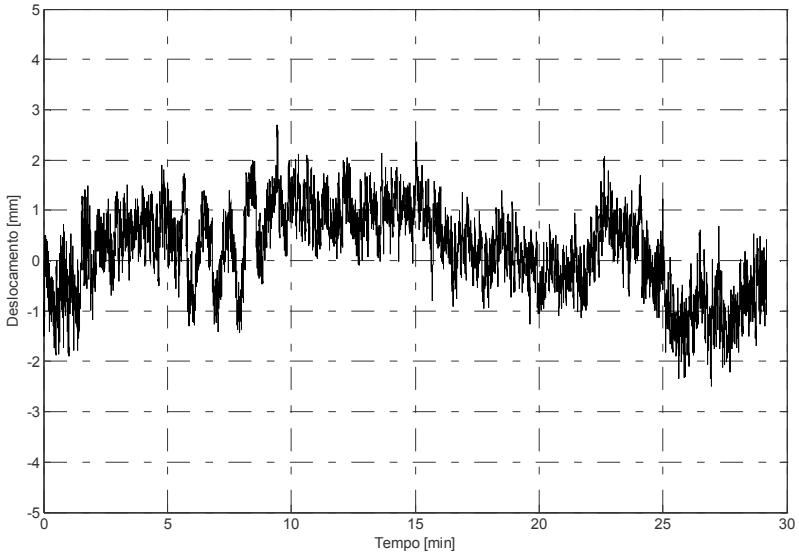


Figura 4.5 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW com aplicação de média móvel de 0,5 segundos.

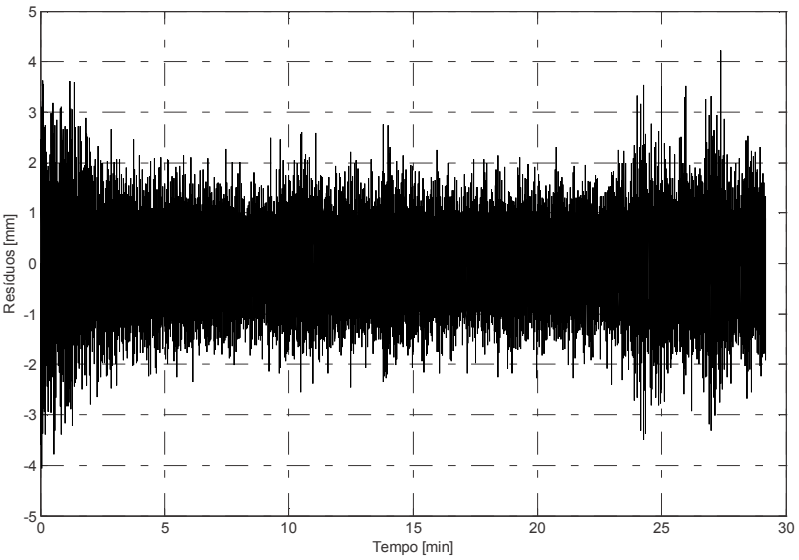


Figura 4.6 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção EW em relação à média móvel de 0,5 segundos.

Como já se viu, na direcção vertical a dispersão das coordenadas é superior à das coordenadas do plano horizontal. Neste caso, como se verifica observando a Figura 4.8, os resíduos oscilam frequentemente entre os ±6mm.

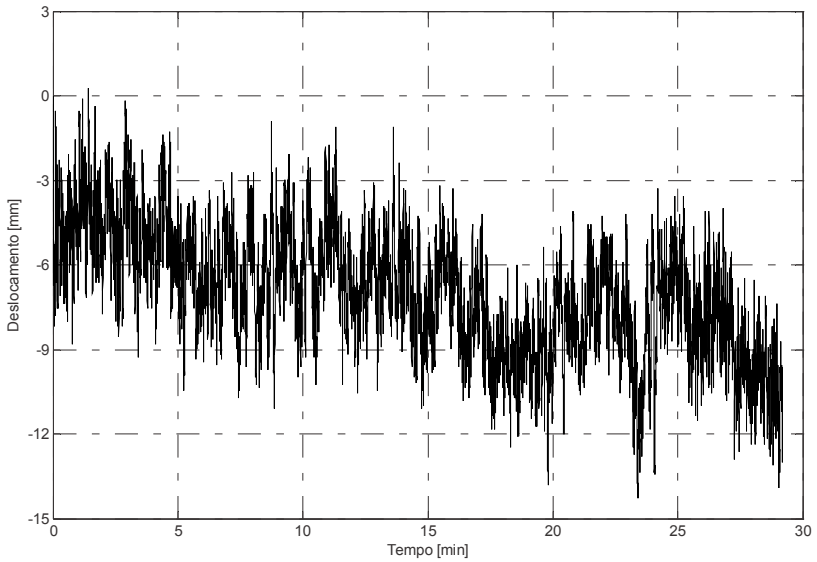


Figura 4.7 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical com aplicação de média móvel de 0,5 segundos.

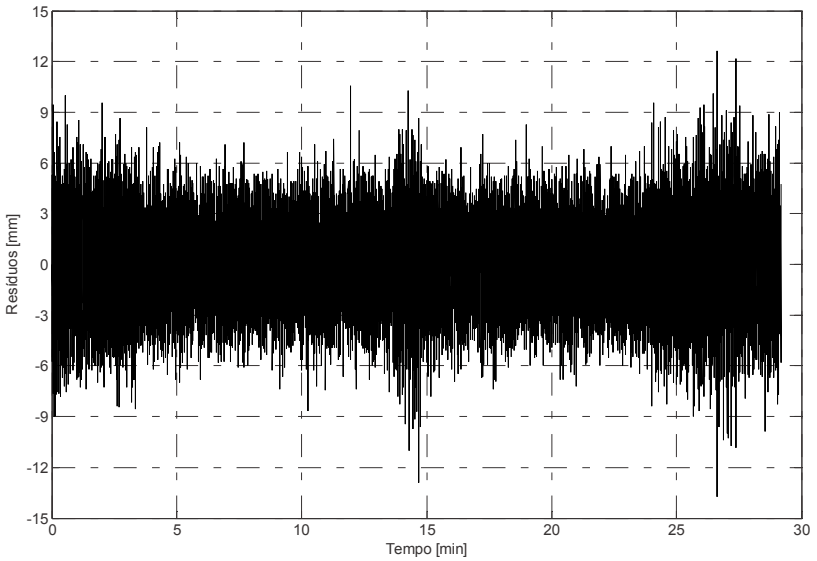


Figura 4.8 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção vertical em relação à média móvel de 0,5 segundos.

4.2.1. Análise de dados do ensaio do dia 20 de Abril

Após se ter efectuado a mudança de posição da estação 2, o processamento dos dados relativos ao período de ensaio revelou a existência de picos nas observações realizadas. Da Figura 4.9 à Figura 4.14 são apresentadas as séries de observações em bruto, respectivas médias móveis de 0,5 segundos bem como os respectivos resíduos.

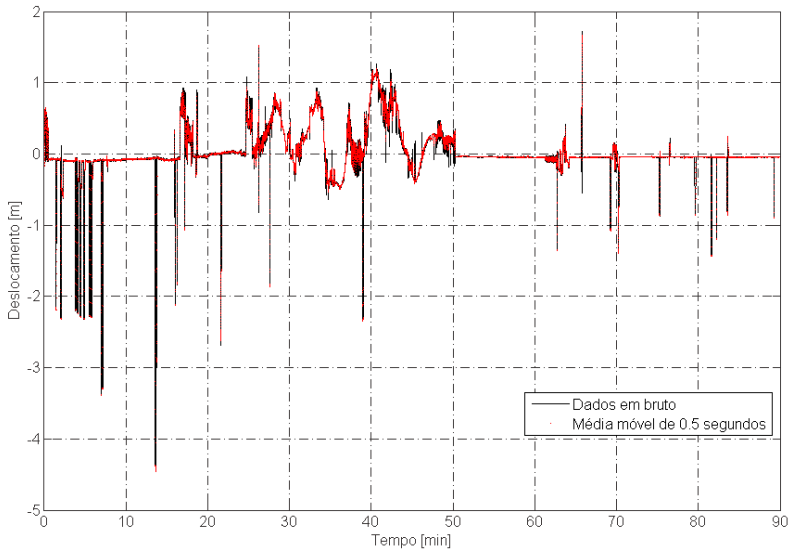


Figura 4.9 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS.

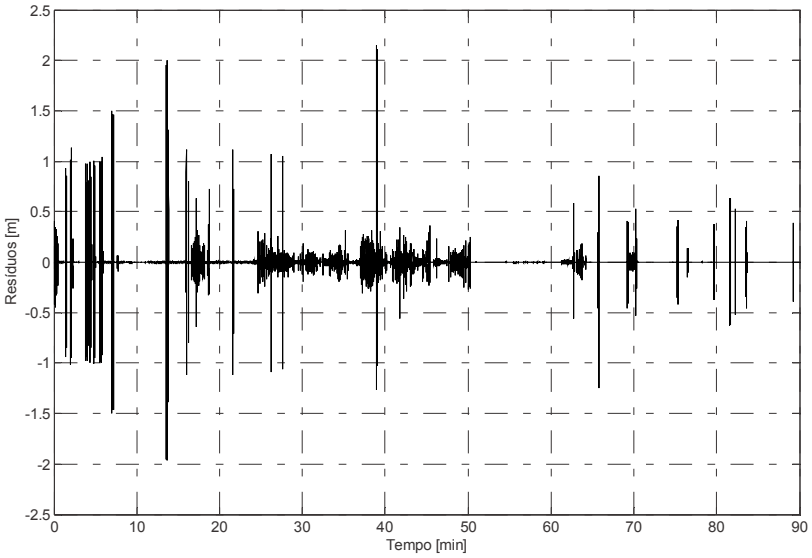


Figura 4.10 – Resíduos da projecção da linha de base na direcção NS em relação à media móvel de 0,5 segundos.

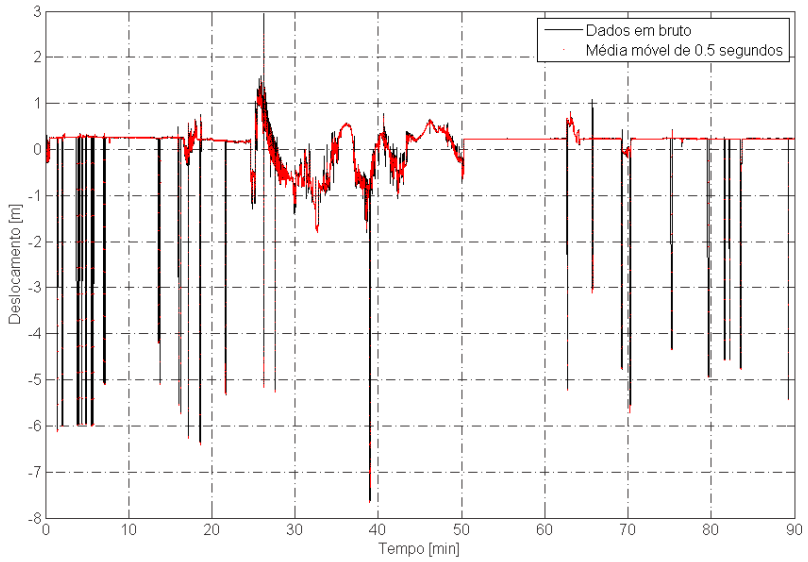


Figura 4.11 Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW.

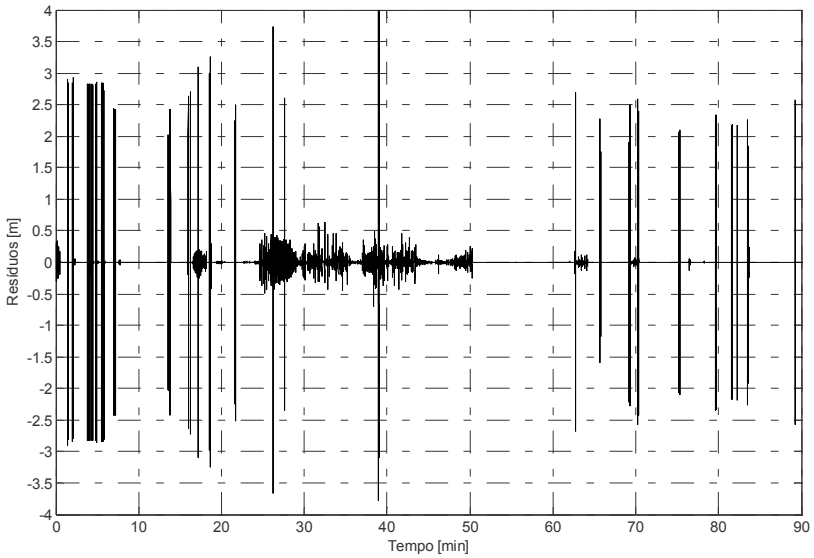


Figura 4.12 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção EW em relação à media móvel de 0,5 segundos.

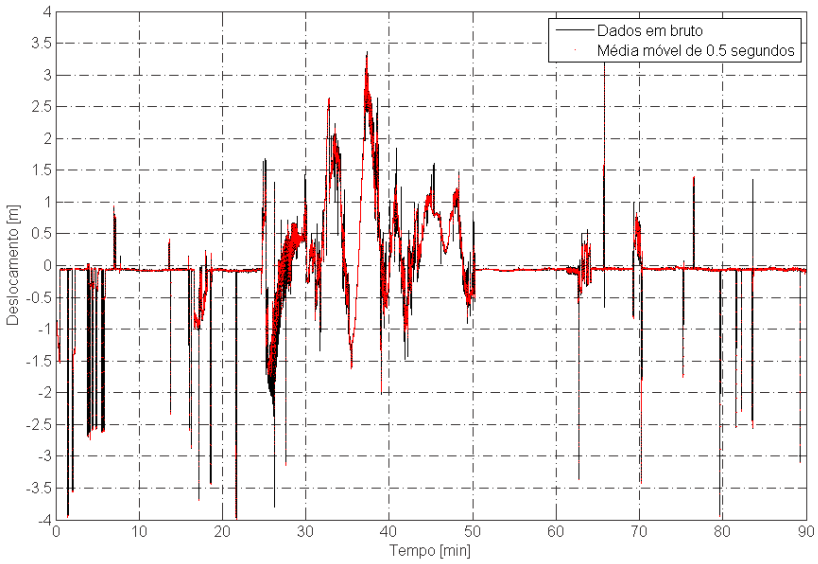


Figura 4.13 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical.

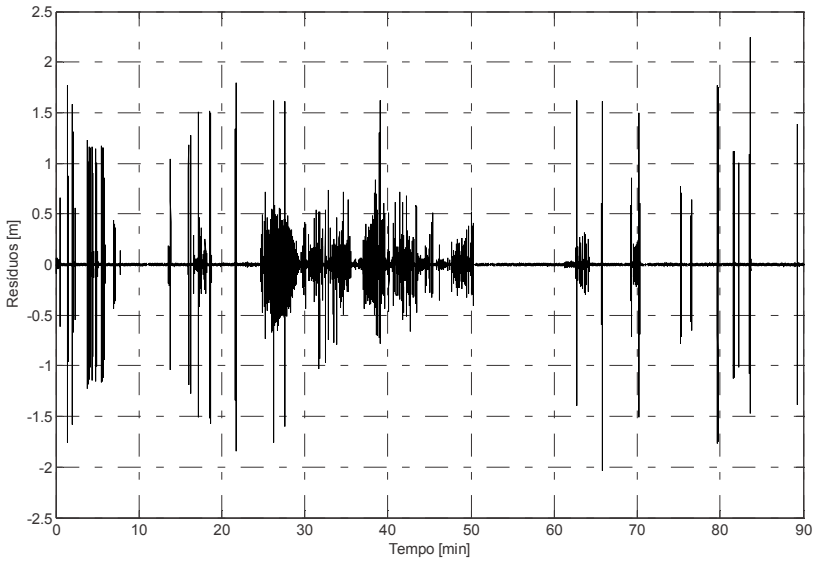
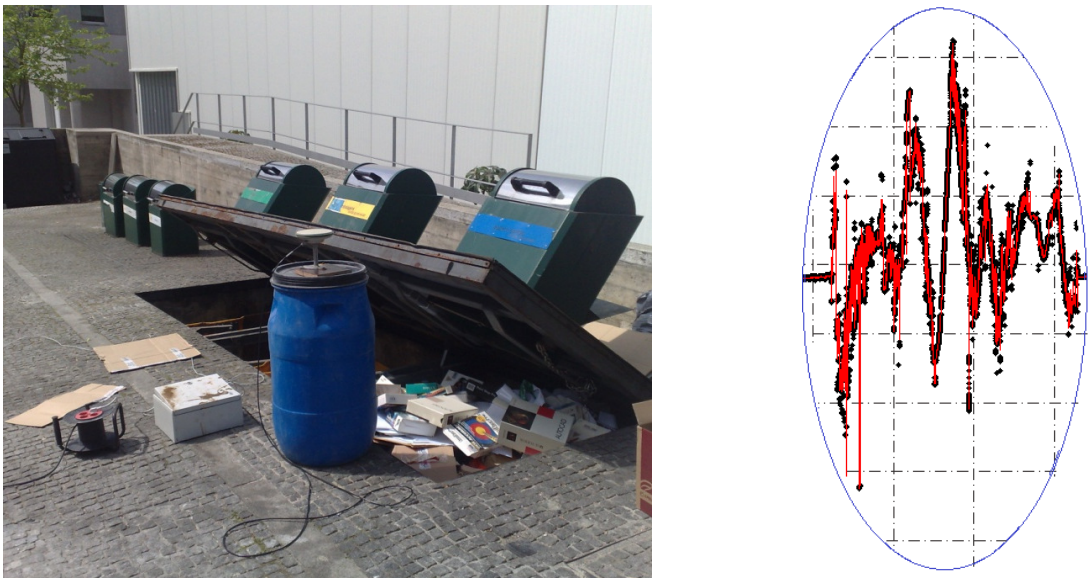


Figura 4.14 - Resíduos da projecção da linha de base na direcção vertical em relação à media móvel de 0,5 segundos.

Analisando as figuras anteriores, verifica-se que as observações são fortemente perturbadas pela existência de elementos reflexivos nas imediações da antena, resultando no aparecimento de picos que surgem de forma bastante irregular nas três orientações geográficas (Norte – Sul, Este – Oeste e Vertical). Os picos de observações existentes nos gráficos da Figura 4.9, Figura 4.11 e Figura 4.13 ocorrem durante períodos relativamente curtos, tal como esperado. Verifica-se ainda que, na direcção Este – Oeste, a ordem de grandeza dos picos é bastante superior à respectiva ordem de grandeza nas outras duas direcções. A justificação desta disparidade é dada pelo facto de, na direcção em causa, a antena estar encoberta pelo edifício H (Laboratório de Estruturas) de um dos lados e pelas árvores existentes do outro, como se observa na Figura 4.1. Desta forma, a existência de obstáculos de grande dimensão provocou a diminuição do firmamento observável e, como consequência, uma diminuição do número de satélites visíveis, impossibilitando que a antena da estação 2 tenha observado o mesmo

número de satélites que a antena da estação 1 observou. Além do elevado número de picos de observações, existe também um período de observações de carácter cíclico, sensivelmente entre os 25 minutos e os 50 minutos de ensaio. Esta perturbação justifica-se pelo facto da base do ecoponto, que ladeia o local onde a antena foi implantada, ter sido levantada dando origem, por si só, a interferências na correcta determinação das coordenadas de estação 2. A Figura 4.15 ilustra a posição da base do ecoponto, depois de levantada.



(a) (b)

Figura 4.15 – Levantamento da base do ecoponto no local do ensaio de reflexão (a) e respectiva perturbação nos dados adquiridos (b).

No Quadro 4.1 apresentam-se as amplitudes dos desvios observados na Figura 4.9, Figura 4.11 e Figura 4.13 em relação aos dados em bruto.

Quadro 4.1 – Grandezas dos desvios registados nas observações em bruto.

	Grandeza dos picos de observação em bruto [m]					
	Antes da mudança da Estação 2			Após mudança da Estação 2		
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Amplitude	Valor Máximo	Valor Mínimo	Amplitude
NS	0,003	-0,006	0,009	1,714	-4,463	6,177
EW	0,004	-0.005	0,009	2,949	-7,672	10,621
Vertical	0,006	-0.021	0,027	3,366	-4,092	7,457

Os valores do desvio-padrão das amostras (observações em bruto, respectivas médias móveis de 0.5 segundos e correspondentes resíduos relativos à média móvel) são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Desvio-padrão da amostra de dados, antes e após a mudança da estação 2 para um ambiente fortemente reflexivo.

	Desvio padrão da amostra [m]					
	Antes da mudança da Estação 2			Após mudança da Estação 2		
	Dados *Raw*	Média Móvel	Resíduos Média Móvel	Dados *Raw*	Média Móvel	Resíduos Média Móvel
NS	0,0046	0,0045	0,0009	0,3989	0,3919	0,0569
EW	0,0047	0,0046	0,0008	0,9020	0,8825	0,1388
Vertical	0,017	0,0167	0,0027	0,6670	0,6583	0,0850

Olhando agora para as projecções das nuvens de pontos, representadas na Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18, verifica-se claramente que são definidas trajectórias ao longo do tempo. Dado que ambas as estações se encontravam numa posição fixa, estas trajectórias dever-se-ão à movimentação dos satélites, já que com a alteração progressiva do posicionamento relativo do conjunto satélites/alvos reflexivos/antenas também o erro associado à reflexão de sinal é variável. Mais uma vez se verifica que na direcção EW a dispersão de resultados é superior à das restantes direcções, em conformidade com a existência de obstáculos de grandes dimensões alinhados nessa direcção, que provocaram a diminuição da visibilidade do firmamento.

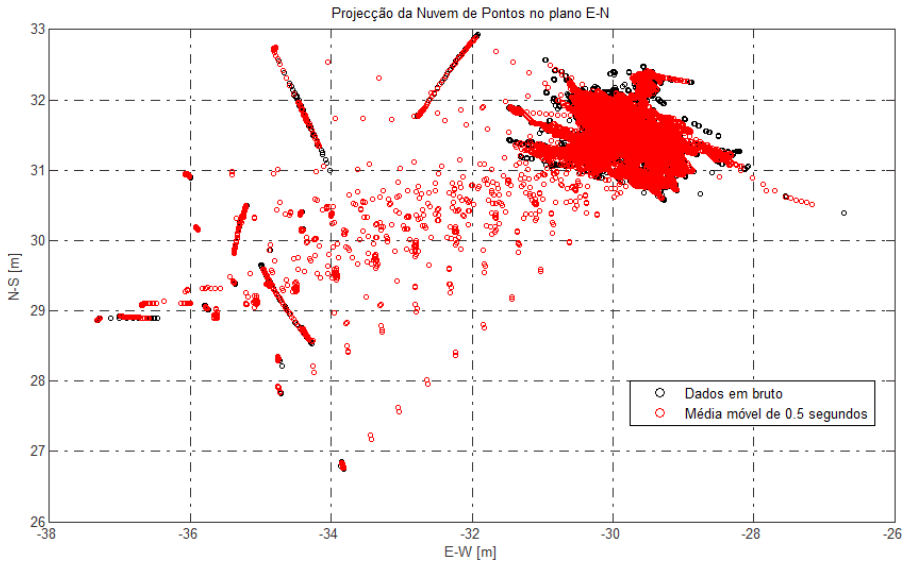


Figura 4.16 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal.

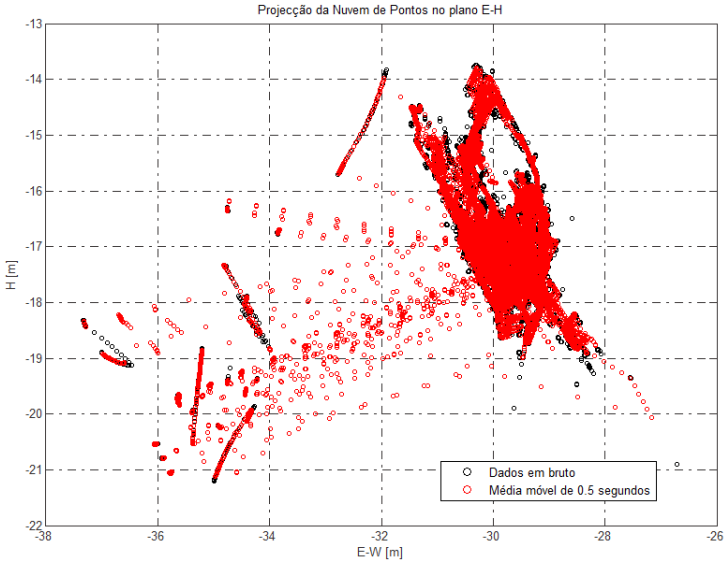


Figura 4.17 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano EW-H.

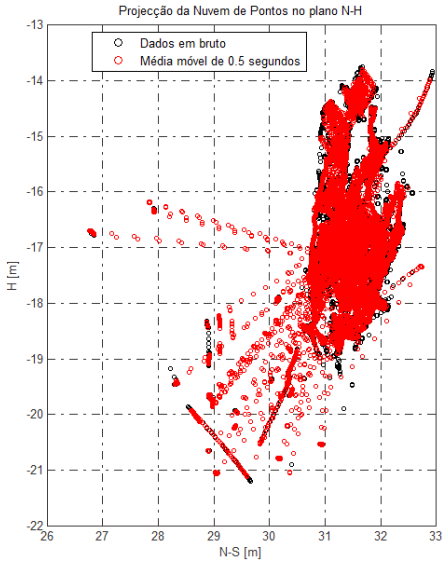
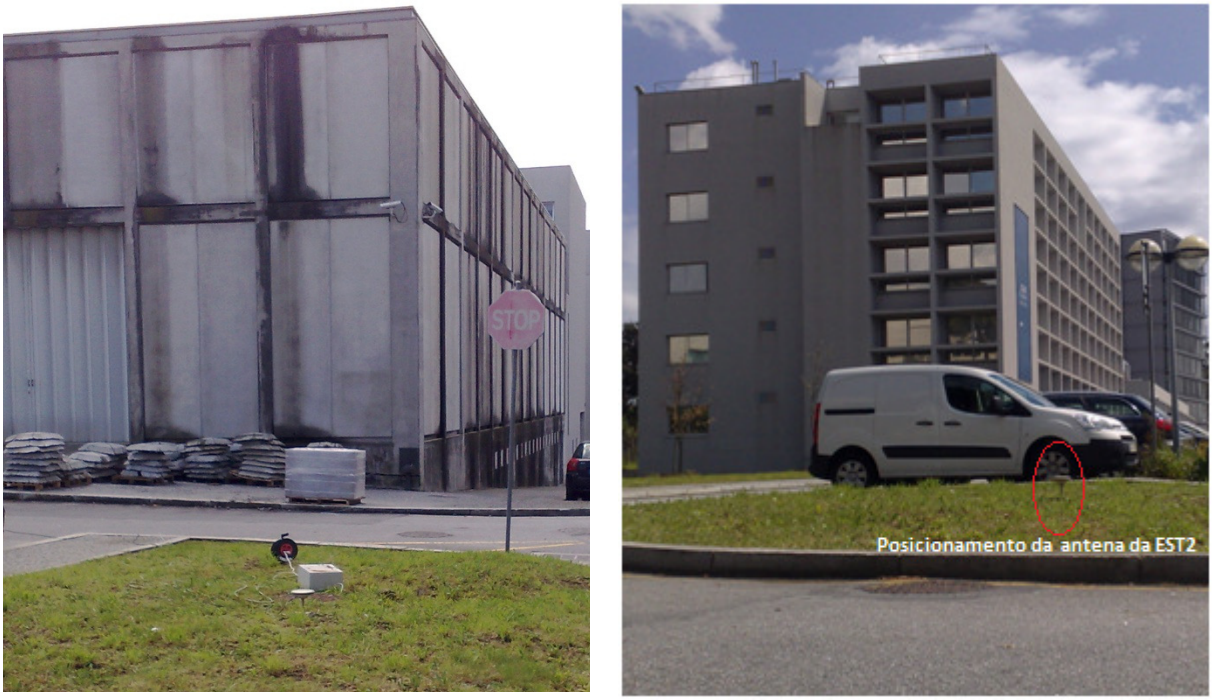


Figura 4.18 - Projecção da nuvem de pontos da linha de base no plano NS-H.

4.2.2. Análise de dados do ensaio do dia 21 de Abril

No dia 21 de Abril, sensivelmente à mesma hora e durante um período de tempo semelhante, a estação 2 foi colocada num novo local, nas proximidades do local do ensaio do dia anterior mas desta vez sem a presença de objectos metálicos nas imediações. Contudo, apesar de não existirem objectos metálicos significativos nas proximidades da antena, a presença de obstáculos de dimensões consideráveis (o edifício do Laboratório de Estruturas da FEUP e o edifício do INESC) continuou a ser um factor de atenuação da qualidade do sinal recebido. Na Figura 4.19 ilustra-se o local de implantação da estação 2 para o ensaio realizado na manhã do dia 21 de Abril de 2010.



(a) (b)

Figura 4.19 - Local de implantação da EST2 para os ensaios da manhã do dia 21 de Abril de 2010: vista do Laboratório de Estruturas da FEUP (a) e vista do edifício do INESC (b).

A existência de algumas viaturas estacionadas nas imediações do local e a presença de edifícios com dimensões consideráveis poderão também ter sido fontes de perturbação na recepção dos sinais GNSS. Apresentam-se seguidamente, na Figura 4.20, Figura 4.22 e na Figura 4.24, as projecções dos dados em bruto da linha de base nas três direcções habituais, e na Figura 4.21, Figura 4.23 e Figura 4.25 são definidos os respectivos resíduos. Neste caso, comparando os resíduos existentes em cada uma das direcções, verifica-se que a direcção vertical é a direcção cujos resíduos resultam com maior amplitude, tal como habitual. No plano horizontal, desta vez, a maior amplitude de resíduos está associada à direcção NS em harmonia com o expectável. De facto, recordando a Figura 4.1, observa-se que na direcção NS a antena da estação 2 está praticamente colocada no alinhamento do edifício do laboratório de estruturas enquanto na direcção perpendicular, apesar da existência do edifício do INESC, a sua orientação não está no alinhamento da antena.

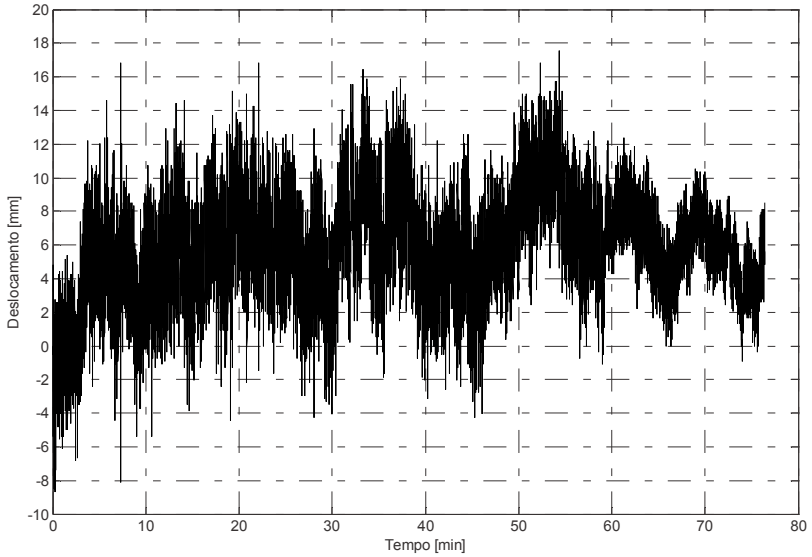


Figura 4.20 Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS.

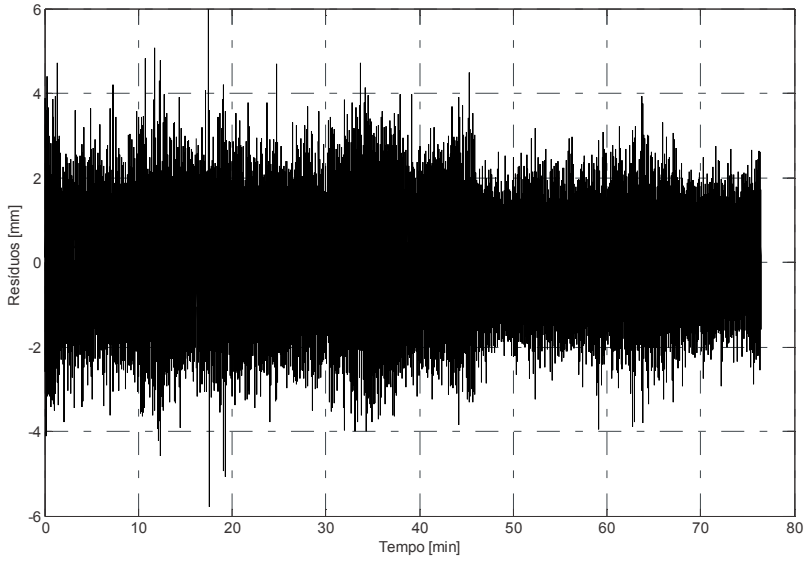


Figura 4.21 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção NS em relação à media móvel de 0,5 segundos.

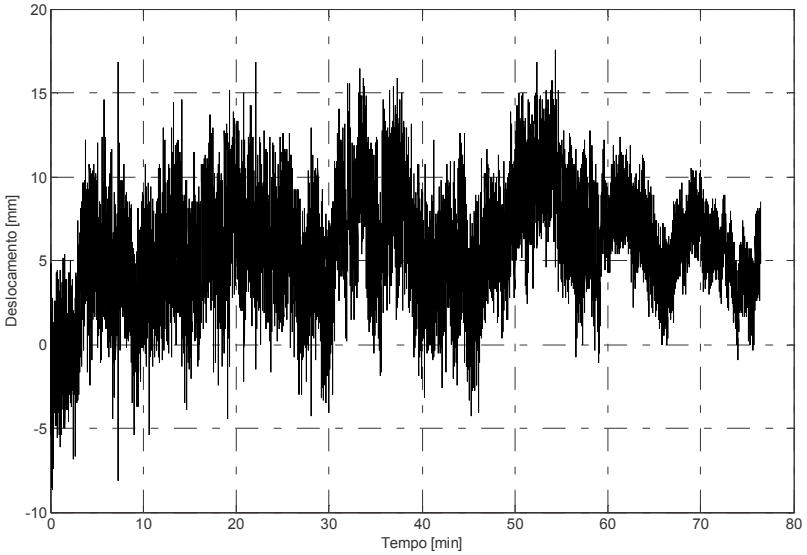


Figura 4.22 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW.

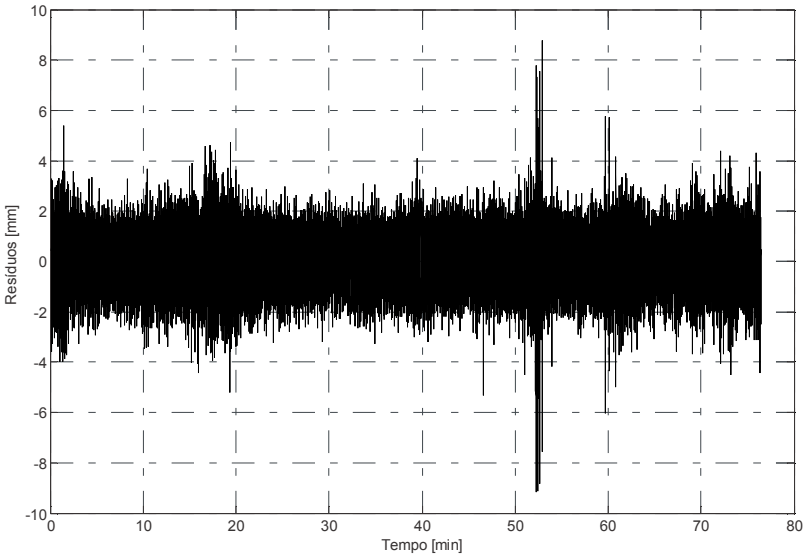


Figura 4.23 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção EW em relação à media móvel de 0,5 segundos.

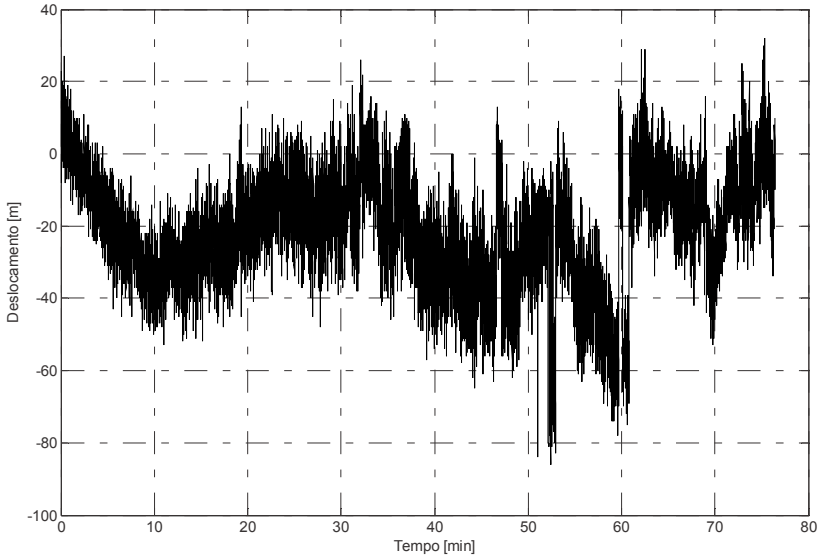


Figura 4.24 - Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical.

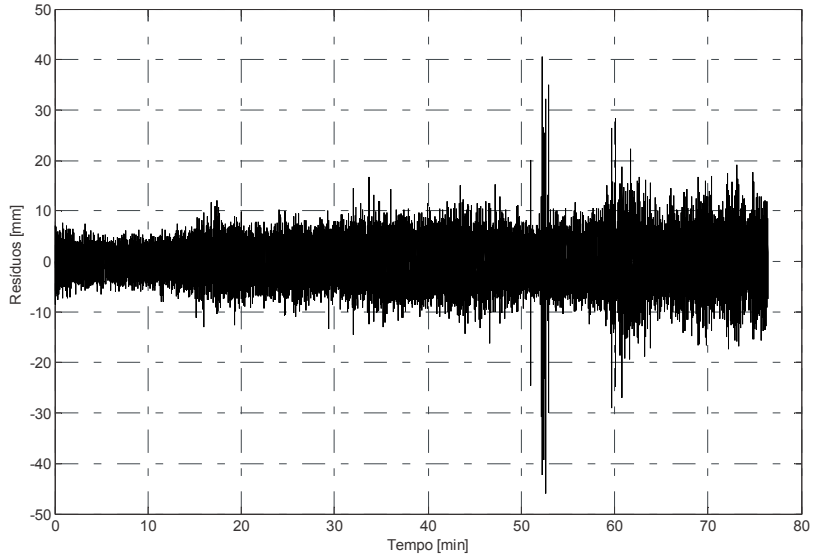


Figura 4.25 - Resíduos da variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical em relação à media móvel de 0,5 segundos.

Analisando as figuras anteriores, chega-se à conclusão que a amplitude dos resíduos diminui significativamente, quando comparada com a amplitude dos resíduos apresentados no ensaio em ambiente reflexivo. No Quadro 4.3 compara-se a amplitude típica dos resíduos das observações obtidas para o ensaio realizado em ambiente reflexivo e em ambiente natural.

Quadro 4.3 – Amplitude típica dos resíduos das observações para o ensaio realizado em ambiente reflexivo e em ambiente natural.

	Amplitude dos resíduos [m]		
	NS	EW	Vertical
Ensaio em ambiente reflexivo	±2,000	±3,000	±1,500
Ensaio em ambiente natural	±0,004	±0,002	±0,150

O ensaio apresentado neste subcapítulo pretendeu estudar a vulnerabilidade do sistema GNSS aos efeitos da reflexão de ondas no que respeita à qualidade das observações efectuadas. Para tal, a antena da estação de referência (EST1) permaneceu em condições consideradas ideais enquanto a antena da estação móvel (EST2) foi colocada em condições francamente mais adversas. Confirma-se que a aplicação do método das diferenças duplas não eliminou as reflexões de sinal, uma vez que as características da envolvente das antenas não eram semelhantes. Analisando os dados apresentados neste subcapítulo, conclui-se que a existência de elementos metálicos nas proximidades das estações receptoras de sinais GNSS interfere de forma significativa na qualidade e, consequentemente, na precisão da grandeza das coordenadas determinadas pelo sistema.

4.3. ENSAIOS CINEMÁTICOS REALIZADOS DURANTE UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

O presente conjunto de ensaios decorreu na manhã do dia 7 de Abril, sensivelmente entre as 11h20 e as 12h30. Os ensaios realizados nesta fase consistiram na aplicação de deslocamentos à antena móvel, em patamares, de forma semelhante aos ensaios cinemáticos apresentados no Capítulo 3 deste trabalho. Após o processamento dos dados obtidos no ensaio, verificou-se uma estranha anormalidade nos resultados alcançados. A consulta da informação disponibilizada no site da NOAA permitiu fazer uma análise dos índices planetários K_p registados no período em questão, manhã do dia 7 de Abril de 2010 e, posteriormente, estabelecer uma relação de causa/efeito entre a existência de tempestades solares e os maus resultados obtidos no ensaio. O índice planetário, K_p, é um índice geomagnético que visa descrever o estado da actividade geomagnética à escala planetária, de acordo com uma determinada padronização. Na Figura 4.26 é apresentado um gráfico com os índices K_p relativos aos dias 5, 6 e 7 de Abril de 2010.

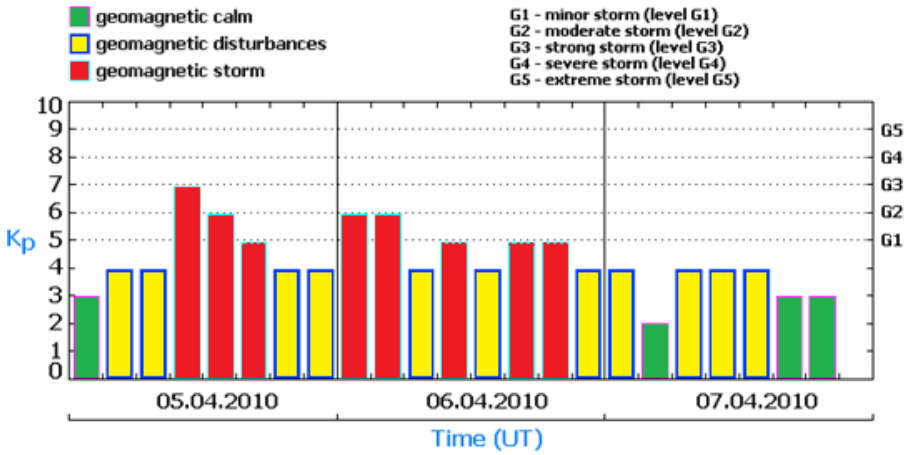


Figura 4.26 – Índices K_p relativos aos dias 5 a 7 de Abril de 2010.

Adaptado de: [54].

Observando a Figura 4.26, verifica-se que no dia 5 de Abril ocorreu o início de uma tempestade solar de nível G3 (tempestade solar forte). Houve posteriormente uma diminuição do nível de intensidade da tempestade nas horas seguintes e, já no período final do dia 6 de Abril, a intensidade passou de moderada para pequena tempestade. Olhando para o período em que decorreram os ensaios, foram relatadas apenas perturbações/distúrbios geomagnéticos. Contudo, estes pequenos distúrbios foram suficientes para provocar o insucesso dos ensaios levados a cabo. De facto, apesar de no período em questão terem sido registados apenas distúrbios geomagnéticos, estávamos ainda no "final" de um período de grande instabilidade geomagnética que se iniciou dois dias antes da realização dos ensaios.

Os gráficos da Figura 4.27 à Figura 4.30 apresentam alguns resultados dos ensaios realizados na manhã do dia 7 de Abril de 2010, sendo a comparação dos deslocamentos medidos pelo GNSS e pelo LVDT feita pelos gráficos de resíduos. Nestas figuras, optou-se por representar o comportamento do sistema GNSS alguns segundos antes do início do ensaio verificando-se que, em particular no caso da Figura 4.27,existia uma grande instabilidade inicial na leitura de deslocamentos, que se assumiu consequência do período de instabilidade geomagnética que à data se estava a atravessar.

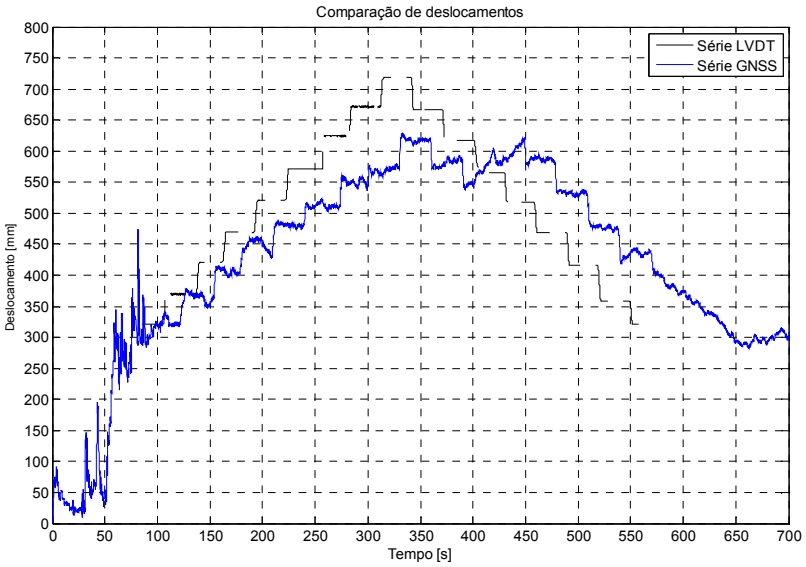


Figura 4.27 – Comparação de deslocamentos das séries GNSS e LVDT para a direcção NS no ensaio de patamares realizado durante a ocorrência de uma tempestade solar.

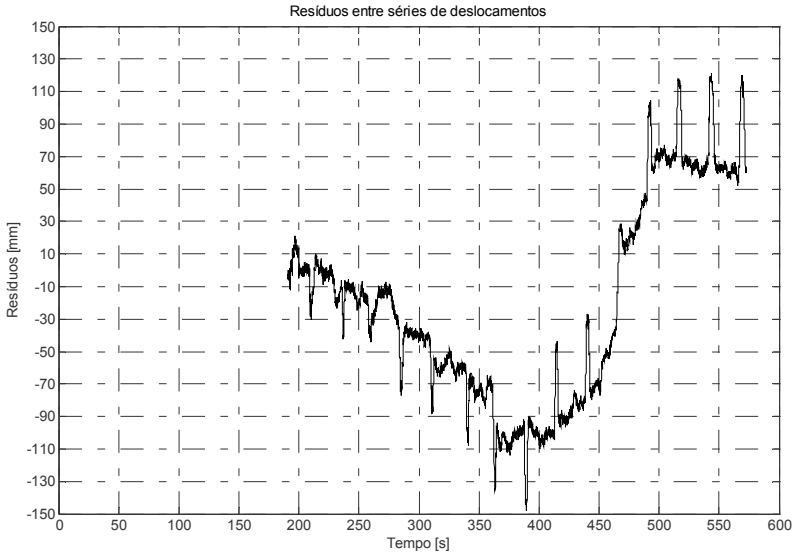


Figura 4.28 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção NS para aplicação de deslocamentos em patamares durante a ocorrência de uma tempestade solar.

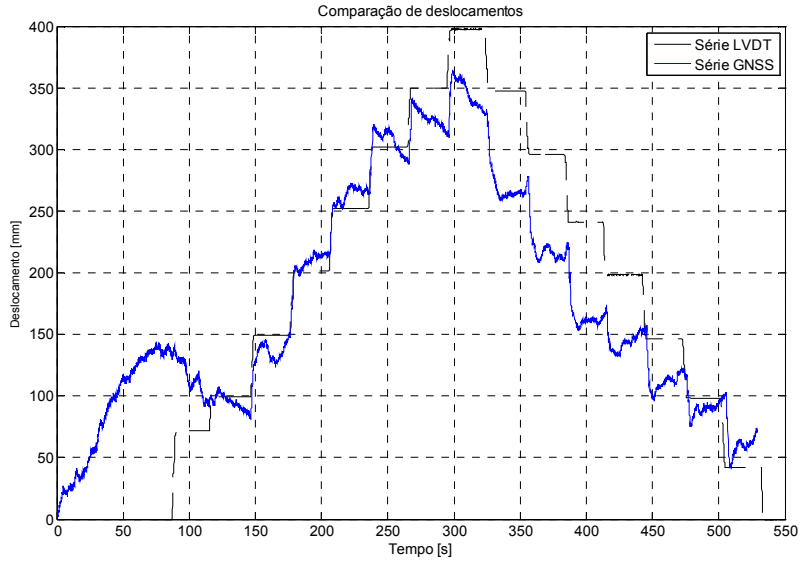


Figura 4.29 - Comparação de deslocamentos das séries GNSS e LVDT para a direcção EW no ensaio de patamares realizado durante a ocorrência de uma tempestade solar.

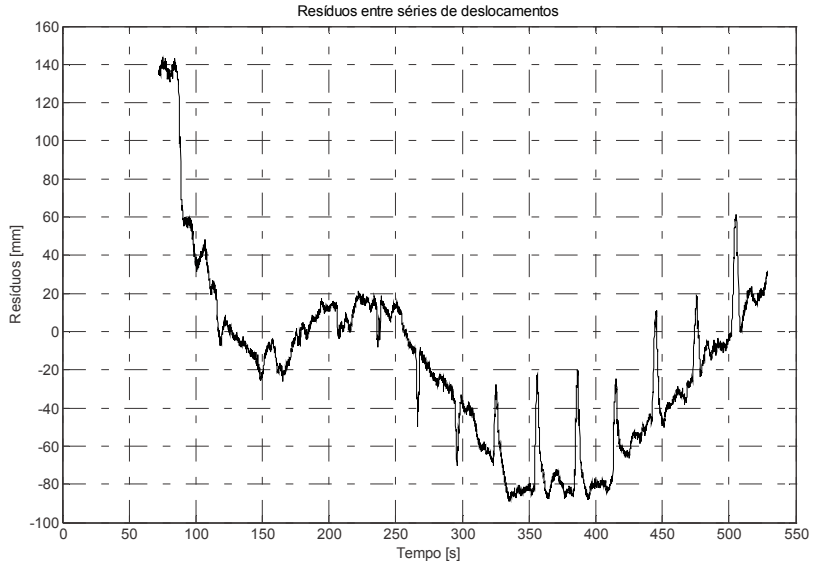


Figura 4.30 - Resíduos entre a série GNSS e LVDT na direcção EW para aplicação de deslocamentos em patamares durante a ocorrência de uma tempestade solar.

Da análise dos gráficos dos resíduos, apresentados na Figura 4.28 e na Figura 4.30, resulta que o erro chega a ultrapassar os 140mm, sendo o seu comportamento variável ao longo do tempo. Olhando para a Figura 4.27, verifica-se que existe um claro *delay* entre a série GNSS e a série LVDT. Este efeito terá sido provocado pela diminuição da velocidade de propagação das ondas emitidas pelos satélites no espaço, consequência da interferência da actividade geomagnética com as comunicações por satélite [55].

Durante o período de instabilidade geomagnética o comportamento da variação das coordenadas das estações foi observado em contínuo. No dia 9 de Abril registou-se uma diminuição das interferências geomagnéticas nas comunicações por satélite. No Quadro 4.4 apresentam-se os valores de desvio-padrão das coordenadas em bruto comparando os registos dos dias 8 e 9 de Abril.

Quadro 4.4 – Comparação do desvio padrão das coordenadas em dias de actividade solar instável e normal.

	Desvio Padrão das coordenadas em bruto [m]		
	Coordenada N	Coordenada W	Coordenada Vertical
8 de Abril de 2010 (Actividade solar instável)	0,0506	0,0547	0,1109
9 de Abril de 2010 (Actividade solar normal)	0,0017	0,0015	0,0038
Rácio	29,8	36,5	29,2
Diminuição (%)	96,6	97,3	96,6

Observando o Quadro 4.4, que contém valores comparativos do desvio-padrão registado em dois dias consecutivos e em igual período horário (para que as condições de observação aos satélites fossem efectuadas em circunstâncias idênticas), conclui-se que os valores chegam a ser 36 vezes superiores aos valores registados em períodos semelhantes obtidos em dias com registo de actividade solar normal. No Anexo A1 apresentam-se as variações da linha de base num período de uma hora relativa aos dias 8 de Abril e 9 de Abril de 2010. O dia 8 de Abril de 2010 corresponde a um dia com forte instabilidade geomagnética e o dia 9 de Abril de 2010 a um período de menor instabilidade.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi demonstrado que a existência de elementos reflexivos nas imediações das antenas GNSS provoca uma diminuição significativa na qualidade das coordenadas determinadas pelo sistema. A presença de obstáculos de dimensões consideráveis é também um factor que influencia o bom funcionamento do sistema.

Com a análise dos dados resultantes dos ensaios realizados na manhã do dia 7 de Abril de 2010, um dia ainda marcado pelo período de instabilidade geomagnética, demonstrou-se que o ciclo solar, quando atinge picos de actividade, interfere de forma muito significativa com as comunicações por satélite e, em particular, com o sistema GNSS, tal como indicado em [56] e [57]. Como consequência, a precisão das observações efectuadas é bastante degradada, atingindo o desvio padrão das observações efectuadas valores muito superiores aos que normalmente são obtidos.

Conclui-se desta forma que, mediante condições desadequadas, o sistema GNSS se revela vulnerável às interferências estudadas neste capítulo.

5

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SENSORES DE FLECHAS COM BASE EM NÍVEIS LÍQUIDOS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A monitorização do comportamento estrutural tem vindo a impor-se como um novo campo estratégico na área da Engenharia, contando com um elevado potencial de crescimento. A sua aplicação é alargada e dá resposta a várias necessidades, como por exemplo, na medição de deslocamentos verticais nas estruturas. A medição destes deslocamentos, por exemplo a flecha de uma determinada viga ou o assentamento de uma dada fundação, tem muita importância na avaliação do comportamento real das estruturas a curto e a longo prazo. A aplicação de meios de monitorização, capazes de efectuar a aquisição de dados de forma automática e frequente, surge como uma resposta à necessidade de obtenção de informações de forma cómoda, fácil e segura.

Quando há possibilidade, as medições de deslocamentos verticais fazem-se com referência ao solo, admitindo que o ponto de referência é fixo e que está na mesma vertical que o ponto cuja flecha se pretende avaliar. Muitas vezes tal solução não é possível, quer pela inexistência de um ponto de referência fixo (sobre um rio por exemplo), quer pela altura acima do solo que muitas estruturas comportam (por exemplo o caso de algumas Obras de Arte). Neste caso, torna-se necessário recorrer às técnicas e aos meios da Topografia, que executa as medições de acordo com um plano de trabalhos previamente definido. Contudo, a utilização deste tipo de técnicas tem como desvantagens a baixa periodicidade com que se efectuam as leituras bem como a necessidade de recorrer a pessoal técnico especializado para as realizar, acarretando um aumento de custos de aplicação [58].

O desenvolvimento de novos meios de medição, capazes de efectuar a medição de flechas sem necessidade de ter uma referência ao solo, tenta dar resposta às necessidades de monitorização estrutural, potencia a redução dos custos de instrumentação e acima de tudo os custos associados à manutenção das estruturas. Não obstante, a confiança depositada nos parâmetros obtidos pelos sistemas de monitorização é dependente da precisão dos sensores utilizados, bem como da estabilidade do seu comportamento no tempo. Apesar do sistema GNSS possibilitar a avaliação de deslocamentos verticais sem necessidade de uma referência física ao solo, a precisão associada à sua medição é relativamente baixa, justificando-se assim a incursão num sistema mais rigoroso de medição de

deslocamentos verticais. Neste capítulo, apresenta-se um conjunto de ensaios laboratoriais realizados para avaliar o desempenho de transdutores eléctricos e de transdutores de fibra óptica na medição de flechas, com recurso ao método dos níveis líquidos. O conjunto de ensaios realizados permitiu avaliar o comportamento do sistema de medição quando os transdutores são submetidos a diferentes frequências de oscilação, bem como avaliar a estabilidade do seu comportamento ao longo do tempo.

5.2. MÉTODO DE NÍVEIS LÍQUIDOS

A monitorização de flechas nas estruturas pode ser realizada, desde que em regime quase-estático, com a aplicação de sistemas de níveis líquidos. Esta técnica permite a monitorização de flechas em pontos representativos do comportamento da estrutura sem necessidade de referência ao solo.

Esta técnica de medição é suportada por um circuito hidráulico, totalmente preenchido por um fluído adequado (normalmente água) que liga todos os transdutores, instalados nos pontos cujo deslocamento vertical se pretende medir, entre si e a um reservatório. Este circuito estende-se ainda até um ponto considerado fixo, ou com deslocamentos negligenciáveis, onde estará instalado um sensor de referência. O princípio do equilíbrio hidrostático garante que a cada ponto do circuito está associada uma determinada pressão, directamente proporcional à sua profundidade em relação à superfície livre do líquido nele contido, que por sua vez se encontra em contacto com a pressão atmosférica. Desta forma, dois quaisquer pontos com a mesma altura de coluna líquida estarão submetidos à mesma pressão [59].

Com o exposto, assegura-se que o movimento vertical relativo da estrutura resultará numa variação da altura da coluna líquida em cada ponto, como consequência da nova posição de equilíbrio de todo o circuito, conforme esquematizado na Figura 5.1. O valor do deslocamento vertical, ocorrido em cada ponto monitorizado, pode ser obtido comparando as variações de altura da coluna líquida nesse ponto com a variação da mesma grandeza no ponto de referência. Várias secções podem ser monitorizadas simultaneamente, utilizando o mesmo ponto de referência e o mesmo circuito hidráulico.

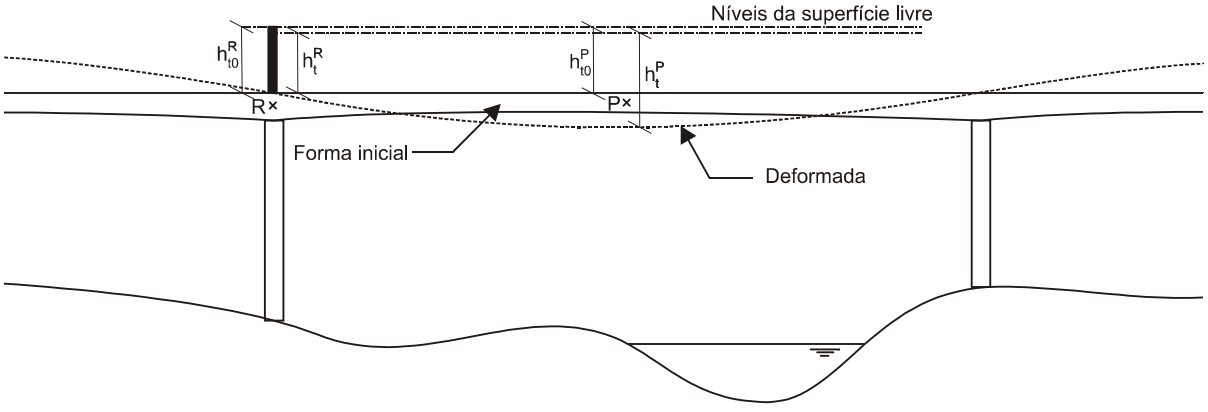


Figura 5.1 – Esquema representativo da aplicação do método de níveis líquidos a uma ponte.

A relação entre o deslocamento vertical de um ponto genérico da estrutura, P, o ponto de referência idealmente fixo, R, e a correspondente variação relativa da altura da coluna líquida é dada em cada instante t por:

$$\Delta\delta_{v,t}^{P} = \left(h_{t}^{P} - h_{t0}^{P}\right) - \left(h_{t}^{R} - h_{t0}^{R}\right) \tag{5.1}$$

sendo:

$\Delta\delta_{v,t}^{P}$ - deslocamento relativo entre os pontos P e R no instante t;

h_t^P - altura da coluna líquida no ponto P no instante t;

h_{t0}^P - altura da coluna líquida no ponto P no instante inicial;

h_t^R - altura da coluna líquida no ponto R no instante t;

h_{t0}^R - altura da coluna líquida no ponto R no instante inicial.

A utilização deste princípio é a base dos sistemas de monitorização que utilizam o método dos níveis líquidos. Como se viu na equação (5.1), o deslocamento vertical relativo entre o ponto de referência (considerado fixo) e o(s) ponto(s) a monitorizar é dado pela diferença da variação das respectivas alturas de coluna líquida. Para medir esta altura, nos ensaios realizados foram utilizados dois tipos de transdutores que utilizam este conceito na medição de deslocamentos verticais, nomeadamente um sistema com sensores eléctricos de medição de pressão e um sistema de medição de deslocamentos verticais com base em sensores de Bragg (*Fiber Bragg Grating*), desenvolvido no LABEST, aplicado na medição de flechas em Obras de Arte. Um conjunto alargado de informações sobre o sistema, bem como a descrição detalhada do seu princípio de funcionamento podem ser consultados em [59].

5.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS

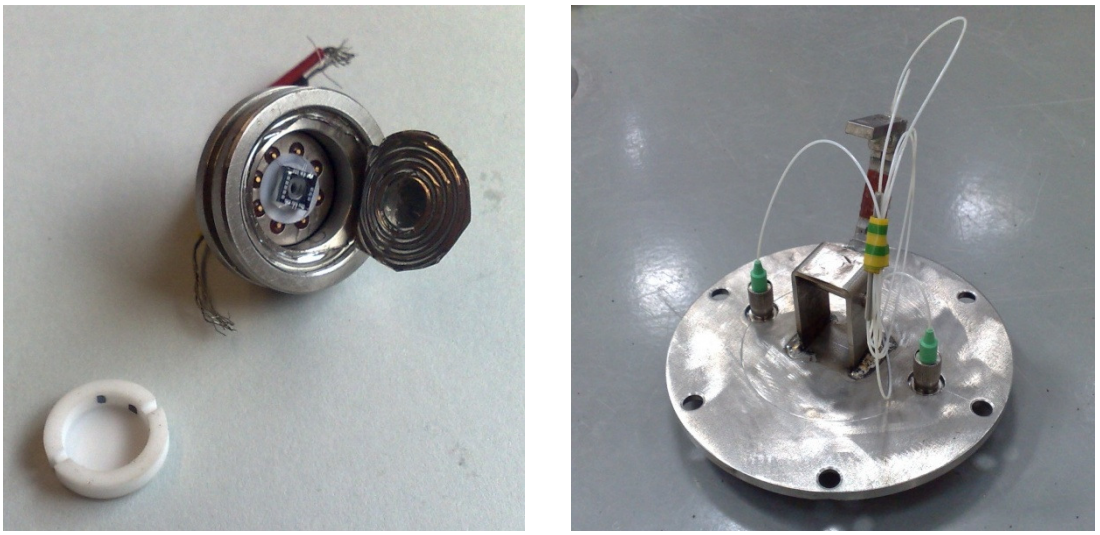
O presente conjunto de ensaios teve por base a aplicação do método dos níveis líquidos para medição de desníveis entre pares de transdutores, nomeadamente um designado por transdutor de referência e outro designado por transdutor activo. Admitindo que o transdutor de referência se encontra num ponto fixo, ou com deslocamento desprezável, consegue-se obter, por subtracção das leituras registadas pelo transdutor de referência, o valor do deslocamento vertical sofrido pelo transdutor activo. Os transdutores eléctricos utilizados na realização do ensaio são internamente constituídos por um sensor piezo-eléctrico, capaz de emitir um sinal de intensidade eléctrica variável em função da variação de pressão registada. Esta variação de pressão é função da altura da coluna líquida existente acima do sensor. A medição do deslocamento vertical é conseguida pela relação entre a intensidade do sinal eléctrico emitido pelo sensor e a respectiva constante de proporcionalidade, cedida pelo fabricante do sensor e calibrada pelos técnicos do LABEST. Na Figura 5.2 (a) é apresentado o sensor piezo-eléctrico existente no interior dos transdutores eléctricos utilizados no ensaio.

O transdutor de deslocamento vertical desenvolvido pelo LABEST baseia o seu princípio de funcionamento na lei de Arquimedes. A lei de Arquimedes enuncia que "*todo o corpo, total ou parcialmente mergulhado num fluido, recebe da parte deste uma impulsão vertical, de baixo para cima, e de intensidade igual à do peso do volume de fluido deslocado pelo corpo*". Desta forma, o transdutor de deslocamento vertical consiste num corpo cilíndrico rígido, parcialmente imerso num fluido contido num pequeno reservatório, e suspenso na designada célula de carga, capaz de medir o peso aparente deste corpo [60]. De acordo com o Princípio de Arquimedes, o peso real do corpo imerso no líquido é reduzido pela força de impulsão, I, transformando o seu verdadeiro peso, W, num peso aparente, W'. A força de impulsão resulta da actuação das pressões hidrostáticas na superfície exterior do corpo imerso e, para um mesmo líquido, o seu valor é linearmente dependente da altura do corpo que se encontra imersa no fluido, h. O valor do peso aparente do corpo imerso é dado por:

$$\left|\overrightarrow{W'}\right| = \left|\vec{W} + \vec{I}\right| = g(m - \rho hA) \tag{5.2}$$

sendo g o valor da aceleração da gravidade, m a massa do corpo cilíndrico, ρ a densidade do fluido, h a altura do corpo imersa no fluido e A a área da secção transversal do corpo cilíndrico.

Desta forma, a célula de carga onde o corpo imerso é suspenso dispõe de dois sensores FBG capazes de transformar o valor do peso aparente do corpo imerso num sinal mensurável, permitindo intrinsecamente a compensação dos efeitos da variação de temperatura sobre os sesnores FBG. Na Figura 5.2 (b) apresenta-se a célula de carga que permite efectuar a suspensão do corpo cilíndrico anteriormente referido.



(a) (b)

Figura 5.2 – Pormenor dos sensores utilizados: piezómetro existente no interior dos transdutores eléctricos (a) e célula de carga presente nos transdutores de flechas do LABEST (b).

Para aplicar os deslocamentos aos transdutores que efectuaram a sua medição, foi utilizado o prato do actuador hidráulico existente no LABEST, adiante designado por prensa. Desta forma, os sensores activos foram colocados sobre o prato da prensa e registaram a aplicação dos deslocamentos impostos, enquanto os sensores de referência se encontravam fixados num pórtico metálico existente nas proximidades do local. Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 é apresentado um esquema relativo à constituição do circuito hidráulico e um pormenor da montagem dos transdutores ópticos e eléctricos. Na Figura 5.5 são apresentados os sensores instalados no LABEST, prontos a iniciar o conjunto de ensaios levados a cabo. Na Figura 5.5 (a) podem ver-se as purgas existentes no final de cada sensor para permitir a expulsão de qualquer bolha de ar existente no preenchimento do circuito hidráulico. A realização do presente conjunto de ensaios compreendeu a aplicação de deslocamentos definidos por sinusóides de frequência variável, com o apoio de um actuador hidráulico que dispõe de um LVDT interno capaz de medir o deslocamento do prato móvel da prensa com um erro inferior a ±0,005mm, de acordo com o certificado de calibração do fabricante.

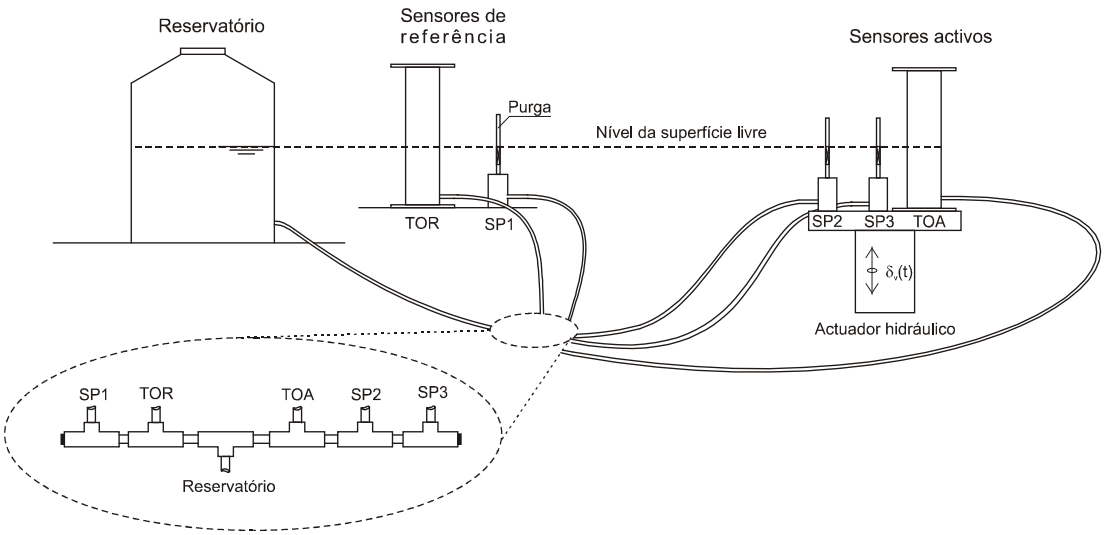
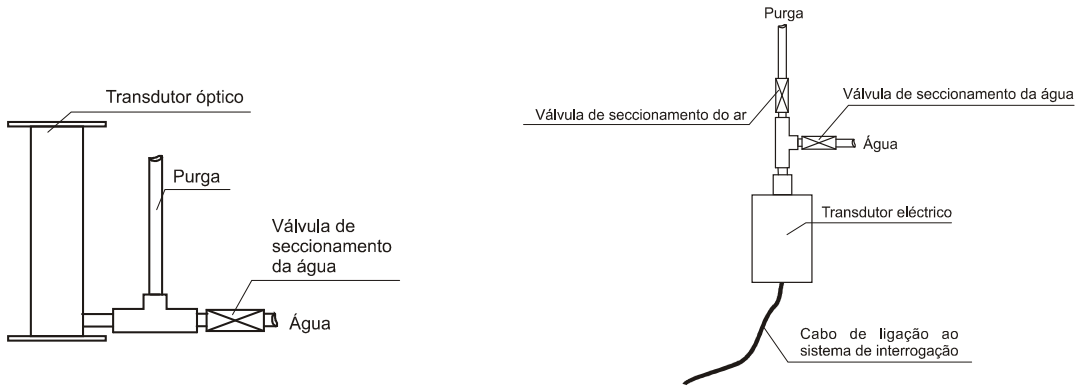


Figura 5.3 – Esquema do circuito hidráulico do sistema de níveis líquidos.



(a) (b)

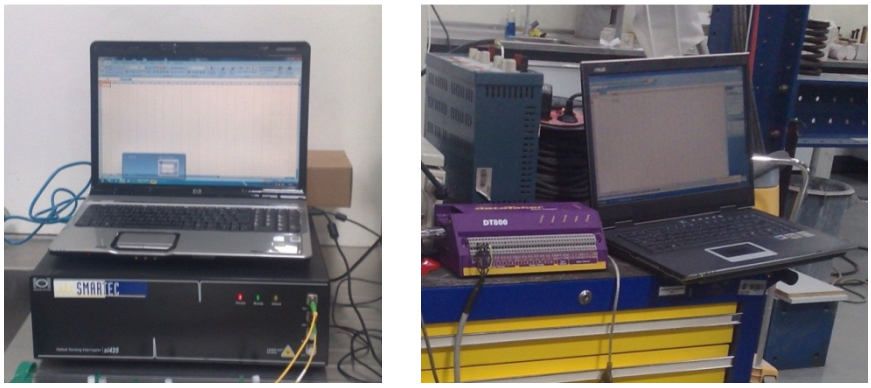
Figura 5.4 – Pormenor da ligação do transdutor óptico (a) e do transdutor eléctrico (b) ao circuito.



(a) (b)

Figura 5.5 – Instalação dos transdutores activos sobre o prato da prensa do LABEST (a) e transdutor de referência ao lado do reservatório de alimentação do circuito hidráulico (b).

No caso dos transdutores eléctricos, foram realizados ensaios de dois tipos, um com as purgas que permitiam o contacto da superfície livre da coluna líquida com a pressão atmosférica abertas e outro com as purgas fechadas e com o sistema em carga. Desta forma, a medição do sensor eléctrico foi realizada não pela variação da altura da superfície livre da coluna líquida mas pela variação de pressão, decorrente da incapacidade de variação da altura da coluna líquida existente acima do sensor. O contacto da superfície livre da coluna líquida com a pressão atmosférica ou a colocação do sistema hidráulico em carga foi conseguido através da abertura ou fecho de válvulas de seccionamento instaladas a jusante de cada um dos sensores eléctricos. Os sistemas de interrogação da rede de sensores (sensores ópticos e sensores eléctricos) são apresentados na Figura 5.6. A frequência de aquisição de ambos os sistemas de interrogação foi definida em 10Hz.



(a) (b)

Figura 5.6 – Unidades de processamento e aquisição de dados: sensores de fibra óptica (a) e sensores eléctricos (b).

No Quadro 5.1 faz-se resumidamente a descrição de cada conjunto de ensaios realizados. O transdutor óptico de referência é designado por TOR e o transdutor óptico activo é abreviado para TOA. Os transdutores eléctricos, designados por sensores de pressão, são abreviados para SP1, SP2 e SP3 correspondendo ao sensor de pressão de referência e aos dois sensores de pressão activos, respectivamente. A simbologia "O" e "X", presente no quadro, corresponde à posição aberta ou fechada da válvula de seccionamento que controla o acesso da água ao sensor (Água) ou o contacto da respectiva superfície livre da coluna líquida existente com a pressão atmosférica (Ar). A título de exemplo, no ensaio 4.2, a água tinha acesso a todos os sensores e todos eles permitiam o contacto da superfície livre da respectiva coluna líquida com a pressão atmosférica, à excepção do sensor SP3 que continha a válvula de seccionamento do ar fechada, fazendo o respectivo sensor determinar a medição do deslocamento aplicado por leitura do valor da pressão à qual o fluido se encontra submetido. Esta leitura seria realizada, caso o contacto com a pressão atmosférica fosse permitido, pela variação da altura da coluna líquida que a superfície livre registaria.

Da interpretação do Quadro 5.1 resulta que na primeira série de ensaios realizada, todos os sensores se encontravam a fazer a leitura dos deslocamentos aplicados pelo actuador hidráulico e com a respectiva superfície livre da coluna líquida em contacto com a pressão atmosférica. Na segunda série de ensaios as válvulas de seccionamento existentes a montante dos transdutores ópticos foram fechadas, deixando de se fazer a interrogação dos respectivos sensores. Este acto resultou numa diminuição do fluxo de água ao longo do circuito dado que estes sensores utilizam um maior volume de água para efectuar as medições quando comparados com os sensores eléctricos. O terceiro conjunto de ensaios continuou com o sistema de sensores de fibra óptica fechado tendo-se colocado o circuito em carga, através do fecho das válvulas se seccionamento colocadas a jusante dos sensores de pressão. O objectivo desta acção é justificado pelo estudo do comportamento dos sensores eléctricos quando solicitados a efectuar as leituras da variação de pressão com o circuito em carga, resultante do impedimento de variação da altura da coluna líquida. Conclui-se também pela interpretação do Quadro 5.1 que, na quarta série de ensaios, o sistema de medição de deslocamentos verticais com base em sensores de fibra óptica voltou a ser alimentado pelo circuito hidráulico, retomando-se a aquisição dos dados provenientes destes sensores. As válvulas de seccionamento do ar do transdutor eléctrico de referência, SP1, assim como a de um dos transdutores eléctricos activos, SP2, foram deixadas abertas enquanto a válvula de seccionamento do ar do transdutor activo, SP3, foi fechada, colocando o respectivo sensor em carga. O objectivo desta série de ensaios é fazer a comparação das respostas de cada um dos sensores, nomeadamente o que faz a leitura dos deslocamentos com variação da altura da superfície livre da correspondente coluna líquida e o que processa a respectiva leitura por variação da carga a que está submetido. Nos subcapítulos seguintes são apresentados os resultados relativos aos ensaios realizados. Primeiramente apresentam-se os resultados relativos aos transdutores ópticos seguidos dos resultados respeitantes aos transdutores eléctricos. No final será realizada uma análise comparativa dos resultados conseguidos para cada conjunto de transdutores testados.

Com a presente série de ensaios pretendeu-se por um lado adquirir sensibilidade para a utilização do sistema de níveis líquidos efectuando a comparação do desempenho de dois tipos de sensores e, por outro lado, avaliar a cinemática do deslocamento que os sensores são capazes de medir com precisão. Efectivamente, o sistema de níveis líquidos tem sido utilizado na medição de variações lentas de deslocamento, já que a alteração da altura da coluna líquida de um dado ponto pressupõe a existência de movimento do fluido para restabelecer o equilíbrio dos vasos comunicantes. A inércia neste restabelecimento dependerá do volume de líquido a deslocar, da secção e do comprimento dos vasos. Com as experiências efectuadas neste trabalho pretende-se ganhar sensibilidade para a cinemática admissível para o deslocamento aplicado aos transdutores.

Quadro 5.1 – Planeamento dos ensaios de medição de flechas realizados com sistema de níveis líquidos.

Ensaio	T_{ciclo} [s]	F_{ciclo} [Hz]	nº ciclos	TOR		TOA		SP1		SP2		SP3	
				Ar	Água	Ar	Água	Ar	Água	Ar	Água	Ar	Água
1.1	300	0,0033	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1.2	60	0,0167	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1.3	12	0,0833	20	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1.4	2,5	0,4000	20	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1.5	0,5	2,0000	40	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2.1	300	0,0033	5	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
2.2	60	0,0167	10	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
2.3	12	0,0833	20	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
2.4	2,5	0,4000	20	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
2.5	0,5	2,0000	40	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
3.1	300	0,0033	4	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O
3.2	60	0,0167	10	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O
3.3	12	0,0833	20	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O
3.4	2,5	0,4000	20	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O
3.5	0,5	2,0000	40	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O
4.2	60	0,0167	4	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O
4.3	12	0,0833	4	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O
4.4	2,5	0,4000	20	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O
4.5	0,5	2,0000	40	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O

O – Circuito aberto X – Circuito fechado

5.4. Ensaios laboratoriais para avaliação do desempenho dos sensores de Fibra Óptica

O bom funcionamento do sistema de medição de deslocamentos verticais, desenvolvido pelo LABEST, é demonstrado na Figura 5.7 e na Figura 5.8. Na Figura 5.7 apresenta-se a comparação entre os deslocamentos obtidos pelos sensores do sistema de medição com base nos níveis líquidos e o deslocamento imposto pelo actuador hidráulico. O ensaio consistiu na aplicação de uma lei de deslocamentos definida por uma sinusóide de 35mm de amplitude, realizando-se um ciclo de deslocamento no final de um período de 10 minutos. Este ensaio foi previamente realizado pelos técnicos do LABEST para se proceder à calibração das constantes de proporcionalidade dos sensores FBG existentes nos transdutores de deslocamentos verticais.

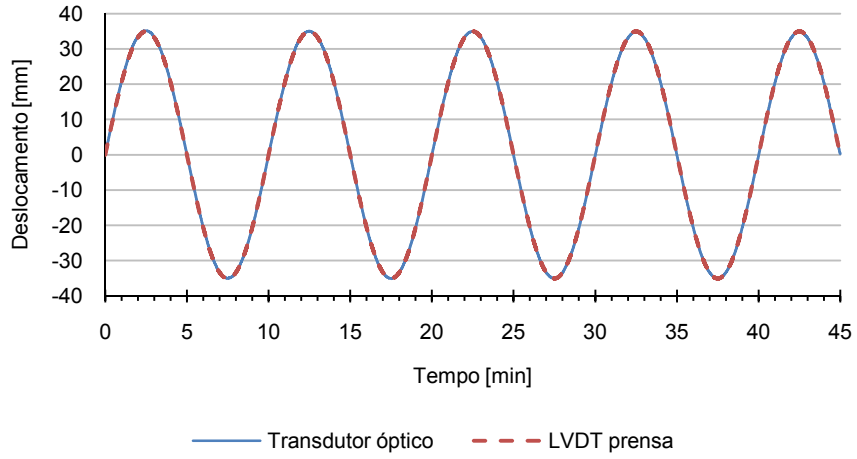


Figura 5.7 – Comparação dos deslocamentos obtidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa num ensaio previamente realizado. Adaptado de: [59].

Na Figura 5.8 apresenta-se o erro traduzido pela diferença das medições efectuadas por cada um dos sistemas. O erro de medição do sistema de níveis líquidos situa-se maioritariamente nos ±0,2mm com um desvio padrão de 0,06mm.

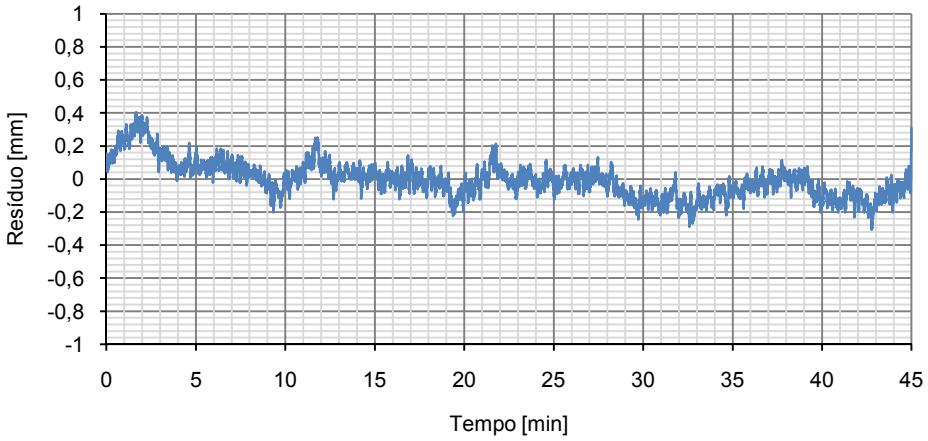


Figura 5.8 – Resíduos das leituras efectuadas pelo transdutor óptico. Adaptado de: [59].

Na Figura 5.9 apresenta-se o gráfico de correlação linear entre os deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e os deslocamentos medidos pelo sistema de níveis líquidos. Como se pode verificar por

análise da representação gráfica, os deslocamentos experimentais obtidos encontram-se perfeitamente alinhados segundo uma recta. De facto, a equação da recta de regressão linear presente no gráfico demonstra que o coeficiente de correlação linear entre os deslocamentos registados pelos dois sensores é máximo. Para além deste ajuste perfeito, o declive da recta de regressão linear é igual à unidade, revelando que as constantes de calibração dos sensores existentes nos transdutores de deslocamentos verticais se encontram correctamente definidas e optimizadas.

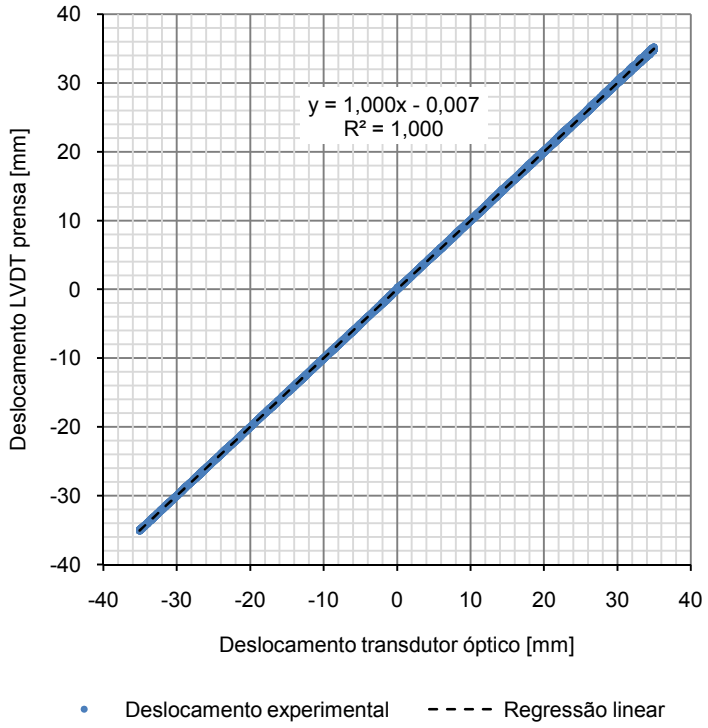


Figura 5.9 – Correlação entre os deslocamentos medidos pela prensa e pelo transdutor óptico.

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para a avaliação do desempenho do transdutor de flechas com base em níveis líquidos, pela ordem apresentada no Quadro 5.1. O ensaio 4.5, indicado no Quadro 5.1, não foi efectuado pelo que serão apresentados os resultados relativos aos ensaios 1.1, 1.2, 1.2, 1.4, 1.5, 4.2, 4.3 e 4.4. Os deslocamento vertical avaliado foi calculado pela diferença da variação de deslocamento vertical do transdutor activo e do transdutor de referência, ou seja, de acordo com a equação (5.3).

$$\delta_v = \delta_v^{\text{Activo}} - \delta_v^{\text{Referência}} \tag{5.3}$$

5.4.1. Ensaio 1.1

Na Figura 5.10 apresenta-se a comparação entre os deslocamentos registados pelo LVDT do actuador hidráulico e os valores obtidos pelo transdutor óptico, bem como os respectivos resíduos resultantes da diferença das duas séries temporais. De acordo com o gráfico representado, verifica-se que o valor máximo do erro de medição do transdutor óptico, relativamente ao deslocamento vertical medido pelo LVDT do actuador hidráulico, é estável ao longo do tempo de ensaio e situa-se entre os ±0,5mm. Verifica-se também que a série de resíduos representada tem carácter cíclico, sendo nula nos picos de

deslocamento máximo (indicando uma coincidência perfeita entre o deslocamento aplicado e o deslocamento medido pelo transdutor óptico nesses pontos). O carácter cíclico da série de resíduos pode indicar uma sincronização imperfeita entre a série de deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e a série de deslocamentos medidos pelo transdutor óptico. A origem deste pequeno desacerto é motivada pelo facto de terem sido usados sistemas de aquisição distintos, com relógios independentes e por isso, naturalmente dessincronizados. Desta forma, foi utilizada a interpolação linear para estimar os valores de cada uma das séries para um mesmo instante de tempo, efectuando-se posteriormente a diferença entre os valores assim determinados.

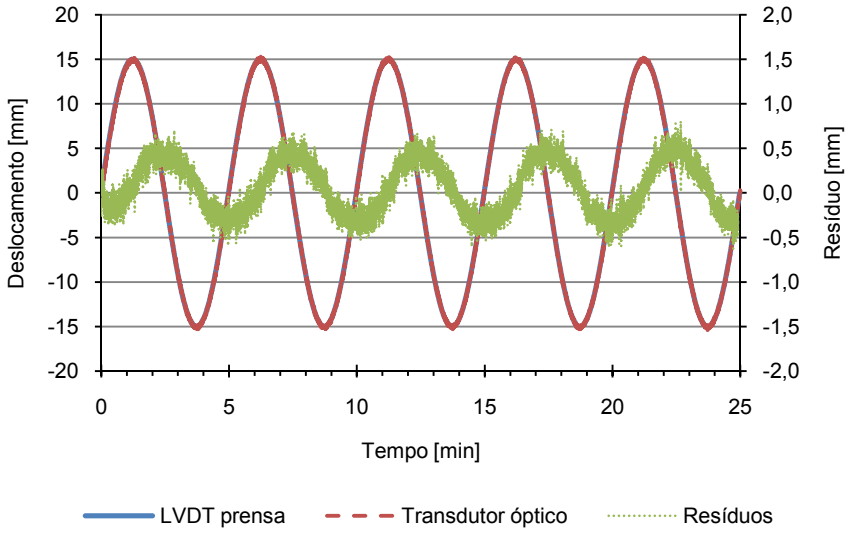


Figura 5.10 - Comparação dos deslocamentos obtidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa e respectivo resíduo.

Na Figura 5.11 apresenta-se o gráfico de correlação entre o deslocamento vertical medido pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico.

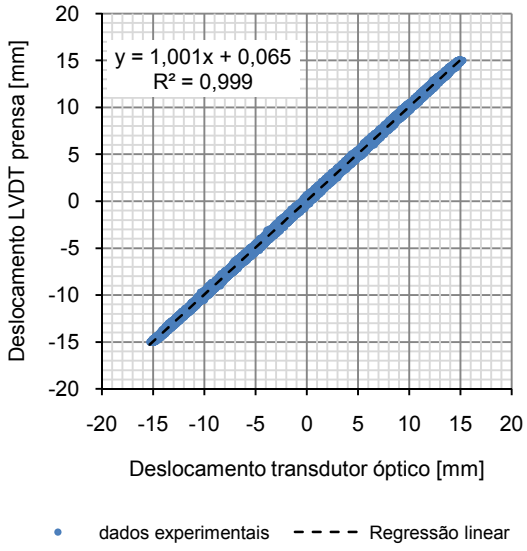


Figura 5.11 - Correlação entre os deslocamentos medidos pela prensa e pelo transdutor óptico.

Da análise da Figura 5.11 verifica-se que o declive da recta de regressão linear que se ajusta aos dados experimentais conseguidos tem declive praticamente igual a 1, indicando que o deslocamento vertical aplicado pelo actuador hidráulico é perfeitamente medido pelo transdutor óptico. Conclui-se desta forma que as constantes de calibração dos sensores estão bem definidas e optimizadas. O coeficiente de correlação linear obtido é também indicador do bom desempenho do sistema de níveis líquidos para este valor de velocidade de aplicação de deslocamento.

5.4.2. Ensaio 1.2

Com o aumento da frequência dos ciclos de deslocamentos impostos, espera-se que o erro associado à medição dos deslocamentos verticais seja maior do que o erro apresentado no ensaio anterior. Na Figura 5.12 apresenta-se o gráfico de comparação de deslocamentos medidos pelo LVDT do actuador hidráulico e pelo transdutor óptico.

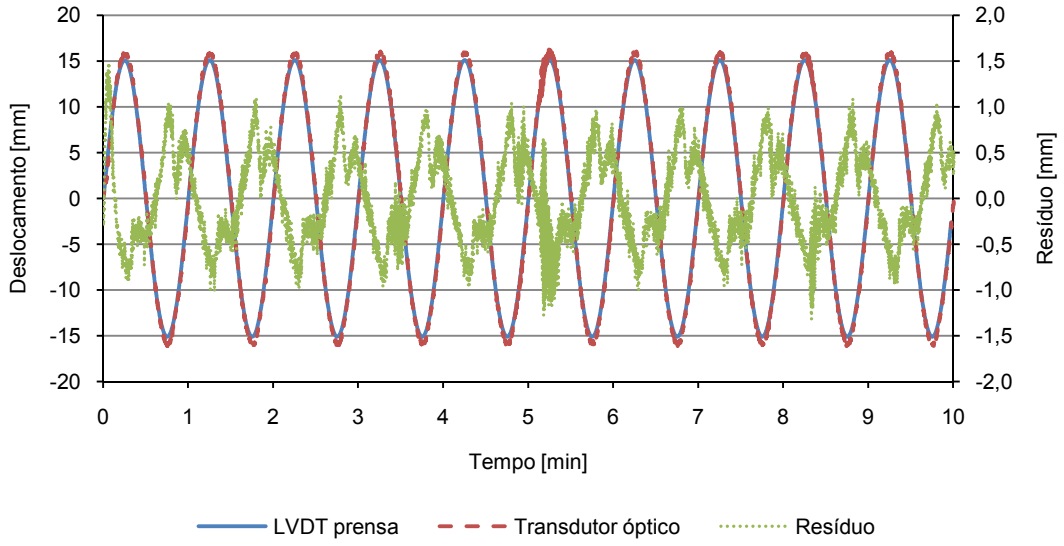


Figura 5.12 - Comparação dos deslocamentos verticais medidos pelos transdutores e respectivos resíduos.

Analisando a Figura 5.12 verifica-se que o deslocamento vertical medido pelo transdutor óptico acompanha de forma satisfatória o deslocamento imposto pelo actuador hidráulico. Contudo, verifica-se também que os picos de deslocamento máximo aplicado são sempre excedidos, em termos de leitura, por parte do transdutor óptico, quer nos valores máximos quer nos valores mínimos, situando-se o resíduo entre ±1mm. A justificação deste efeito prende-se com a frequência dos ciclos de deslocamentos impostos ao transdutor óptico. De facto, o aumento da frequência de oscilação do prato da prensa traduz-se, naturalmente, numa maior velocidade de aplicação dos deslocamentos. Assim, o escoamento da água nas condutas do circuito hidráulico, em resposta ao deslocamento imposto ao transdutor óptico activo, efectua-se também a uma maior velocidade. Consequentemente, sempre que há uma inversão do sentido de aplicação dos deslocamentos (um máximo ou um mínimo da série temporal de deslocamentos aplicados pelo actuador hidráulico), o escoamento da massa de água deslocada terá também de inverter o seu sentido. Contudo, dado que comparativamente ao ensaio anterior a velocidade com que essa massa de água se desloca é maior, o tempo necessário ao anulamento da velocidade e à inversão do sentido de escoamento da massa de água deslocada é também maior. Desta forma, enquanto o actuador hidráulico inverte rapidamente o sentido de aplicação dos deslocamentos, o sistema de níveis líquidos revela um ligeiro "atraso" na respectiva

inversão do sentido de escoamento, levando a que os deslocamentos medidos pelo transdutor sejam ligeiramente superiores àqueles que foram realmente aplicados. Esta diferença na medição de deslocamentos será tanto maior quanto maior for a massa de água deslocada pelo escoamento representando, no fundo, a inércia do sistema à inversão do movimento. Quanto à série de resíduos, os seus valores máximos são registados nos picos de deslocamento e mantêm-se constantes ao longo dos vários ciclos de deslocamento aplicados. Na Figura 5.13 apresenta-se o gráfico de correlação entre os deslocamentos verticais medidos pelos transdutores do sistema de níveis líquidos e pelo actuador hidráulico.

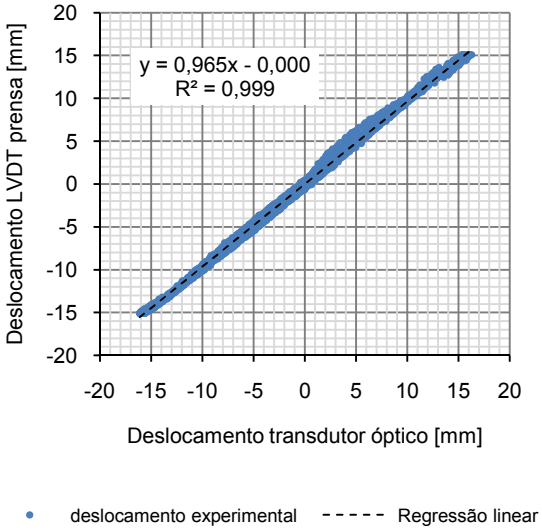


Figura 5.13 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos.

De acordo com a Figura 5.13, observa-se a existência de uma forte correlação linear entre os deslocamentos verticais medidos por cada um dos transdutores de deslocamento. Por sua vez, o declive da recta de regressão é menor do que no caso do ensaio anterior, consequência da diferença entre deslocamentos medidos e aplicados nos picos das séries.

5.4.3. Ensaio 1.3

À semelhança do sucedido nos ensaios 1.2, com o aumento da velocidade de aplicação dos deslocamentos verifica-se novamente um aumento do erro de medição associado ao transdutor óptico. Neste ensaio, a série de resíduos situa-se nos ±3mm, ao longo de todo o tempo de ensaio, como ilustrado na Figura 5.14.

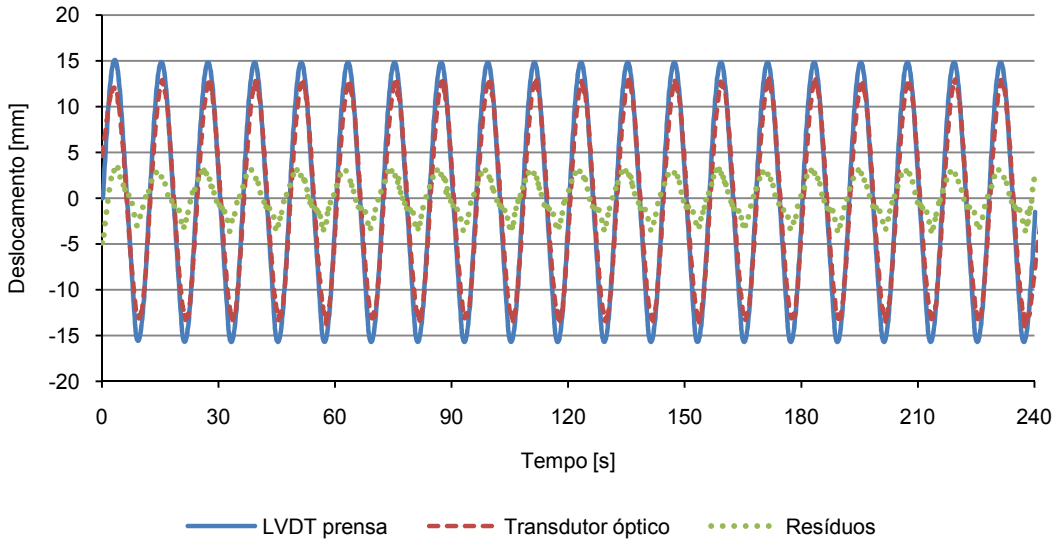


Figura 5.14 - Comparação do deslocamento registado pela prensa, pelo transdutor óptico e respectivo resíduo.

De facto, tal como esperado, o resíduo de medição do transdutor óptico aumentou com o aumento da frequência de aplicação dos ciclos de deslocamento. Mais uma vez se justifica tal facto pelo aumento da velocidade de escoamento do fluído nos vasos do circuito hidráulico.

Na Figura 5.15 apresenta-se o gráfico de correlação entre os deslocamentos verticais medidos pelos sensores ópticos e pelo LVDT da prensa. Verifica-se que continua a haver uma boa correlação linear entre os deslocamentos registados pelos dois transdutores. Verifica-se também que desta vez a dispersão de resultados é maior, tal como esperado. Olhando para o declive da recta de regressão linear, constata-se que este é superior à unidade, indicando o facto do deslocamento vertical medido pelo transdutor óptico ser menor do que o efectivamente aplicado pelo actuador hidráulico.

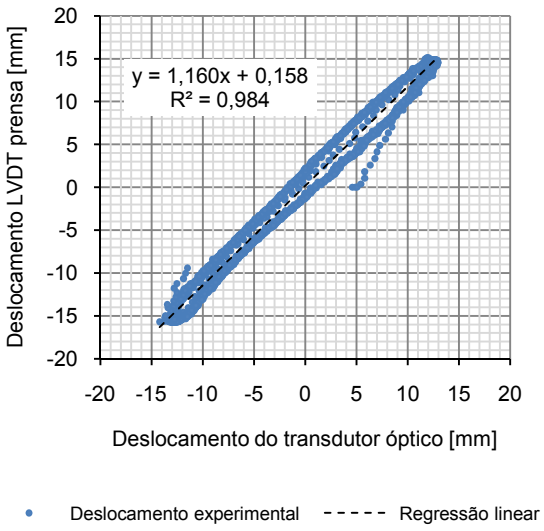


Figura 5.15 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico.

5.4.4. Ensaio 1.4

Na Figura 5.16 apresentam-se os gráficos das séries temporais relativas ao ensaio 1.4. Dada a frequência de aplicação de deslocamentos definida ser relativamente elevada, o actuador hidráulico que aplicou os ciclos de deslocamento não foi capaz de responder convenientemente. Assim, para além da instabilidade registada no período inicial do ensaio, o actuador hidráulico foi apenas capaz de aplicar ciclos com amplitude de ±5mm, aproximadamente. Analisando a Figura 5.16 (b), conclui-se que o resíduo do transdutor óptico associado à leitura de deslocamento regista alguma instabilidade no período inicial, resultante da instabilidade do próprio actuador hidráulico, estabilizando no restante período de ensaio. Neste caso em particular, existem maiores dificuldades para se conseguir uma boa sincronização das séries de dados, dada a elevada frequência de oscilação definida.

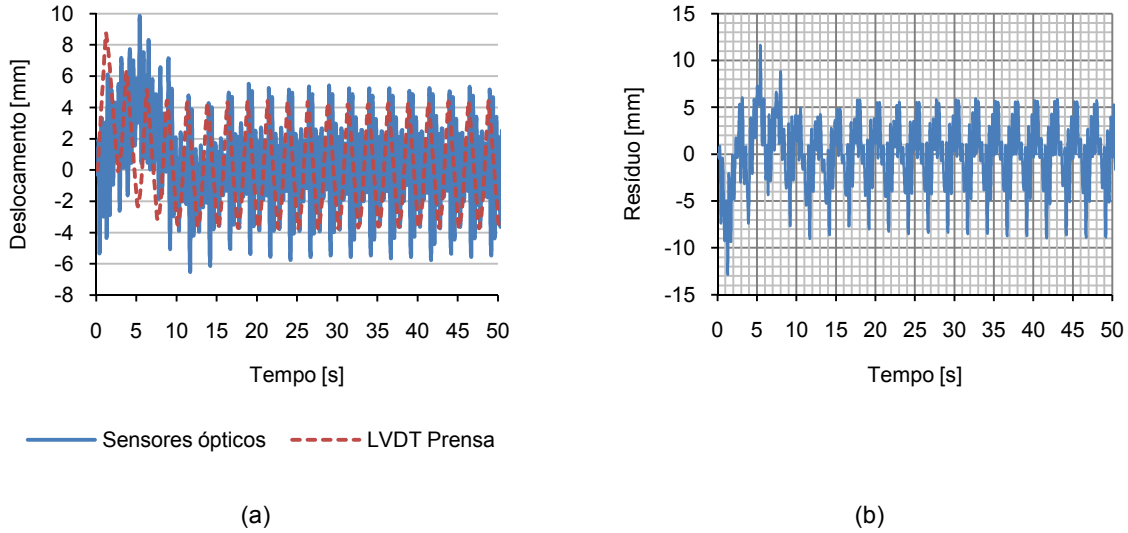


Figura 5.16 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b).

Na Figura 5.17 apresenta-se a correlação entre os deslocamentos obtidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico. Verifica-se que, para a frequência em causa, deixa de haver correlação linear entre os deslocamentos registados pelo transdutor de cada um dos sistemas de medição.

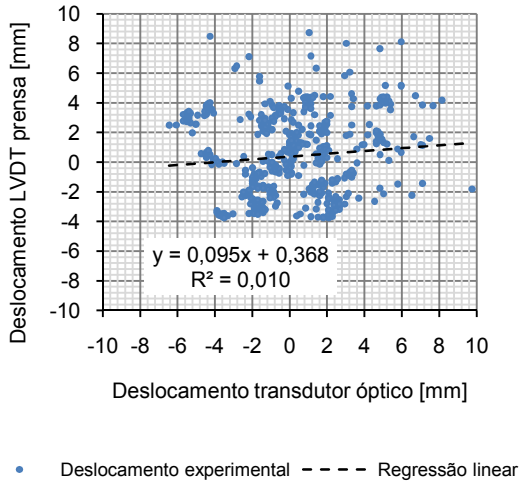


Figura 5.17 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos.

5.4.5. Ensaio 1.5

No presente ensaio, a frequência de aplicação dos ciclos de deslocamento foi definida em 2Hz. Verifica-se por análise do gráfico da Figura 5.18 (a) que, mais uma vez, o actuador hidráulico não foi capaz de responder de forma adequada à lei de deslocamentos solicitada. Contudo, apesar da grande instabilidade, verifica-se que a medição dos deslocamentos por parte do transdutor óptico segue o comportamento imposto pela prensa mas, desta vez, com grande ruído. A existência deste ruído deve-se à ondulação da superfície livre da coluna líquida gerada pelo escoamento da água, com velocidade não desprezável, no circuito hidráulico.

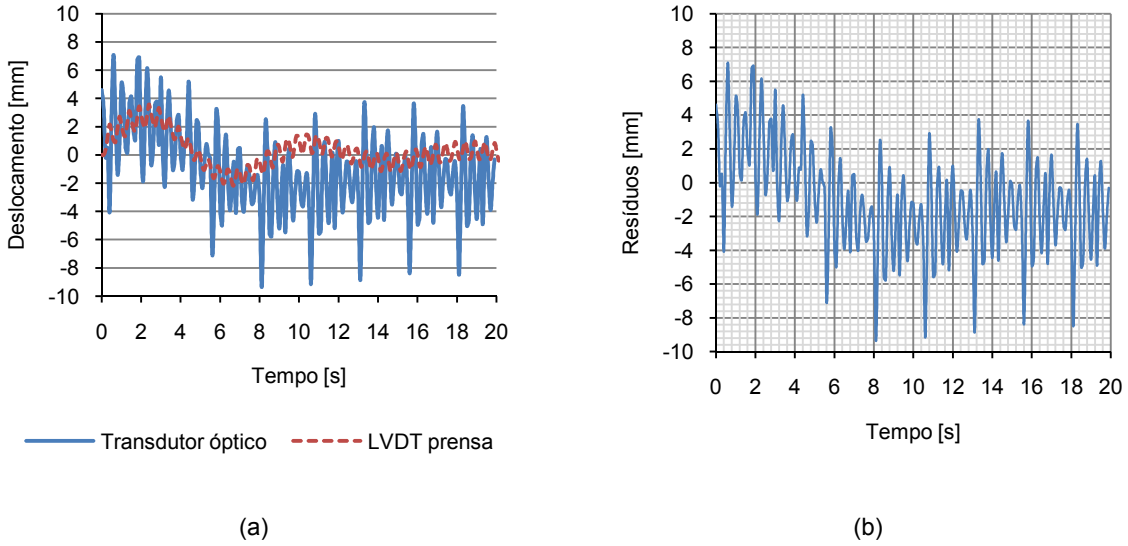


Figura 5.18 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b).

Mais uma vez, tal como no ensaio anterior, não é observada uma boa correlação linear entre os deslocamentos medidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa hidráulica.

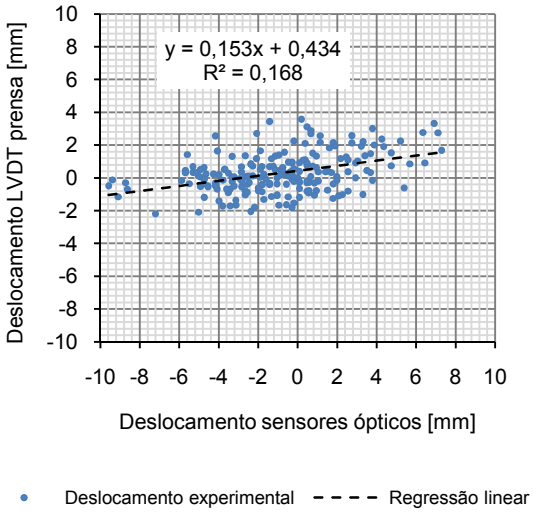
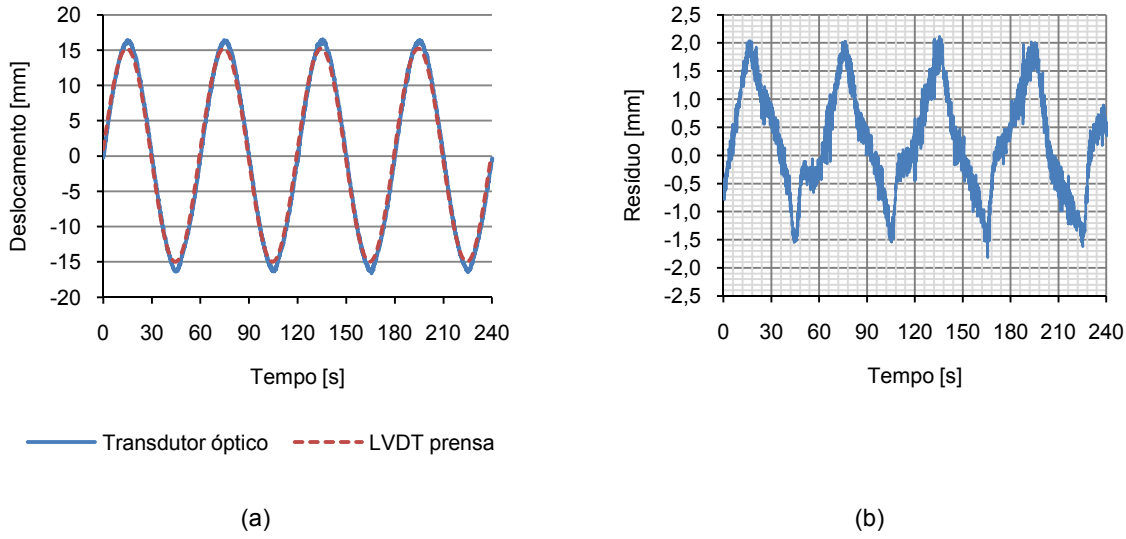


Figura 5.19 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico.

Dada a incapacidade do actuador automático definir correctamente os ciclos dos últimos dois ensaios, os resultados obtidos são considerados sem significado e, consequentemente, inconclusivos. A degradação da qualidade dos resultados obtidos com o aumento da frequência dos ciclos de deslocamentos aplicados revela, tal como esperado, que o sistema de níveis líquidos tem uma resposta inadequada quando sujeito a velocidades de escoamento elevadas.

5.4.6. Ensaio 4.2

Na quarta série de ensaios, o ensaio 4.1 não foi realizado. No ensaio 4.2 aplicaram-se quatro ciclos de deslocamento à cadência de um ciclo por minuto. Na Figura 5.20 (a) apresenta-se a série temporal de deslocamentos e a Figura 5.20 (b) mostra os resíduos das leituras do transdutor óptico relativamente ao LVDT da prensa. À semelhança do sucedido nos ensaios anteriores, também aqui os valores máximos dos resíduos são praticamente constantes ao longo do tempo. Relembre-se que no ensaio 1.2, a amplitude dos resíduos rondava ±1mm ao contrário deste ensaio em que o valor máximo dos resíduos vale 2mm. Este valor, corresponde a um erro relativo a rondar 13% do deslocamento vertical imposto. Desta forma, verifica-se que existe semelhança de resultados entre os ensaios 1.2 e 4.2, excepto no valor máximo dos resíduos obtidos. De facto, neste caso, obteve-se sensivelmente o dobro do registado no ensaio 1.2.



(a) (b)

Figura 5.20 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos sensores ópticos (a) e respectivo resíduo associado (b).

Na Figura 5.21 apresenta-se o gráfico de correlação dos deslocamentos medidos pelo transdutor óptico e pelo LVDT da prensa hidráulica. Mais uma vez, à semelhança da Figura 5.13, existe uma forte correlação linear entre os deslocamentos medidos por ambos os transdutores. A variação do valor do coeficiente de correlação linear, comparativamente ao respectivo valor obtido no ensaio 1.2 é de 0,1% e a variação do declive da recta de regressão linear é inferior a 4%. Estes resultados validam a repetibilidade de resultados obtidos pelo sistema nos diversos ensaios.

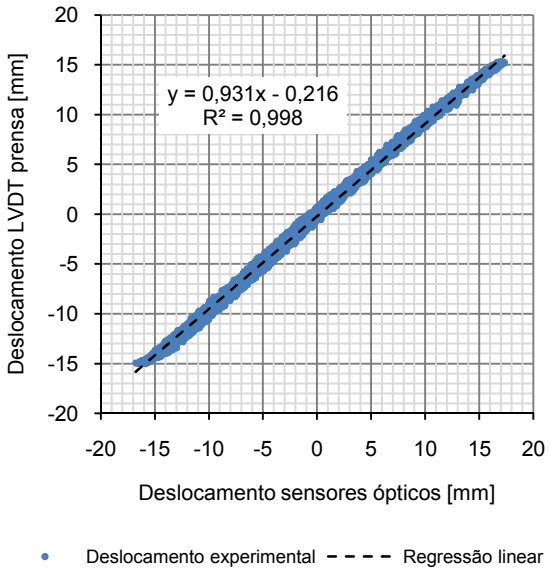
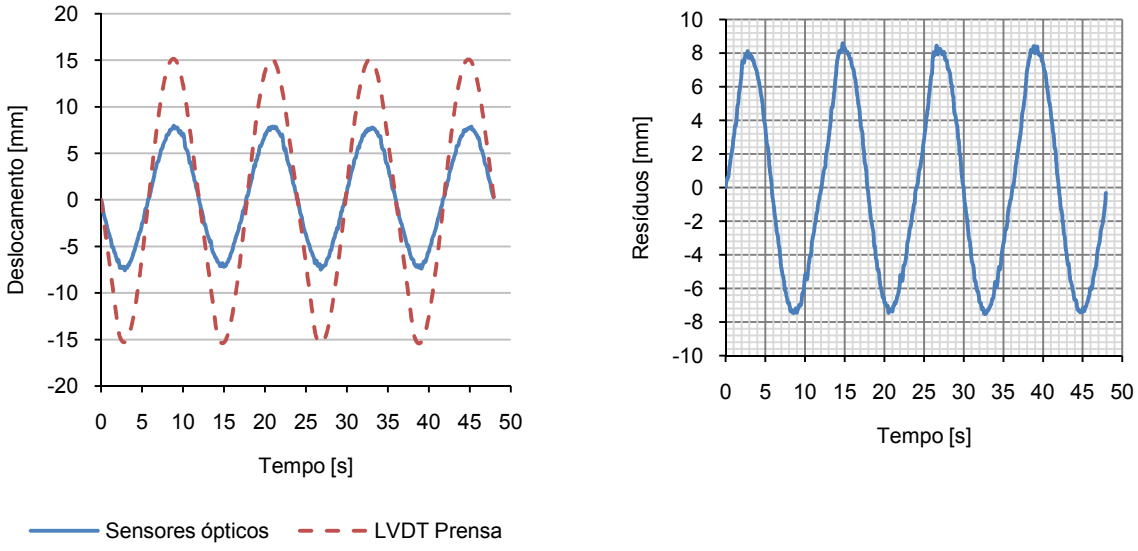


Figura 5.21 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico.

5.4.7. Ensaio 4.3

No ensaio 4.3, os deslocamentos obtidos pelo transdutor óptico correspondem a aproximadamente metade do deslocamento realmente aplicado pelo actuador hidráulico. De facto, apesar das séries de deslocamentos se encontrarem perfeitamente sincronizadas, os resíduos relativos à Figura 5.22 (a) chegam a atingir os ±8mm correspondendo a um erro relativo de aproximadamente 53%.



(a) (b)

Figura 5.22 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b).

O coeficiente de correlação linear apresentado na Figura 5.23 é próximo da unidade, revelando a existência uma forte correlação entre as séries de deslocamentos. Contudo, dada a diferença de valor

dos deslocamentos máximos obtidos, o declive da recta de regressão linear das séries apresentadas é próximo de 2, revelando como já se tinha visto, que os valores de deslocamento obtidos pelo transdutor óptico correspondem sensivelmente a metade do valor de deslocamento realmente imposto pelo actuador hidráulico.

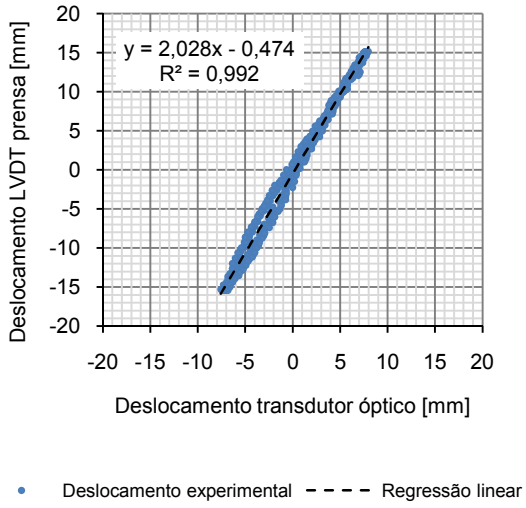
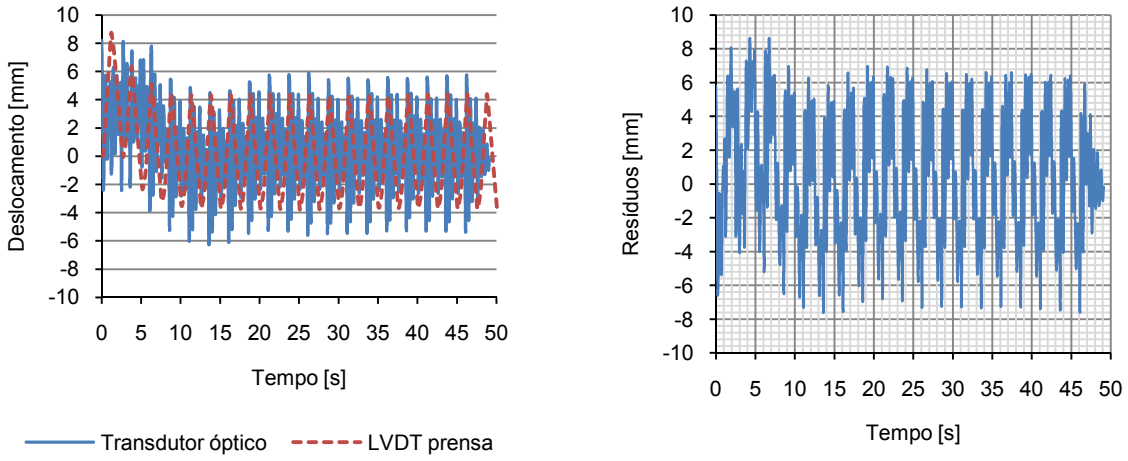


Figura 5.23 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores ópticos.

O comportamento do transdutor óptico observado na Figura 5.22, apesar de estranho, leva a concluir que o sistema de níveis líquidos não funciona de forma adequada quando os transdutores que o compõem são submetidos à aplicação de deslocamentos a velocidades elevadas.

5.4.8. Ensaio 4.4

No ensaio 4.4 o comportamento instável da prensa na parte inicial do ensaio voltou a repetir-se, como se observa na Figura 5.24. Sensivelmente após os primeiros 20 segundos de ensaio, o deslocamento aplicado pela prensa estabilizou nos ±4mm e o deslocamento medido pelo transdutor óptico oscilou entre os ±6mm.



(a) (b)

Figura 5.24 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelo transdutor óptico (a) e respectivo resíduo associado (b).

Novamente, dada a incapacidade do actuador automático definir correctamente os ciclos de deslocamento, os resultados obtidos são considerados inconclusivos. Tal como sucedeu no ensaio 1.4, também neste ensaio não foi observada a existência de correlação entre os deslocamentos medidos e aplicados, resultando numa nuvem dispersa de resultados experimentais, como se ilustra na Figura 5.25.

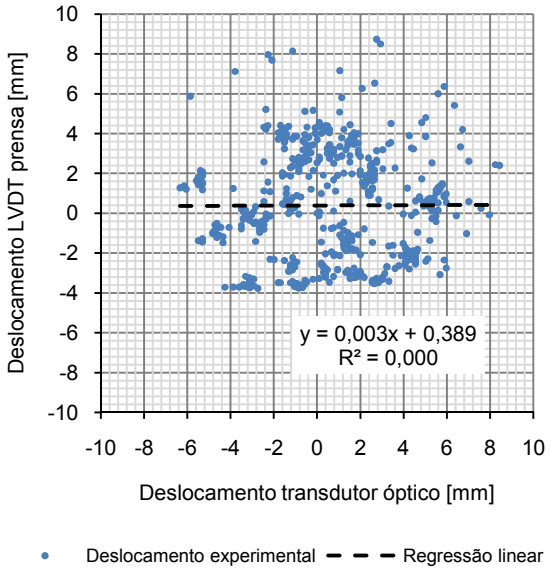


Figura 5.25 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelo transdutor óptico.

Analisando a Figura 5.25, conclui-se que não existe qualquer correlação linear entre os deslocamentos medidos pelo LVDT do actuador hidráulico e pelos sensores de fibra óptica. Esta ausência de correlação linear deve-se, tal como se concluiu no ensaio 1.4, à instabilidade da superfície livre da coluna líquida em todo o circuito hidráulico, gerada pelo aumento de velocidade imposto ao escoamento. Desta forma, o sistema encontra-se longe do equilíbrio iminentemente hidrostático, por força da frequência de deslocamentos utilizada no ensaio.

5.5. ENSAIOS LABORATORIAIS COM SENSORES ELÉCTRICOS

Para o mesmo conjunto de ensaios, apresentam-se seguidamente os resultados obtidos para os transdutores eléctricos. À semelhança do que foi feito para o transdutor óptico, o deslocamento vertical medido pelos transdutores SP2 e SP3 foi obtido pela diferença da variação de deslocamento vertical do transdutor activo e do transdutor de referência, SP1, de acordo com as equações (5.4) e (5.5). No presente capítulo são apenas apresentados os resultados dos ensaios correspondentes aos ensaios apresentados para o transdutor óptico. Um conjunto de representações gráficas relativas ao segundo e terceiro conjunto de ensaios encontram-se no Anexo A2 desta dissertação.

$$\delta^{SP2} = \delta_v^{SP2} - \delta_v^{P1} \tag{5.4}$$

$$\delta^{SP3} = \delta_v^{SP3} - \delta_v^{SP1} \tag{5.5}$$

5.5.1. Ensaio 1.1

Na Figura 5.26 apresentam-se os dados relativos aos transdutores eléctricos registados para o ensaio 1.1. Analisando o gráfico, verifica-se que o comportamento do erro de leitura de ambos os transdutores eléctricos é semelhante e geralmente situa-se entre os ±0,5mm, à semelhança do que foi obtido para os transdutor óptico. De facto, este resultado vai ao encontro das expectativas, dada a frequência relativamente baixa que foi aplicada aos transdutores do sistema de níveis líquidos.

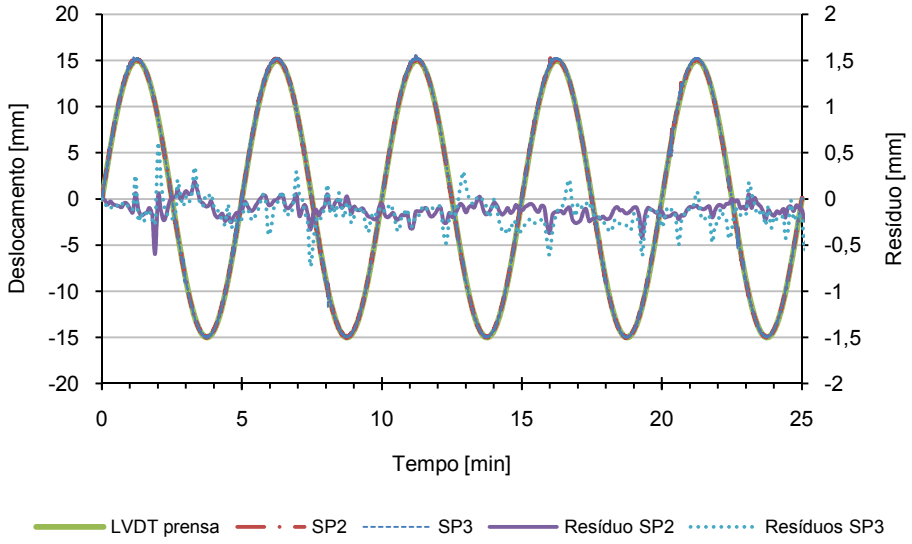
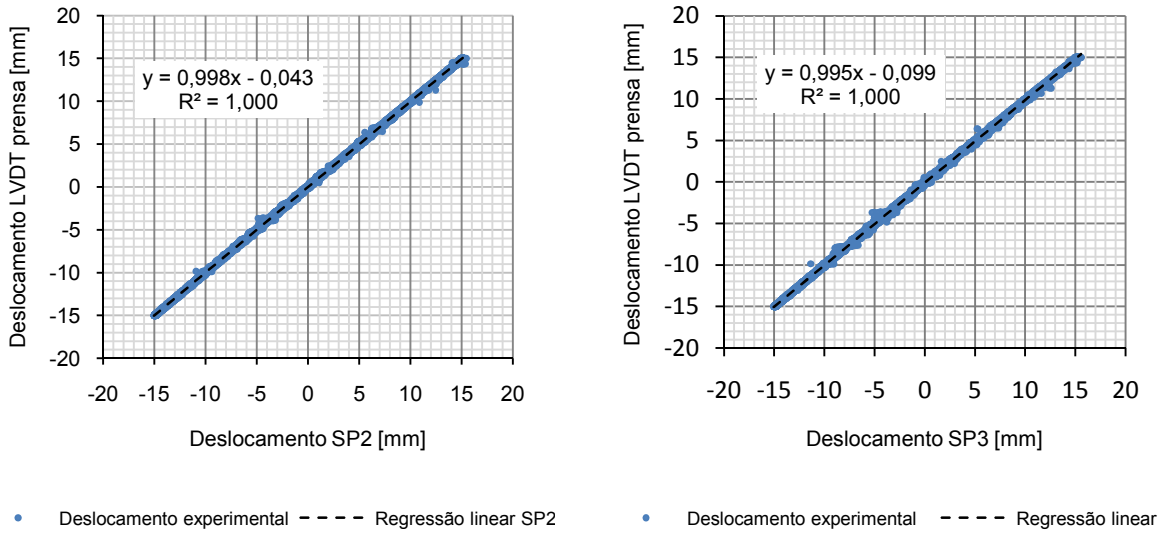


Figura 5.26 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos.

Na Figura 5.27 (a) e (b) apresentam-se os gráficos de correlação linear entre os deslocamentos medidos pelo LVDT do actuador hidráulico e pelos transdutores SP2 e SP3, respectivamente. Verifica-se, tal como esperado, que o comportamento dos sensores eléctricos é semelhante. O valor do coeficiente de correlação linear, em ambos os casos, revela a existência de uma linearidade perfeita entre os deslocamentos medidos e os efectivamente aplicados. O declive das rectas de regressão linear

obtidas é muito próximo de 1, revelando que as constantes de calibração dos sensores se encontram correctamente definidas.

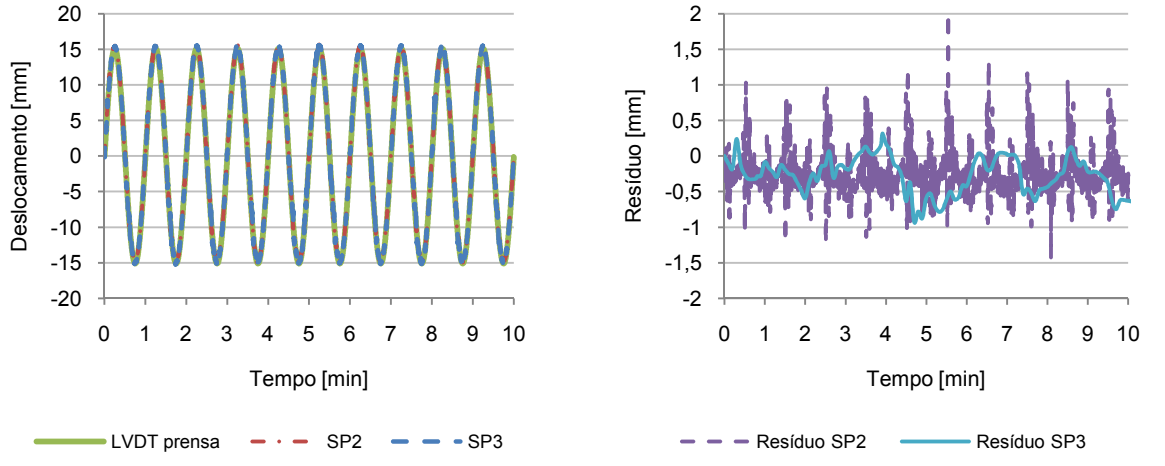


(a) (b)

Figura 5.27 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

5.5.2. Ensaio 1.2

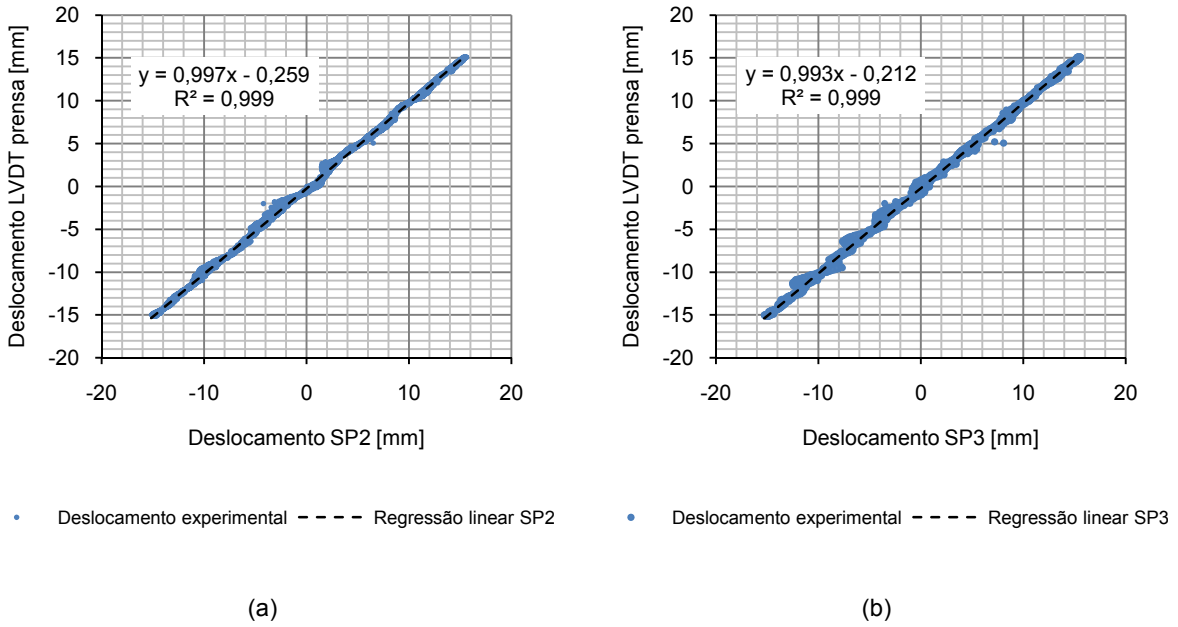
Na Figura 5.28 apresenta-se a comparação dos deslocamentos resultantes da medição dos transdutores eléctricos com os valores obtidos da leitura do LVDT da prensa. Mais uma vez, à semelhança do sucedido com o transdutor óptico, o transdutor eléctrico SP2 regista um valor de resíduo com a mesma ordem de grandeza (±1mm). Contudo, as medições do transdutor SP3 dão origem a uma série de resíduos menos "dispersa" e com menor amplitude do que a relativa ao transdutor SP2, como se verifica pela análise da Figura 5.28 (b).



(a) (b)

Figura 5.28 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).

Da análise da Figura 5.29, resulta a existência de uma grande semelhante no comportamento dos sensores SP2 e SP3. Verifica-se que para este ensaio os valores do declive das rectas de regressão linear e respectivos coeficientes de correlação reflectem uma excelente correlação entre os ciclos de deslocamento impostos pelo actuador hidráulico e as medições efectuadas pelos transdutores.

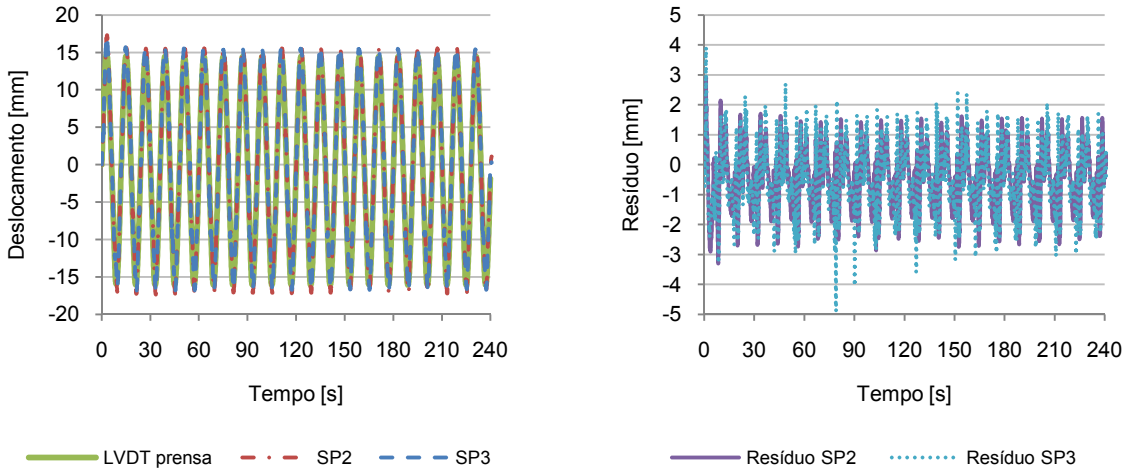


(a) (b)

Figura 5.29 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

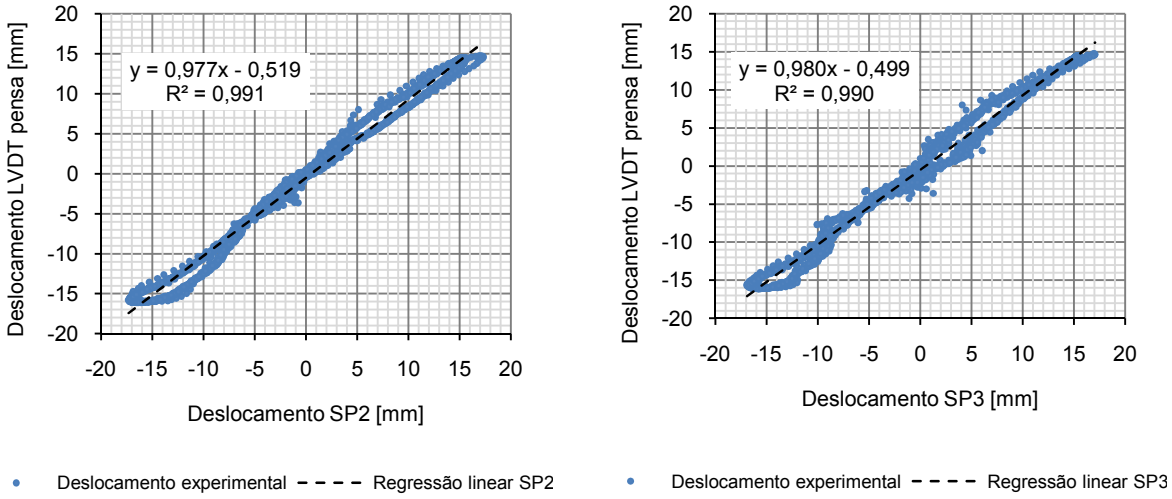
5.5.3. Ensaio 1.3

Seguidamente apresentam-se os resultados relativos às medições efectuadas pelos transdutores eléctricos no ensaio 1.3. Verifica-se que os resíduos de leitura dos transdutores SP2 e SP3 são estáveis ao longo do tempo de ensaio, não ultrapassando, na generalidade, os 3mm. Verifica-se novamente a existência de uma grande semelhança de comportamento entre ambos os transdutores, de acordo com a série de resíduos apresentada na Figura 5.30 (b). Também os declives das rectas de regressão linear e os respectivos coeficientes de correlação obtidos, são idênticos para ambos os transdutores eléctricos analisados, tal como se indica na Figura 5.31.



(a) (b)

Figura 5.30 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).



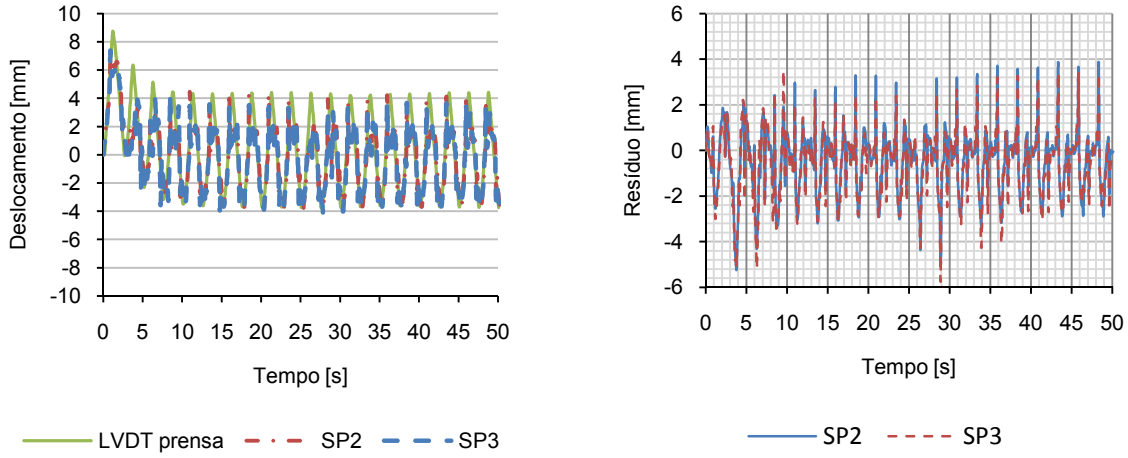
(a) (b)

Figura 5.31 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

5.5.4. Ensaio 1.4

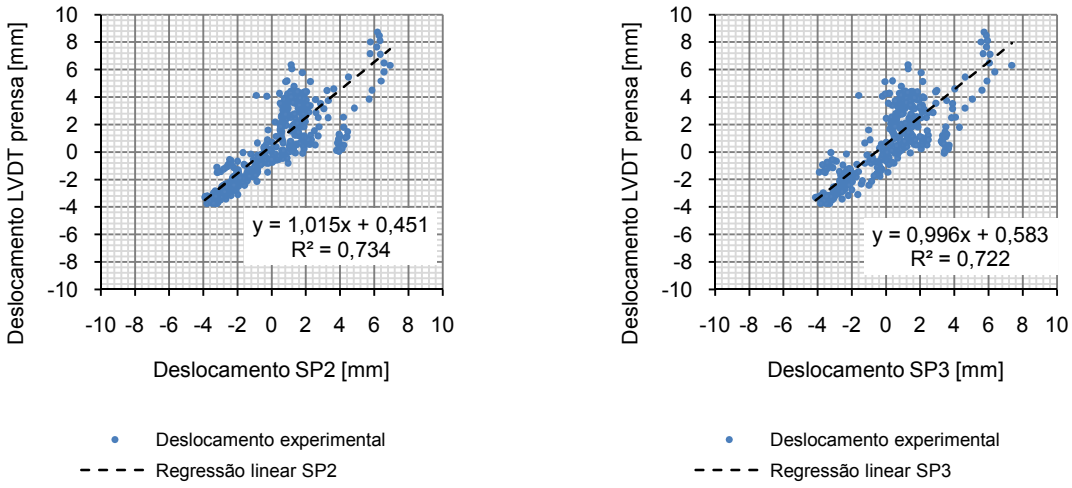
Na Figura 5.32 (b) observa-se que o comportamento dos resíduos de leitura dos transdutores eléctricos foi estável ao longo do tempo de ensaio. A correlação linear entre os deslocamentos medidos pelos transdutores eléctricos e o deslocamento medido pelo LVDT da prensa é notoriamente menos pronunciada, quando comparada com a correlação existente nos ensaios que se realizaram a uma frequência de aplicação de deslocamentos mais baixa. Contudo, comparando a Figura 5.32 (a) com a Figura 5.16 (a), verifica-se que as séries de deslocamentos medidos pelos transdutores eléctricos

apresentam um "ruído" menor do que a apresentada para o transdutor óptico. Esta constatação pode ser justificada pelo facto do transdutor óptico fazer movimentar um volume de água maior do que os transdutores eléctricos, provocando a ondulação da superfície livre da coluna de água e consequentemente um maior nível de ruído. Também os coeficientes de correlação linear obtidos para os transdutores SP2 e SP3 são semelhantes entre si e muito superiores aos obtidos na Figura 5.17. Este facto leva a concluir que os transdutores eléctricos parecem comportar-se melhor do que o transdutor óptico, no que respeita à cinemática dos deslocamentos impostos.



(a) (b)

Figura 5.32 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).



(a) (b)

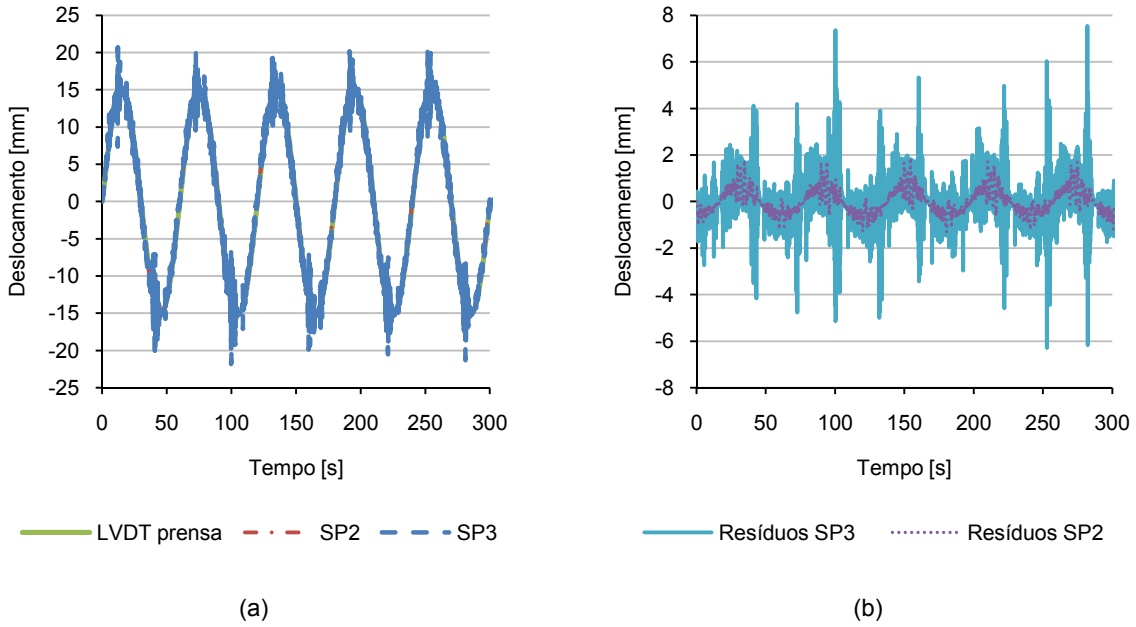
Figura 5.33 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

Seguidamente, apresentam-se os resultados relativos à comparação do desempenho dos transdutores eléctricos SP2 e SP3 na medição dos deslocamentos aplicados pelo actuador hidráulico. De acordo com o Quadro 5.1, neste conjunto de ensaios, os transdutores SP2 e SP3 foram submetidos às mesmas condições, excepto no que respeita ao estado da válvula de seccionamento da purga de ar. Desta

forma, a válvula de seccionamento da purga de ar do transdutor SP3 foi fechada enquanto a válvula de seccionamento da purga de ar do transdutor SP2 foi mantida aberta. Com este ensaio, pretende-se fazer uma análise comparativa do desempenho dos transdutores eléctricos na medição dos deslocamentos verticais, quando a superfície livre da coluna líquida existente sobre os sensores de pressão tem ou não capacidade para se deslocar.

5.5.5. Ensaio 4.2

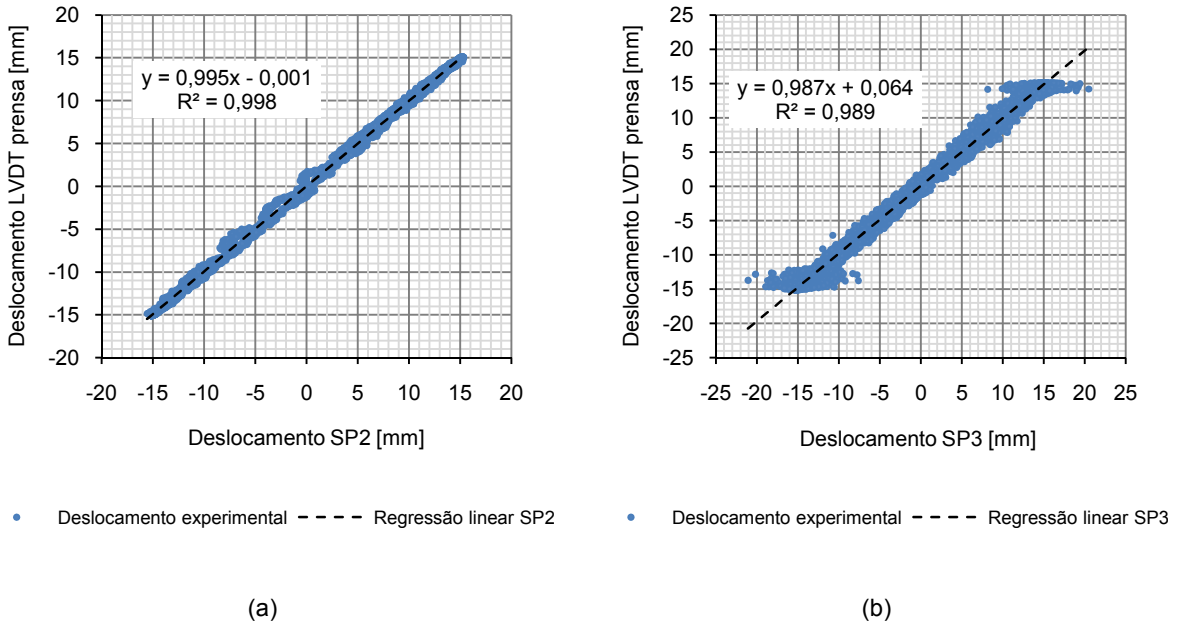
Na Figura 5.34 (a) apresenta-se a variação temporal dos deslocamentos medidos pelos transdutores SP2, SP3 e pelo LVDT do actuador hidráulico que procedeu à aplicação dos ciclos de deslocamento.



(a) (b)

Figura 5.34 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).

Analisando a Figura 5.34 (b) verifica-se que as séries temporais dos resíduos, relativos à medição dos deslocamentos impostos, apresentam comportamento semelhante. Contudo, o ruído na medição dos deslocamentos é maior no transdutor SP3, ou seja, no transdutor cuja válvula de seccionamento do ar se encontrava fechada. Nas zonas de aceleração máxima (picos dos ciclos de deslocamento), o transdutor que se encontra em carga regista picos de resíduos que ultrapassam os ±6mm enquanto o resíduo associado ao outro transdutor se situa em ±1mm. Na Figura 5.35 (b) verifica-se que a dispersão das leituras é superior no transdutor SP3 do que no sensor SP2 (Figura 5.35 (a)). Além disso, verifica-se que a maior dispersão é registada nos pontos de deslocamento máximo, aos quais correspondem as acelerações máximas. Este facto é justificado pelo princípio de funcionamento do sensor piezo-eléctrico que integra os sensores eléctricos. Efectivamente, o sensor piezo-eléctrico ao responder às acelerações sentidas faz variar a intensidade da corrente eléctrica emitida ao equipamento que faz a sua interrogação, resultando na medição errada de deslocamentos.

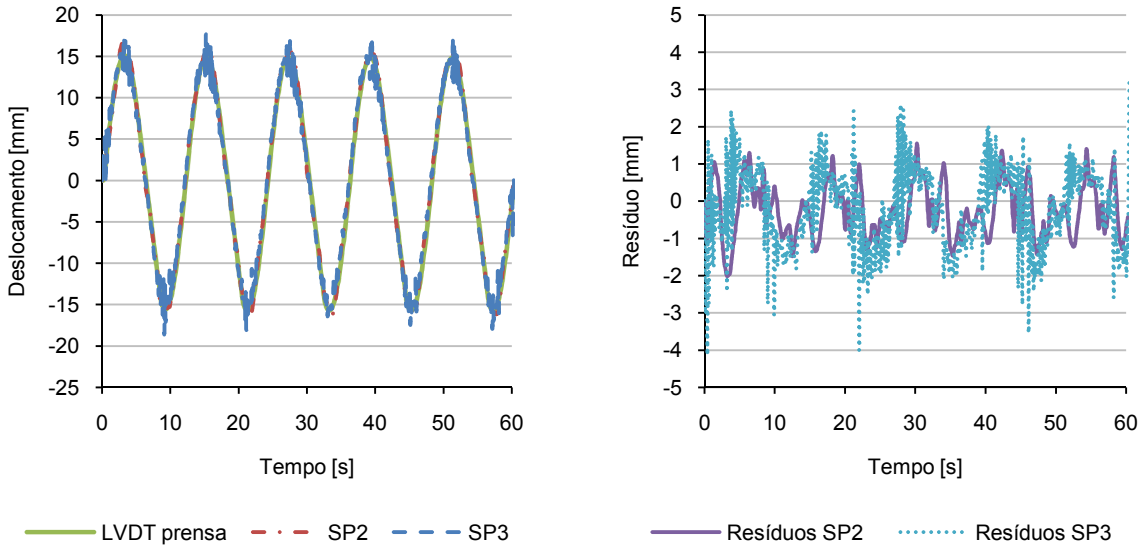


(a) (b)

Figura 5.35 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

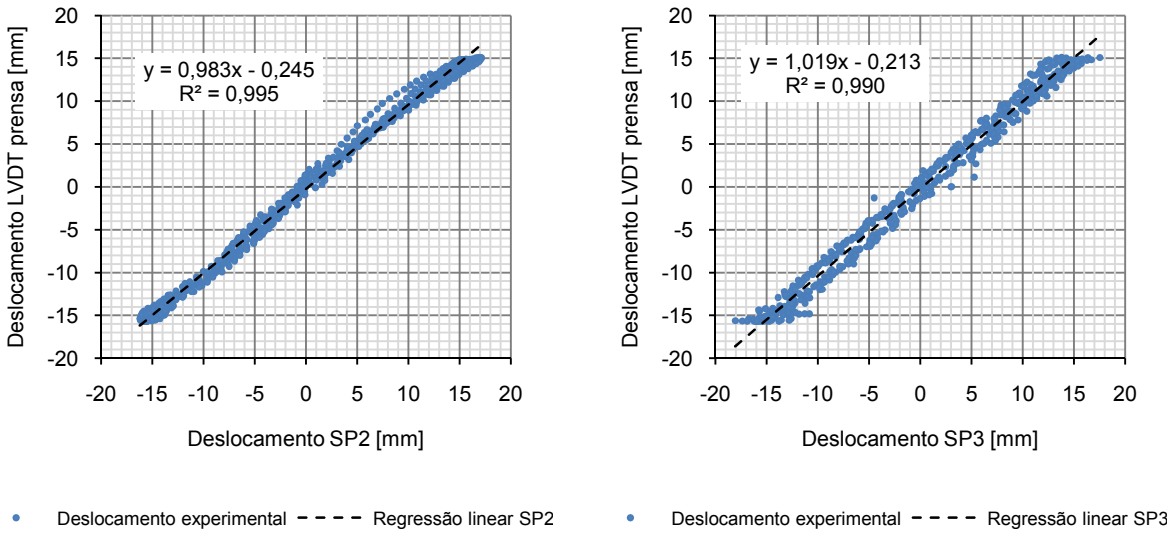
5.5.6. Ensaio 4.3

Aumentando a frequência de aplicação dos ciclos de deslocamentos, verifica-se que o comportamento dos transdutores testados é semelhante entre eles. Na Figura 5.36 (b) apresentam-se os resíduos de ambos os transdutores. Verifica-se, por análise do gráfico, que os erros associados a cada sensor são semelhantes. Contudo, olhando para os picos que pontualmente ocorrem no valor dos resíduos associados ao sensor SP3, constata-se que o comportamento deste transdutor se revela mais disperso (com maior nível de ruído). De acordo com o declive das rectas de regressão linear definidas na Figura 5.37, o sensor SP2 regista valores de deslocamento vertical ligeiramente superiores aos definidos pela prensa enquanto o sensor SP3 tem o comportamento contrário, registando picos de valores ligeiramente inferiores aos realmente impostos.



(a) (b)

Figura 5.36 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).

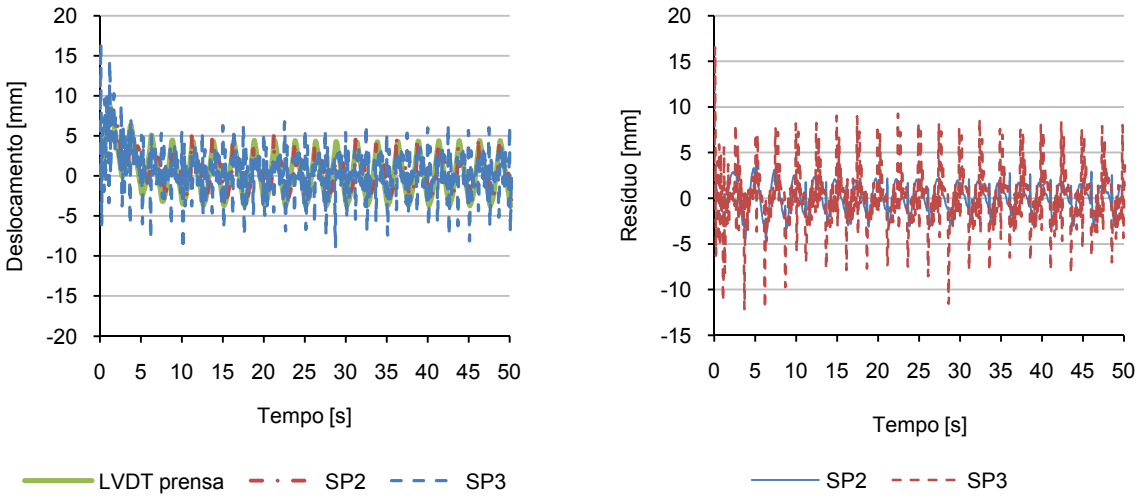


(a) (b)

Figura 5.37 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP3 (a) e SP2 (b).

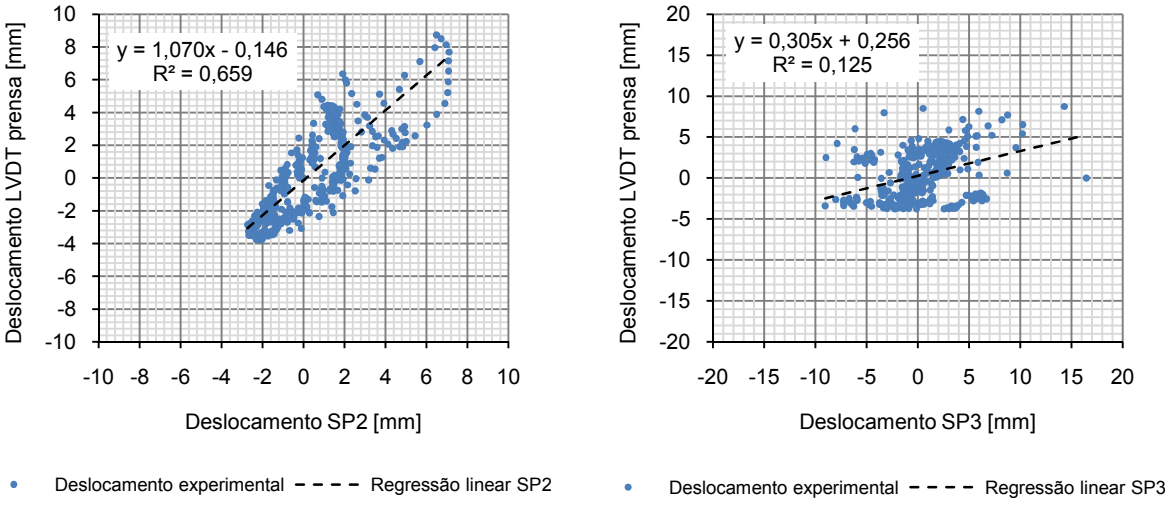
5.5.7. Ensaio 4.4

Analisando os resultados do ensaio 4.4, verifica-se que o erro de ambos os sensores é estável ao longo do tempo. O comportamento do erro de medição do transdutor SP3 é revela-se mais "instável" e mais disperso, ao longo do tempo de ensaio, do que erro associado ao transdutor SP2. Olhando para a Figura 5.39 verifica-se que, apesar de não existir uma forte correlação linear para nenhum dos transdutores, o seu valor é bastante maior no caso do transdutor SP2. Este facto revela um comportamento inadequado dos sensores eléctricos na medição de deslocamentos, quando a variação da altura da coluna líquida existente sobre o respectivo sensor piezo-eléctrico é impedida.



(a) (b)

Figura 5.38 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos sensores eléctricos (a) e respectivo resíduo associado (b).



(a) (b)

Figura 5.39 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos sensores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

5.6. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE COMPORTAMENTO DOS SENSORES NO TEMPO

O estudo da estabilidade do comportamento dos transdutores de deslocamentos verticais ao longo do tempo revela-se importante, na medida em que contribui para um melhor conhecimento da tendência evolutiva dos eventuais erros sistemáticos que afectam a precisão dos deslocamentos obtidos. Neste subcapítulo faz a análise da estabilidade de comportamento dos transdutores, ópticos e eléctricos, ao longo de um período de, sensivelmente, 48h. Para tal, quer os transdutores de referência quer os transdutores activos, foram colocados em repouso, ao longo de dois dias, no laboratório de estruturas da FEUP. Seguidamente, apresentam-se os resultados conseguidos, colocando-se um dos sensores eléctricos com a válvula de seccionamento de ar aberta (SP2) e outro com a válvula de seccionamento de ar fechada (SP3). O transdutor SP1 permaneceu com a válvula de seccionamento de ar aberta e serviu de referência aos transdutores SP2 e SP3. O ensaio decorreu entre os dias 2 a 4 de Junho de 2010, com início às 16h30.

5.6.1. Análise da estabilidade de comportamento dos sensores ópticos no tempo

Na Figura 5.40 apresenta-se a variação da leitura registada pelo transdutor óptico de referência ao longo do tempo. Verifica-se que ao final de 47 horas de ensaio, a variação do deslocamento foi de sensivelmente 0,8mm.

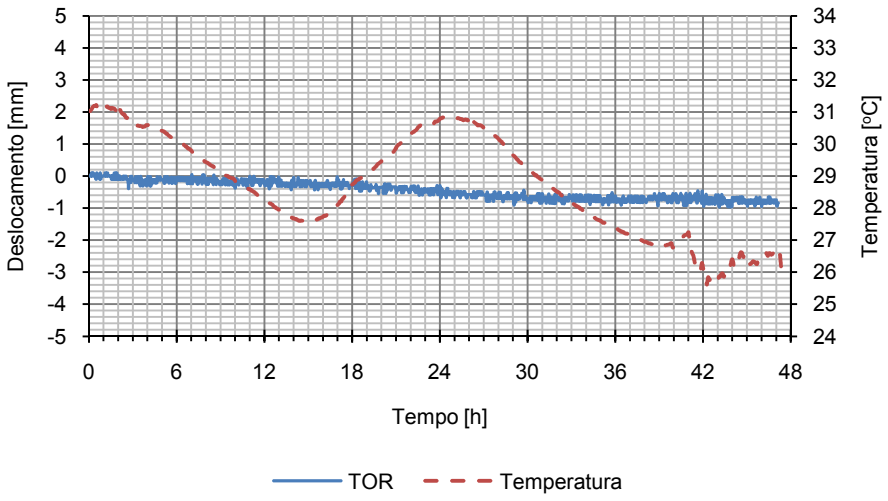


Figura 5.40 – Variação da leitura do sensor óptico do transdutor de referência.

Na Figura 5.41 apresenta-se a mesma representação registada para o transdutor activo. Verifica-se por análise do gráfico que nas primeiras 14 horas de ensaio o transdutor activo registou um deslocamento considerável, na ordem dos 3,8mm. A partir desse período, a variação do deslocamento continua a aumentar mas agora a uma velocidade bastante menor, idêntica à velocidade registada no transdutor de referência de tal forma que, subtraindo os valores de deslocamento registados por cada um dos transdutores, obtém-se praticamente um patamar constante, como se ilustra na Figura 5.42.

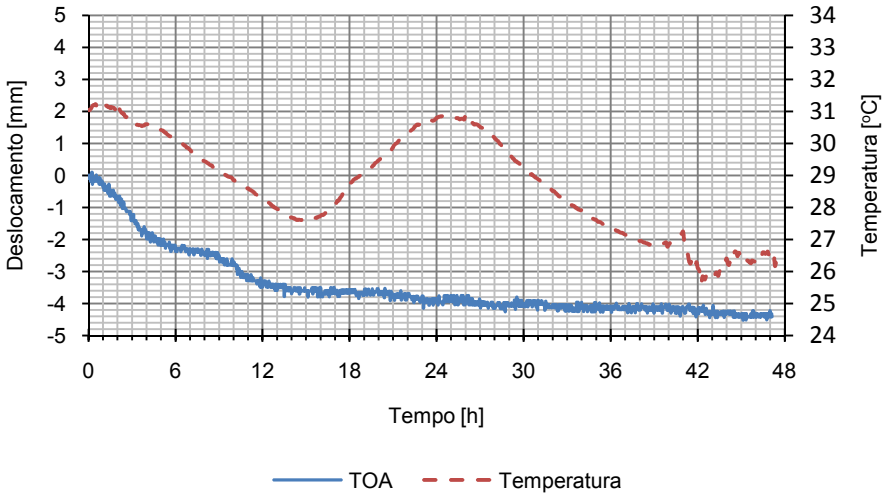


Figura 5.41 - Variação da leitura de deslocamento do transdutor óptico activo.

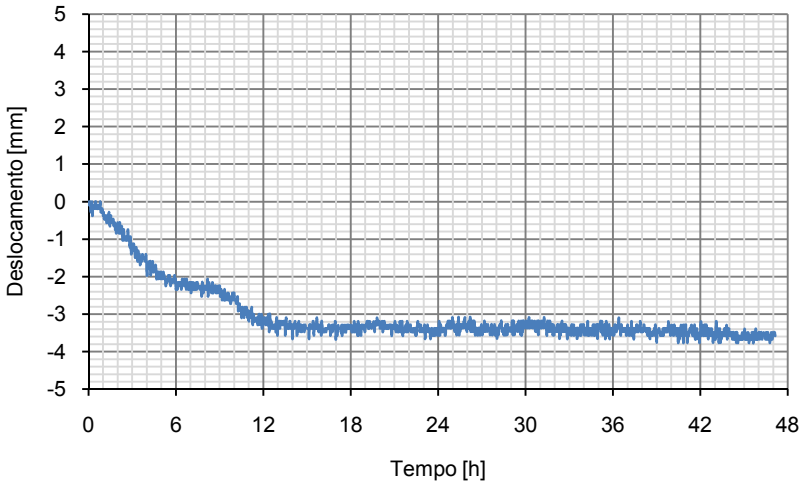


Figura 5.42 – Diferença entre as leituras de deslocamento do transdutor óptico activo e de referência.

A parte inicial do gráfico de variação dos deslocamentos ao longo do tempo é justificada pelo assentamento que o suporte do transdutor activo sofreu. De facto, a base onde o transdutor activo foi apoiado consistiu na fixação de um suporte a um pórtico existente no laboratório, que se veio a verificar ter sofrido um assentamento motivado pela eventual folga dos parafusos de fixação, sendo esta a origem do deslocamento anormalmente registado no período inicial do ensaio. Da análise da Figura 5.42, conclui-se que os transdutores ópticos, activo e de referência, têm um comportamento muito semelhante entre si, resultando em medições com pouca dispersão ao longo do tempo. Além do bom comportamento registado ao longo do tempo verifica-se, pelo baixo valor do coeficiente de correlação linear entre a variação do deslocamento e a variação da temperatura (R^2=0,327), que os sensores dos transdutores ópticos foram pouco sensíveis à variação da temperatura ambiente registada no interior do Laboratório de Estruturas.

5.6.2. Análise da estabilidade de comportamento dos sensores eléctricos no tempo

Na Figura 5.43 (a) representa-se a variação da leitura registada pelo transdutor eléctrico de referência, SP1, ao longo do tempo, bem como a variação da temperatura registada durante todo o período de ensaio. Na Figura 5.43 (b) ilustra-se a correlação linear existente entre os deslocamentos obtidos pelo sensor SP1 e a temperatura registada no interior do laboratório. De igual forma, na Figura 5.44 e na Figura 5.45 apresenta-se o mesmo conjunto de dados relativos aos transdutores eléctricos activos, SP2 e SP3, respectivamente.

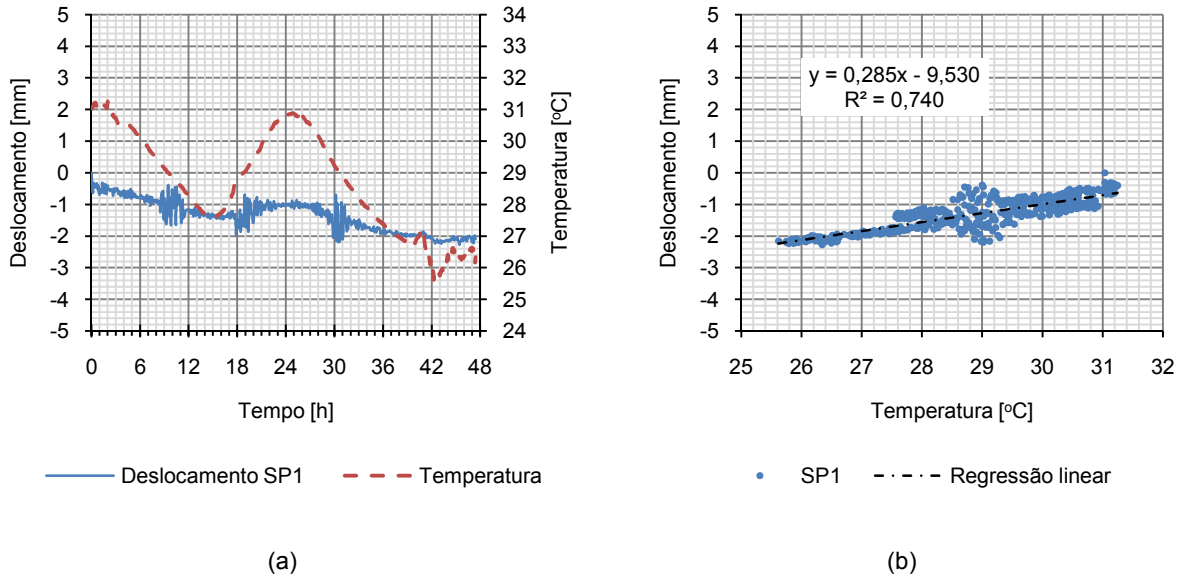


Figura 5.43 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP1 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b).

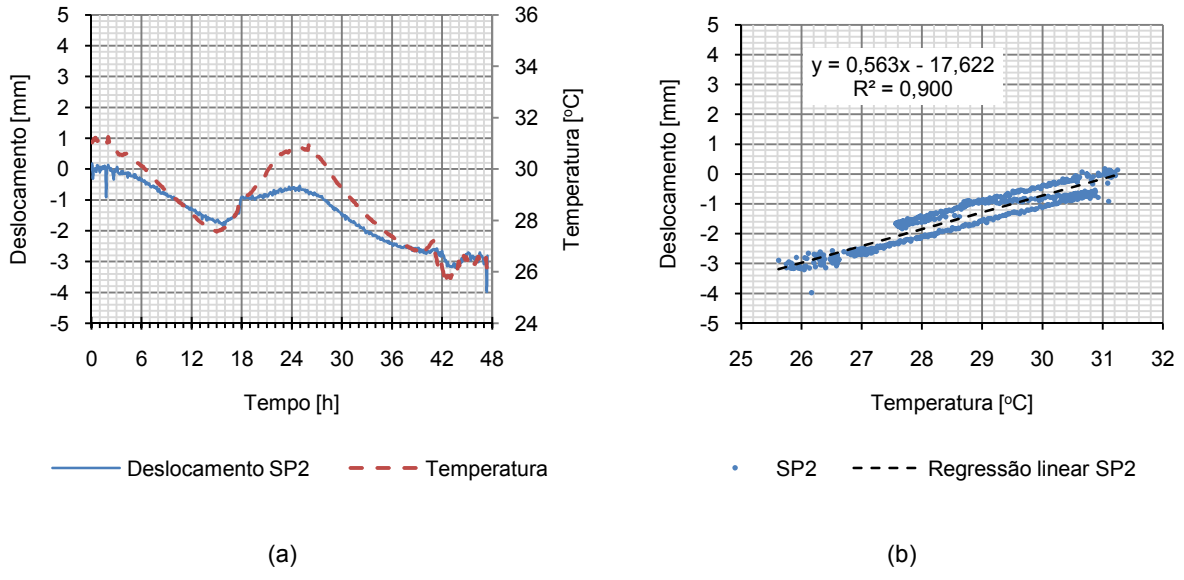
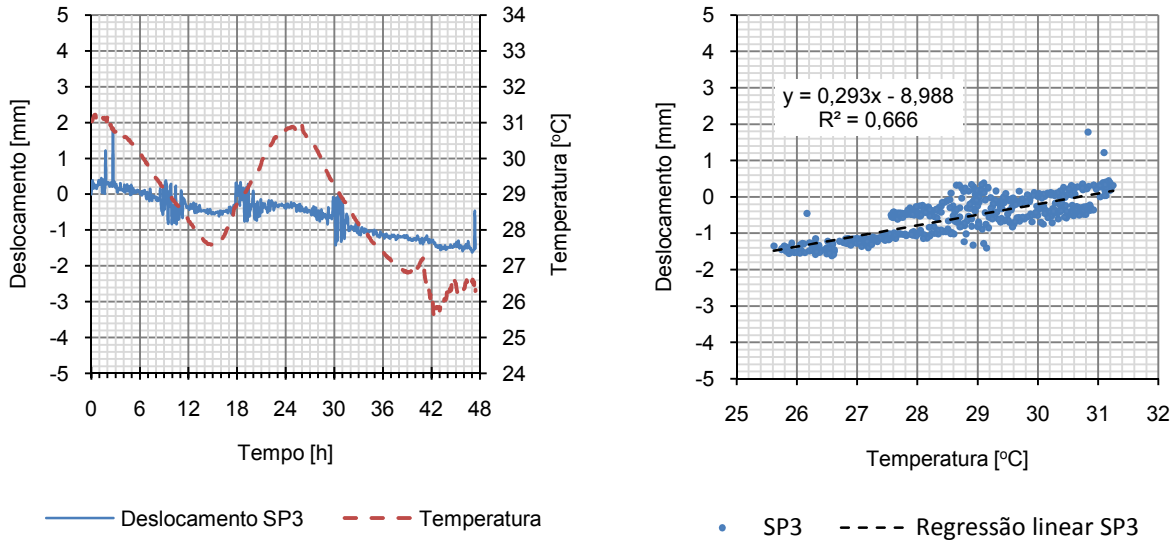


Figura 5.44 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP2 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b).



(a) (b)

Figura 5.45 – Variação dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP3 (a) e correlação linear entre a variação dos deslocamentos e da temperatura registados (b).

Da análise das figuras anteriores, verifica-se que o comportamento do transdutor eléctrico de referência, SP1, é semelhante ao comportamento do transdutor SP3. Contudo, o comportamento do transdutor SP2 não segue o comportamento dos outros dois transdutores. Olhando para os gráficos de correlação entre variação de deslocamento e variação de temperatura, verifica-se que Figura 5.44 (b) apresenta um coeficiente de correlação linear com a temperatura de 0,900, valor relativamente superior ao obtido para os outros dois sensores. Este facto pode ser relacionado com a sensibilidade de cada um dos sensores que compõem os transdutores testados à variação de temperatura.

Desta forma, os sensores eléctricos respondem à variação de temperatura com uma variação da intensidade do sinal que emitem para o sistema de interrogação, registando-se assim deslocamentos que na realidade não existem. Na Figura 5.46 ilustram-se os deslocamentos finais obtidos pelos transdutores eléctricos, subtraindo as leituras de cada um dos transdutores activos à leitura do transdutor de referência. Dada a semelhança de comportamento entre os transdutores SP1 e SP3, o resultado final da diferença de leituras registadas por cada um dos transdutores resulta num valor praticamente constante ao longo do tempo. Calculando a diferença entre as medições do transdutor SP2 e do sensor de referência, SP1, verifica-se, de acordo com a Figura 5.46 (a), que o comportamento da medição resultante é instável no tempo. A forte correlação entre a variação do deslocamento do transdutor SP2 e a variação da temperatura ambiente, demonstrada na Figura 5.44, confrontada com os resultados obtidos para os transdutores SP1 e SP3, leva a concluir que os sensores de pressão que compõem os transdutores apresentam sensibilidades muito diferentes à variação de temperatura. A origem das perturbações pontualmente registadas nos transdutores SP1 e SP3 não foi identificada.

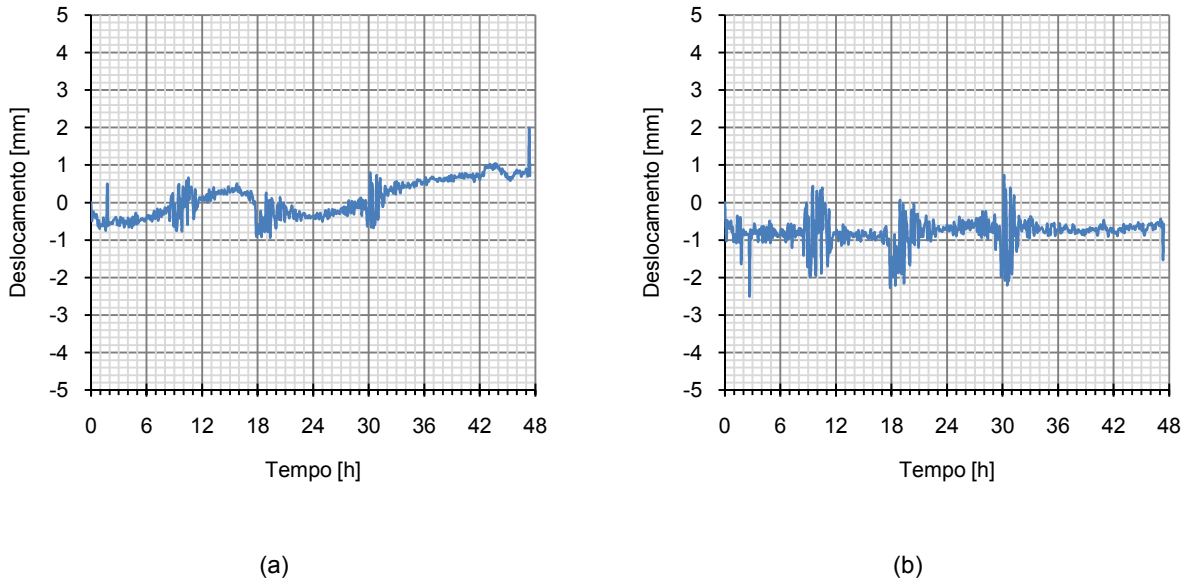


Figura 5.46 – Diferença dos deslocamentos medidos pelo transdutor SP1 e pelos transdutores SP2 (a) e SP3 (b).

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste subcapítulo, apresenta-se uma análise comparativa no que respeita aos condicionalismos, vantagens e desvantagens de cada tipo de transdutores de deslocamento vertical estudados. São também comparados os dados relativos ao desempenho demonstrado pelos transdutores ópticos e eléctricos no conjunto de ensaios realizados.

Assim, os transdutores eléctricos apresentam como vantagem a dimensão relativamente reduzida, quando comparada com a dimensão dos transdutores ópticos. No que respeita à facilidade de transporte e de instalação, os transdutores são equiparáveis. Os sensores ópticos, ao longo do tempo, são mais estáveis e menos sensíveis à variação de temperatura do que os sensores eléctricos. Além disso, os sensores eléctricos SP1 e SP3 registaram perturbações esporádicas cuja origem não foi identificada.

No Quadro 5.2 apresenta-se de forma comparativa o desempenho dos transdutores SP2 e SP3, testados de forma distinta no quarto conjunto de ensaios. Como foi dito, neste conjunto de ensaios, o transdutor SP2 continha a válvula de seccionamento do ar aberta enquanto o transdutor SP3 tinha a respectiva válvula fechada. Analisando o Quadro 5.2, verifica-se que o desvio-padrão dos resíduos de medição aumenta para mais do dobro quando se procede ao fecho da válvula de seccionamento do ar. Este resultado leva a concluir que os transdutores não respondem bem quando a superfície de coluna líquida, nas proximidades do sensor, é impedida de se deslocar.

Quadro 5.2 – Comparação do desempenho dos transdutores SP2 e SP3.

Ensaio	Média dos resíduos [mm]		Desvio-padrão dos resíduos [mm]	
	SP2	SP3	SP2	SP3
4.2	-0,0014	0,0649	0,4933	1,1042
4.3	-0,2582	-0,2074	0,7162	1,1014
4.4	0,1114	0,0548	1,6266	3,4246

No Quadro 5.3 faz-se a análise comparativa dos resultados obtidos para o transdutor óptico e para o transdutor eléctrico SP2 no conjunto da primeira série de ensaios. O ensaio 1.5 não foi apresentado por se considerar inconclusivo. Da análise do Quadro 5.3, conclui-se que o coeficiente de correlação linear entre o deslocamento do actuador hidráulico e o deslocamento medido pelos transdutores diminui com o aumento da frequência de aplicação dos ciclos. O transdutor eléctrico respondeu melhor do que o transdutor óptico ao aumento da frequência de aplicação dos ciclos de deslocamento. O desvio-padrão dos resultados obtidos com o transdutor óptico representa, geralmente, mais do dobro do desvio-padrão obtido para o transdutor eléctrico. O seu valor máximo, para ambos os transdutores, corresponde naturalmente ao ensaio 1.4 e, no caso do transdutor eléctrico, é ligeiramente inferior a 1,5mm. Para o caso do transdutor óptico, o valor do desvio-padrão é ligeiramente inferior a 3,5mm.

Quadro 5.3 – Comparação do desempenho do transdutor óptico e do transdutor eléctrico.

Ensaio	Transdutor óptico				Transdutor eléctrico			
	Erro [mm]		Regressão linear		Erro [mm]		Regressão linear	
	Média	Desvio-padrão	R^2	Declive da recta	Média	Desvio-padrão	R^2	Declive da recta
1.1	0,065	0,293	0,999	1,003	-0,043	0,129	0,998	1,000
1.2	-0,001	0,481	0,999	0,965	-0,237	0,205	0,999	0,993
1.3	0,142	1,981	0,984	1,160	-0,512	1,071	0,991	0,977
1.4	-0,202	3,444	0,010	0,098	-0,450	1,430	0,734	1,015

Desta forma, tendo por base os dados anteriores, conclui-se que os transdutores eléctricos responderam de forma mais adequada aos testes realizados em laboratório, em particular à medida que a frequência de aplicação dos deslocamentos aumenta. A ordem de grandeza do desvio-padrão do transdutor eléctrico, associada ao respectivo valor do coeficiente de correlação linear com os deslocamentos aplicados pelo actuador hidráulico, demonstra que, comparativamente ao transdutor óptico, o transdutor eléctrico responde melhor à cinemática dos deslocamentos aplicados, fornecendo resultados mais precisos do que os obtidos pelo transdutor óptico.

Na Figura 5.47 apresentam-se os valores de desvio-padrão dos resíduos das medições de deslocamento vertical do transdutor óptico e dos transdutores eléctricos, para os conjuntos de ensaios apresentados.

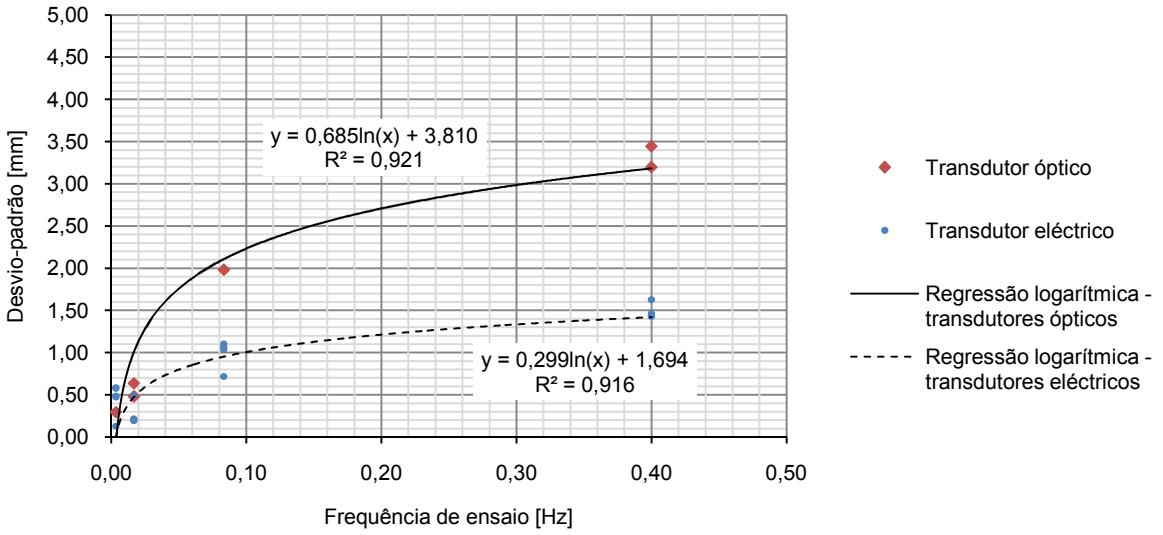


Figura 5.47 – Correlação entre a frequência de ensaio e o desvio-padrão dos resíduos de leitura dos transdutores ópticos e eléctricos.

Verifica-se por análise do gráfico representado na Figura 5.47 que, quer para o transdutor óptico, quer para os transdutores eléctricos, o valor do desvio-padrão do erro de medição associado possui uma boa correlação logarítmica com a frequência dos ciclos de deslocamento aplicados. De facto, esta boa correlação é confirmada pelo valor dos respectivos coeficientes de correlação definidos no gráfico. Assim, os erros de medição do transdutor óptico apresentam valores de desvio-padrão superiores aos dos transdutores eléctricos mas, em termos de comportamento, obedecem a uma "lei" de crescimento semelhante.

Desta forma, a grandeza do desvio-padrão dos erros de medição será função do tipo de sensor utilizado. Contudo, dada a semelhança de comportamento dos dois tipos de transdutores, a "lei" de crescimento do desvio-padrão estará relacionada com o sistema de medição utilizado, ou seja, com o sistema de níveis líquidos.

6

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A CASOS PRÁTICOS

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A versatilidade de utilização do sistema GNSS e o melhoramento das suas condições de utilização levaram ao alargamento das respectivas áreas de aplicação. Actualmente, os GNSS são aplicados nas áreas dos Transportes, Geodesia, Engenharia Civil [3], [4], [5], Agricultura [61], [62] ou mesmo na criação de mecanismos de portagens virtuais para pagamento de tarifas por zonas de circulação [63]. Na área particular da Engenharia Civil, este tipo de sistemas é utilizado no âmbito da topografia e da monitorização estrutural. A satisfação dos requisitos impostos pelos utilizadores do GNSS depende do grau de exigência necessário ao fim para o qual o sistema está a ser utilizado. Características como a frequência de aquisição de dados e capacidade de tratamento em tempo real são importantes de acordo com os objectivos pretendidos.

A medição de deslocamentos nas estruturas é uma parte fundamental no processo de avaliação do seu desempenho e na sua caracterização funcional. A constatação de um comportamento diferente do previsto poderá indicar um desempenho estrutural desadequado, implicando aumentos nos custos de monitorização e manutenção. A instrumentação das estruturas é a base que permite obter todos os resultados do processo de monitorização. Naturalmente, para que os resultados obtidos sejam fiáveis, torna-se necessária a utilização de sensores de medição credíveis, que permitam obter uma boa resolução, estabilidade das medições com o tempo e que, essencialmente, sejam precisos.

Com o objectivo de aferir a potencial aplicação do sistema GNSS na monitorização de obras de arte, foram realizados ensaios com a aplicação prática a uma obra de arte. Estes ensaios permitiram a obtenção de dados e uma posterior análise que trará algum interesse à caracterização comportamental do sistema estudado. São também mostrados os resultados da monitorização dos deslocamentos verticais de uma Obra de Arte, utilizando os transdutores de deslocamento vertical desenvolvidos pelo LABEST [59].

6.2. APLICAÇÃO DO SISTEMA GNSS NA MONITORIZAÇÃO DE UMA OBRA DE ARTE

6.2.1 O viaduto atirantado sobre a Via de Cintura Interna no Porto

A realização da Alameda que liga a Praça das Flores à Praça da Corujeira, no Porto, inclui a construção de um viaduto que permite a passagem desnivelada das linhas de caminho de ferro, da rede de metropolitano (Metro do Porto) e de vias rodoviárias das quais a mais importante é a Via de Cintura Interna (VCI). A dimensão do conjunto de vias a transpor, em conjunto com a necessidade de manter as referidas vias transitáveis durante a fase construtiva, conduziu à concepção de um viaduto cujo maior vão foi definido em 120m e com um processo construtivo pouco frequente em viadutos urbanos.

O viaduto, de betão armado pré-esforçado, desenvolve-se num conjunto de seis tramos, sendo o vão mínimo de 23m e o máximo de 120m, como já referido. O seu comprimento total, entre eixos de encontros, é de 316,5m sendo o tabuleiro materializado com secção transversal em caixão monocelular. A sua largura total é de 18m, constante em toda a extensão do viaduto, comportando duas faixas de rodagem em cada sentido e uma faixa pedonal central. A altura da secção transversal do tabuleiro é de 2,40m em praticamente toda a sua extensão, excepto na vizinhança do pilar P3 (mastro), onde cresce parabolicamente até aos 3,60m na zona de intersecção com o referido pilar.

A solução de tirantes, que se desenvolvem num conjunto de 3 planos, está de acordo com a assimetria da solução de vãos. Um dos três planos de tirantes desenvolve-se sobre o vão de 120m e consiste num conjunto de 10 cabos de suspensão, amarrados sobre o eixo central do tabuleiro. Os outros dois planos de tirantes contêm, cada um, 3 cabos de retenção que amarram nas zonas laterais do tabuleiro sobre o pilar P4. Na zona de suspensão do vão principal, a transmissão das forças dos tirantes às almas da secção transversal do tabuleiro é executada em cada secção de amarração recorrendo a duas diagonais afastadas entre si de 8m.

A adopção de uma solução atirantada para o vão principal surgiu com uma solução integrada de suporte estrutural e do próprio processo construtivo, ou seja, dando suporte à construção de aduelas por avanços sucessivos. Os restantes tramos foram executados com recurso ao processo tradicional de cimbre ao solo [64]. Na Figura 6.1 pode ver-se um corte longitudinal da Obra de Arte apresentada.

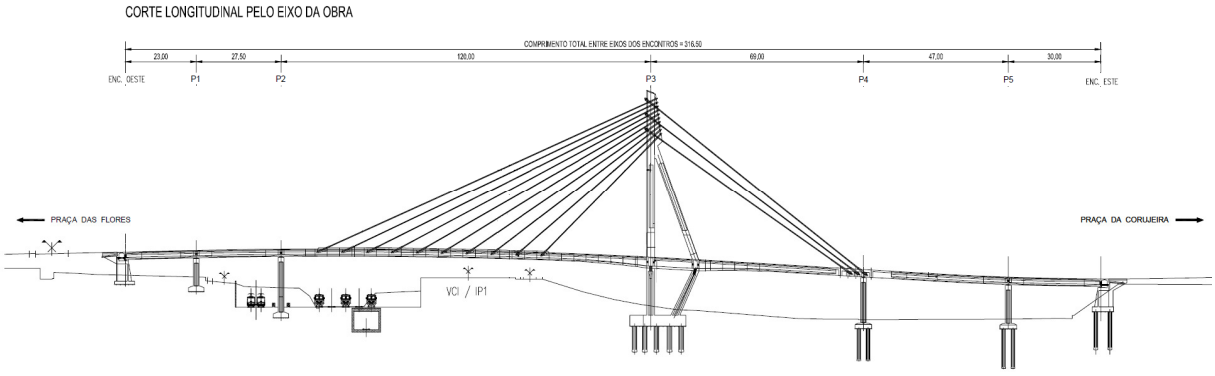


Figura 6.1 – Corte longitudinal do viaduto atirantado sobre a VCI. Adaptado de: [64].

A forma do mastro, determinada a partir de considerações estruturais e por questões de integração urbana, ergue-se cerca de 70m acima da cota superior do maciço de encabeçamento das respectivas estacas de fundação, encontrando-se o topo 53m acima do tabuleiro.

A sua secção transversal, variável em altura, é composta por dois fustes parcialmente tubulares. Desta forma, sendo a secção transversal do mastro composta por duas peças, consegue-se aumentar a rigidez longitudinal, não sendo necessária a aplicação de um maior número de cabos de retenção para resolver

o desequilíbrio entre o vão principal (de 120m) e o vão adjacente (de apenas 69m). Na zona de intersecção do mastro com o tabuleiro foi criada uma abertura em arco, para permitir a circulação de peões. Uma fotografia panorâmica da Obra de Arte é apresentada na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Viaduto atirantado sobre a VCI no Porto (Junho de 2002 – © F. Piqueiro / Foto Engenho, Lda).

A monitorização do deslocamento da junta de dilatação do encontro do lado da Praça das Flores, com a aplicação dos equipamentos GNSS, foi objecto de estudo e será seguidamente apresentada.

6.2.2 Apresentação do ensaio e instalação dos sistemas de medição de deslocamentos

A aplicação do sistema GNSS à monitorização dos deslocamentos horizontais do mastro do viaduto atirantado sobre a VCI no Porto foi inicialmente prevista. Contudo, o tempo necessário à obtenção do licenciamento de acesso às áreas técnicas de comunicação vertical do mastro, associado ao procedimento burocrático característico deste tipo de licenciamentos, acabou por impossibilitar a realização do ensaio nas condições inicialmente pretendidas. Desta forma, procedeu-se à realização de um ensaio de monitorização dos deslocamentos de uma junta de dilatação do referido viaduto por acção do efeito da variação da temperatura.

O ensaio de medição do deslocamento da junta de dilatação do encontro Oeste do viaduto atirantado sobre a VCI no Porto decorreu no dia 14 de Maio de 2010, sensivelmente entre as 09h30 e as 16h30. O objectivo do ensaio consistiu na análise do comportamento do sistema de medição GNSS quando aplicado à medição de deslocamentos resultantes de acções de longo período, como é o caso dos ciclos diários da acção da temperatura sobre as estruturas. A realização do presente ensaio permitiu a aplicação do sistema GNSS na monitorização de um viaduto, surgindo como consequência a possibilidade de avaliar o comportamento do sistema quando inserido num cenário real de monitorização de estruturas.

O ensaio realizou-se de acordo com o seguinte procedimento:

- Definição do local de instalação da estação de referência (EST1) e respectiva fixação da antena GNSS com recurso a um tripé de suporte – ver Figura 6.3 (a).
- Instalação do LVDT e do sensor de temperatura e programação da frequência de aquisição de dados por parte do equipamento de aquisição e armazenamento (*DataTaker* DT500) – ver Figura 6.3 (b).
- Fixação de suporte para a antena da estação móvel (EST2) na guarda de protecção do viaduto nas proximidades da junta de dilatação monitorizada e instalação da respectiva antena GNSS – ver Figura 6.4 (a).

A alimentação eléctrica de todos os equipamentos utilizados foi garantida por um gerador transportado para o local. Para tornar possível a posterior avaliação do desempenho do sistema GNSS, a verdadeira grandeza do deslocamento da junta de dilatação foi monitorizada por um LVDT que se encontrava ligado a um sistema de aquisição e armazenamento de dados, definindo-se a aquisição de dados a uma frequência de uma leitura por cada 5 minutos. A par da medição de deslocamentos, foi instalado um sensor de temperatura definido com a mesma frequência de aquisição, para possibilitar o estudo da correlação da temperatura na dilatação da estrutura monitorizada. As antenas das estações foram colocadas sensivelmente à mesma cota e o sensor de temperatura foi inserido no interior da junta de dilatação do encontro, de forma a não receber incidência directa de radiação solar, medindo desta forma a temperatura ambiente na envolvente da respectiva junta. Na Figura 6.4 (b) é ilustrada uma vista geral do posicionamento da antena da estação móvel (EST2) relativamente à junta de dilatação monitorizada.



(a) (b)

Figura 6.3 – Instalação dos equipamentos de medição: estação de referência (a) e LVDT (b).



(a) (b)

Figura 6.4 – Antena da estação móvel: fixação no pilar da guarda de protecção (a) e posicionamento relativamente à junta de dilatação (b).

No subcapítulo seguinte, são apresentados e interpretados os resultados do ensaio realizado na ponte atirantada sobre a VCI no Porto.

6.2.3 Análise e interpretação de resultados do ensaio

Na Figura 6.5 é apresentada a variação do deslocamento da junta e da temperatura ambiente medidos ao longo do tempo de ensaio. No respectivo gráfico, os deslocamentos são considerados positivos quanto provocam uma diminuição da abertura da junta (em consequência da dilatação do corpo da estrutura de betão armado pré-esforçado). A ausência de observações no período das 14:00 às 14h30 deveu-se a uma falha na aquisição de dados, por ter ocorrido uma interrupção na alimentação eléctrica de todos os equipamentos utilizados no ensaio.

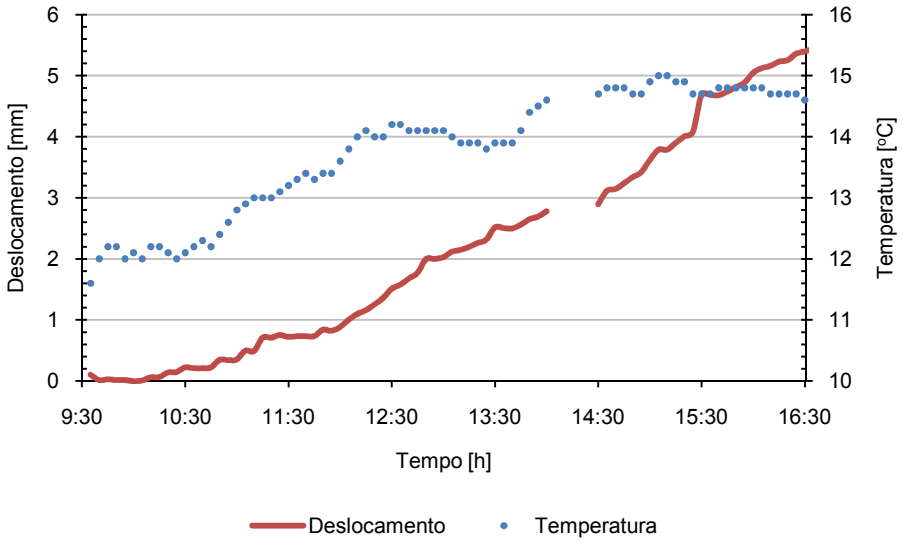


Figura 6.5 – Variação do deslocamento e da temperatura medidos pelo LVDT e pelo sensor de temperatura.

Utilizando os dados da Figura 6.5, considerando toda a extensão do vão central capaz de se deformar livremente, pode-se calcular, de forma simplificada, um valor aproximado para o coeficiente de dilatação térmica linear, de acordo com o Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Determinação experimental do coeficiente de dilatação térmica linear do tabuleiro do viaduto.

Deslocamento [mm]		Temperatura [^{o}C]		Dilatação média [mm/ ^{o}C]	α [^{o}C^{-1}]
Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima		
5,40	0,00	15,0	11,6	1,59	1,3x10^{-5}

Ajustando a posição da curva de deslocamentos definida pelas medições do LVDT, relativamente às observações realizadas pelo sistema GNSS, verifica-se que a tendência do deslocamento registado pelo LVDT é acompanhada pelo sistema GNSS, de acordo com a Figura 6.6 onde se representam os deslocamentos obtidos pelo sistema GNSS. Analisando a Figura 6.6 verifica-se que, localmente, existem perturbações de carácter cíclico nas medições efectuadas pelo sistema GNSS. Estas perturbações dever-se-ão a vários factores, entre os quais a reflexão de sinal nos painéis publicitários existentes no local. O seu carácter cíclico deve-se à alteração do conjunto de satélites observados ao longo do tempo de ensaio e, consequentemente, à repetição do posicionamento relativo do conjunto satélite, obstáculos e antenas das estações. Esta tendência cíclica é mais notória no gráfico da Figura 6.7 (a), onde se apresentam os dados das observações GNSS representando apenas um ponto a cada 5 minutos.

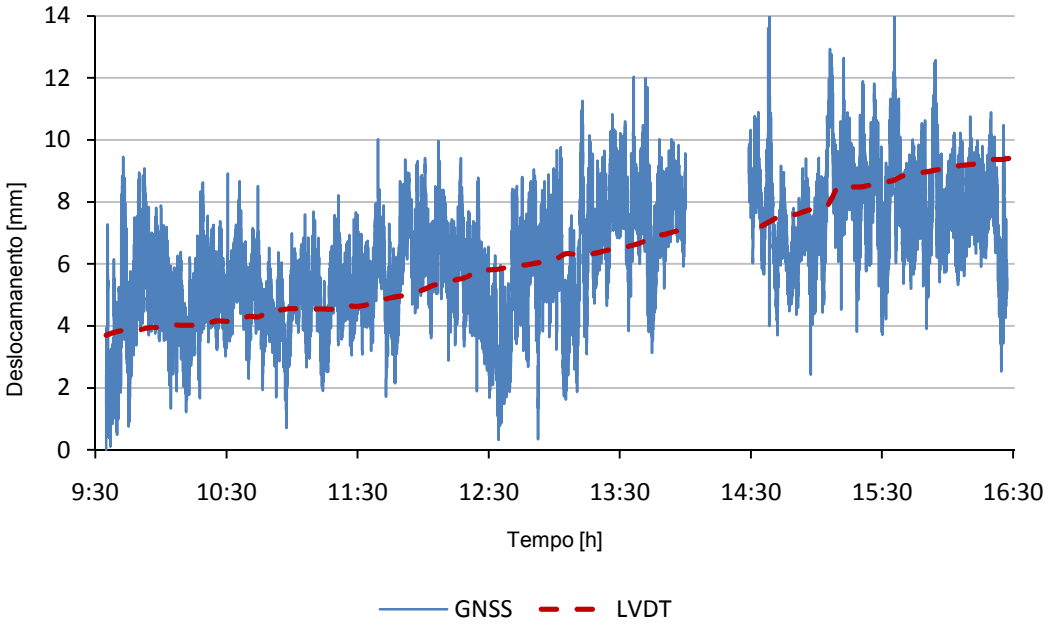
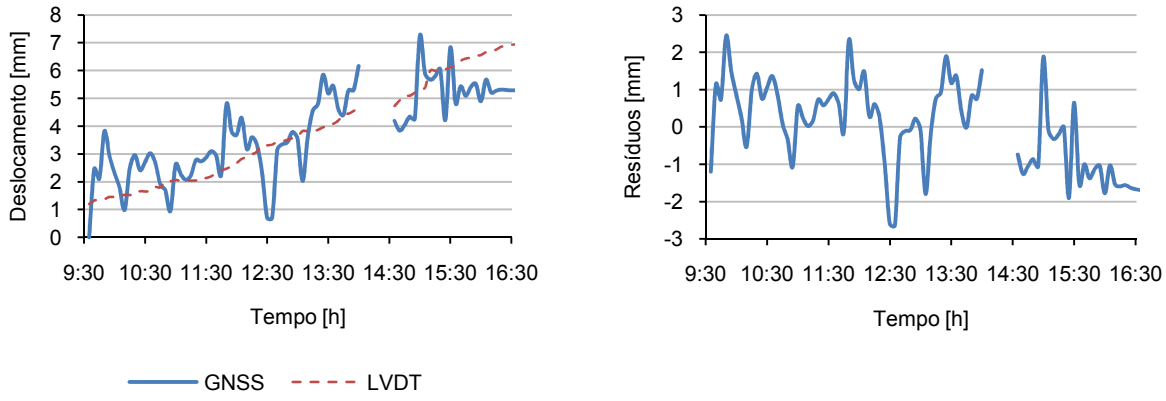


Figura 6.6 – Comparação entre os deslocamentos LVDT e GNSS (1Hz) no ensaio do viaduto sobre a VCI.



(a) (b)

Figura 6.7 – Comparação entre os deslocamentos LVDT e GNSS com representação de um ponto médio a cada 5 minutos (a) e respectivos resíduos (b).

6.3. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA

6.3.1 A Ponte da Lezíria

A ponte da Lezíria insere-se no troço A1/Benavente da auto-estrada portuguesa A10 – Bucelas/Carregado/IC3, transpondo o rio Tejo numa localidade próxima da capital portuguesa, Lisboa. A sua construção é relativamente recente, tendo sido colocada em serviço em Julho de 2007. A extensão total da ponte ronda os 12 km tornando-se na 2ª maior ponte da Europa, logo após a ponte Vasco da Gama em Lisboa, e na 9ª ponte mais extensa do mundo.

O corpo da ponte divide-se em três subestruturas distintas: o viaduto de aproximação Norte com 1700m, o viaduto de aproximação Sul com 9160m e a ponte principal com sobre o rio Tejo com 970m. A ponte principal, de betão armado pré-esforçado, é composta por um conjunto de oito vãos contínuos (95 + 6 × 130 + 95m) com secção transversal em caixão. O tabuleiro da ponte possui 30m de largura e apresenta altura variável, alternando entre os 8 metros sobre os apoios e os 4 metros a meio dos vãos. A largura do tabuleiro é sustentada por consolas laterais apoiadas em perfis metálicos tubulares. Os pilares da ponte são constituídos por duas paredes paralelas de betão armado sendo cada uma delas dividida em duas partes por uma abertura central. Os pilares P1 a P5 são monoliticamente ligados ao tabuleiro enquanto os pilares P6 e P7, bem como os pilares de transição (PTN e PTS), dispõem de aparelhos de apoio que permitem o deslizamento longitudinal do tabuleiro. As fundações dos pilares são constituídas por grupos de oito ou dez estacas rigidamente unidas por maciços de encabeçamento [59]. Na Figura 6.8 ilustra-se uma vista geral da ponte da Lezíria sobre o rio Tejo.



Figura 6.8 – Vista geral da ponte da Lezíria sobre o rio Tejo.
Adaptado de: [59].

6.3.2 Âmbito do programa de monitorização

O programa de monitorização, realizado pelo LABEST, consistiu na instrumentação da ponte da Lezíria através de um sistema de monitorização com base em transdutores de fibra óptica, mais precisamente com sensores FBG. Este sistema foi instalado apenas na ponte principal, complementando um outro sistema de monitorização, com base em transdutores eléctricos, que foi aplicado na também na ponte principal e estendido aos viadutos de acesso.

O principal objectivo da aplicação deste sistema de monitorização consiste na avaliação do comportamento estrutural da obra de arte, ao longo do seu período de vida útil, através da medição de grandezas com significado na avaliação do sistema estrutural, tais como a temperatura do betão, e as extensões/deslocamentos de secções representativas do comportamento da estrutura. A instalação de um sistema de monitorização prazo permite o armazenamento de informação relevante e o apoio à detecção de alterações significativas do comportamento estrutural, antecipando a identificação de sinais que indiquem potenciais avarias e suportando igualmente o programa de manutenção definido para a obra de arte [59]. Na Figura 6.9 é esquematicamente representada a localização das secções instrumentadas e no Quadro 6.2 indica-se a quantidade de transdutores utilizados na monitorização da ponte da Lezíria.

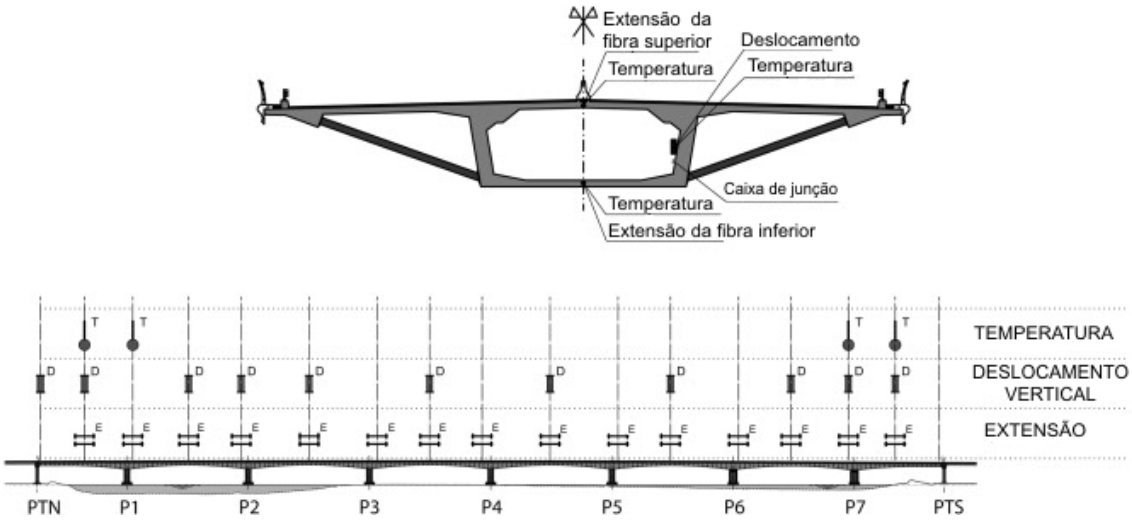


Figura 6.9 – Esquema da instrumentação da ponte da Lezíria.
Adaptado de: [59].

Quadro 6.2 – Parâmetros físicos medidos e localização das secções instrumentadas na ponte da Lezíria.
Traduzido de: [59].

Tipo de transdutor	Localização	Quantidade
Extensão	Lajes superior e inferior da secção transversal em 8 secções a meio vão e 7 secções de apoio	30
Deslocamento vertical	8 secções a meio vão e 3 secções de referência: PTN, P2 e P7	11
Temperatura	4 secções representativas distribuídas ao longo da estrutura	10

De acordo com o Quadro 6.2, foram empregues 51 transdutores para medição de diferentes tipos de parâmetros em secções representativas do comportamento estrutural da ponte da Lezíria. A medição das extensões longitudinais nas fibras do tabuleiro da ponte foi realizada recorrendo à utilização de um novo transdutor especialmente desenvolvido no LABEST/FEUP para o efeito, encontrando-se informação técnica relativa ao seu desenvolvimento e à sua aplicação a casos práticos de monitorização em [59]. A medição dos deslocamentos verticais sofridos pelo tabuleiro foi realizada com a aplicação do sistema de medição de flechas, com base num sistema de níveis líquidos apresentado no capítulo anterior.

Na Figura 6.10 ilustra-se a disposição de um dos transdutores de flechas activo e um dos transdutores de referência, que fazem parte da rede de sensores instalados na ponte da Lezíria.



(a) (b)

Figura 6.10 – Transdutor de flechas activo (a), transdutor de referência, circuito hidráulico e respectivo reservatório de água (b) instalado na ponte da Lezíria. Adaptado de: [59].

O sistema de interrogação dos transdutores possui dois modos de aquisição dados que assumem diferentes taxas de amostragem. No modo de aquisição padrão, a aquisição de dados está programada de forma a interrogar todos os sensores uma vez a cada 15 minutos. Este modo é adequado para caracterizar o comportamento diferido da estrutura no tempo, caracterizando de forma apropriada os efeitos da retracção e fluência do betão, já que se tratam de fenómenos que ocorrem de forma lenta e contínua no tempo. De forma complementar, o sistema de interrogação pode efectuar a aquisição de dados a uma frequência mais alta, podendo atingir os 500Hz na monitorização das extensões e os 0,5Hz na interrogação dos transdutores de flechas e temperatura. Desta forma, o sistema de aquisição de dados torna possível a caracterização do comportamento das secções instrumentadas para casos de carga esporádicos ou de natureza dinâmica, como por exemplo a passagem de uma carga rolante ou quando submetidas à acção frequente da passagem de veículos na ponte [59]. De acordo com o âmbito do presente capítulo, serão seguidamente abordados e discutidos alguns dos resultados relativos ao sistema de medição de deslocamentos verticais com base no método de níveis líquidos, de forma a demonstrar o bom desempenho do sistema desenvolvido pelo LABEST/FEUP na respectiva aplicação a um caso real de monitorização.

6.3.3 Análise de dados e interpretação de resultados

Seguidamente são apresentados alguns dados obtidos por interrogação dos transdutores de flechas anteriormente apresentados, relativos a um período de um mês e adquiridos à frequência definida no modo padrão. Na Figura 6.11 apresenta-se a variação dos deslocamentos verticais medidos na secção de meio vão do segundo tramo da ponte da Lezíria, bem como a evolução temporal da temperatura registada nas lajes superior e inferior da mesma secção transversal do tabuleiro.

Nos gráficos da Figura 6.11, as abcissas representam o tempo de observação, em dias, e as ordenadas caracterizam a evolução do deslocamento vertical, em milímetros, ou a variação da temperatura, em graus centígrados, medidos na secção de meio vão do segundo tramo da ponte. O valor do deslocamento vertical é considerado positivo quando a secção sofre um deslocamento contrário ao sentido da aceleração da gravidade.

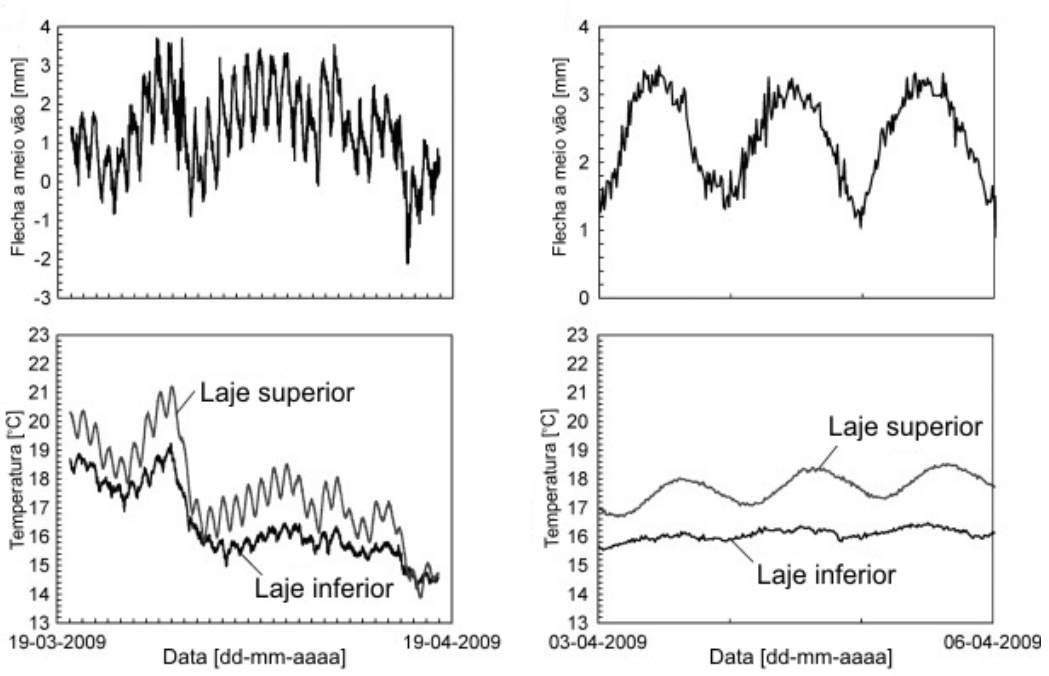


Figura 6.11 – Evolução da flecha medida a meio vão do segundo tramo durante o período de um mês e correspondente evolução da temperatura (a) e detalhe correspondente a um período de três dias (b). Adaptado de: [59].

De acordo com a análise dos gráficos apresentados na Figura 6.11 (a), durante o período representado, a flecha medida pelo transdutor de flechas instalado na secção de meio vão do segundo tramo da ponte da Lezíria é quase sempre positiva. Esta constatação é consequência da acção do gradiente de temperatura registado entre as lajes superior e inferior da secção transversal do tabuleiro da obra de arte. De facto, a temperatura diferencial registada provoca uma extensão das fibras superiores da secção transversal superior à extensão registada nas fibras inferiores da mesma. Assim, o comportamento registado provoca um efeito de flexão longitudinal ao tabuleiro, acarretando tracções nas fibras da secção que se encontram acima da posição do eixo neutro da secção e compressões nas fibras localizadas abaixo do mesmo. Como consequência deste efeito, associada à dimensão relativamente elevada do tramo de tabuleiro analisado, surgem deslocamentos verticais que na generalidade dos dias em análise foram positivos.

Analisando a Figura 6.11 (b), verifica-se com maior perceptibilidade que a variação da temperatura registada na laje inferior da secção transversal do tabuleiro da ponte é pouco pronunciada ao longo do tempo, ao contrário do que acontece na laje superior da respectiva secção. De facto, a incidência directa dos raios solares sobre a laje superior da secção transversal da ponte, durante o dia, leva a um aumento da temperatura do betão em relação à temperatura que se regista durante o período nocturno. Analisando o gráfico superior da Figura 6.11 (b), verifica-se que os picos dos ciclos diários do deslocamento vertical sofrido pela secção de meio vão do tramo estudado estão directamente correlacionados com os picos correspondentes aos ciclos diários de variação de temperatura, apresentados no gráfico inferior da Figura 6.11 (b), tal como expectável.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, a aplicação do sistema GNSS às obras de Engenharia Civil tem-se concretizado mais no campo da topografia do que no campo da monitorização estrutural. Efectivamente, a aplicação do sistema a casos de levantamentos topográficos tem sofrido um aumento significativo e, em particular nos casos em que a sua aplicação não exija um nível de rigor mais restritivo do que a precisão centimétrica, este sistema tem-se revelado bastante eficiente [62]. A sua aplicação aos casos de monitorização de mastros de pontes atirantadas apresenta como grande vantagem, comparativamente aos métodos de monitorização convencionalmente empregues nas estruturas de Engenharia Civil, o facto de não necessitar de referência física ao solo, permitindo uma leitura directa dos deslocamentos horizontais deste tipo de componentes estruturais, ao contrário das técnicas de medição actuais que permitem a obtenção dos referidos deslocamentos apenas de forma indirecta. Contudo, continuam a ser necessários estudos pluridisciplinares que permitam a correcta compreensão do comportamento do sistema GNSS e, consequentemente, o melhoramento das técnicas de utilização e da respectiva aplicação prática.

A análise dos dados resultantes da aplicação do sistema GNSS ao viaduto atirantado, sobre a VCI no Porto, constitui uma confirmação do elevado potencial do sistema GNSS na monitorização dos deslocamentos horizontais de Obras de Arte.

Conjuntamente, o desenvolvimento de sistemas de monitorização baseados em sensores de fibra óptica tem permitido, ao longo dos últimos anos, uma série de vantagens em relação aos sistemas baseados na utilização de sensores eléctricos [1]. Pela sua potencialidade, a utilização conjunta deste tipo de sistemas na monitorização de obras de arte auspicia melhoramentos na qualidade dos dados obtidos no processo de monitorização estrutural, quando comparados com os sistemas de monitorização convencionais.

No presente capítulo, foi demonstrada a aplicação do sistema GNSS a um caso prático de medição do deslocamento de uma junta de dilatação no viaduto atirantado sobre a VCI no Porto. O bom comportamento do sistema de medição de deslocamentos verticais com base em sensores de fibra óptica, desenvolvido pelo LABEST/FEUP, foi também evidenciado com a sua aplicação a um caso prático na ponte da Lezíria sobre o rio Tejo, no Carregado.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVA DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo são expostas as considerações finais relativas ao trabalho desenvolvido. A aplicação do sistema GNSS na monitorização de deslocamentos em estruturas, particularmente no caso das obras de arte, tem um conjunto alargado de vantagens, quando comparado com os sistemas de monitorização frequentemente utilizados para retratar o comportamento estrutural. Como principais vantagens, a instalação das antenas GNSS nos locais a monitorizar é facilmente realizada. Constitui também uma grande vantagem, em relação às aplicações topográficas de monitorização, o facto de não haver necessidade de referência ao solo nem de linha de vista entre as estações. A garantia de funcionamento em qualquer parte do Mundo, sob quaisquer condições meteorológicas e em qualquer instante, compõe mais um factor positivo no que respeita ao uso deste tipo de sistemas na monitorização.

Relativamente aos casos de estudo e aos ensaios tratados na presente dissertação, pode ser formulado um conjunto de conclusões principais, seguidamente apresentadas. A utilização de observações em bruto, directamente recolhidas do sistema de aquisição de sinais GNSS sem a aplicação de qualquer tratamento de filtragem, é inviável para aplicações do domínio da Engenharia Civil, face à falta de precisão, devida a erros de várias naturezas que afectam a qualidade do sinal recebido.

O comportamento do sinal recebido parece ter um comportamento não aleatório, verificando-se a existência de ciclos temporais de comportamento. O desvio padrão da coordenada vertical representa mais do dobro do valor obtido para as coordenadas do plano horizontal. Esta constatação traduz-se numa limitação do sistema, no que respeita à aplicação deste tipo de equipamentos na medição de deslocamentos verticais, tais como as flechas dos tabuleiros das obras de arte.

A aplicação de filtros de média móvel aos dados em bruto, revela-se uma ferramenta de grande utilidade no âmbito da obtenção de resultados mais precisos. No que respeita à dimensão do filtro, destaca-se o facto de se conseguir um aumento de precisão com o aumento do respectivo comprimento. Contudo, quanto maior for a dimensão do filtro menor será a capacidade de resposta a deslocamentos bruscos (principalmente os de elevada frequência e baixa amplitude). Na generalidade, os resultados obtidos nos ensaios realizados reflectem um bom comportamento. Contudo, no que

concerne ao uso deste tipo de equipamentos na monitorização de deslocamentos das estruturas da Engenharia Civil, a sua aplicação revela-se ainda com utilidade reduzida, principalmente devido à imprecisão associada aos deslocamentos verticais.

Demonstrou-se ainda que o ciclo solar, quando atinge picos de actividade, interfere de forma significativa com as comunicações por satélite. Como consequência, a precisão das observações efectuadas é bastante degradada, atingindo o desvio-padrão das observações efectuadas, valores que chegam a ser 36 vezes superiores aos valores registados em períodos de actividade solar normal. Este ponto constitui uma limitação na utilização do sistema, em particular para as aplicações de elevada precisão.

Para que haja um bom funcionamento do equipamento, a instalação das antenas GNSS terá forçosamente de ser realizada em locais sem grandes obstáculos e com uma ampla área de firmamento observável. Cumulativamente, as antenas de todas as estações deverão ter oportunidade de observar os mesmos satélites, para que os erros associados à medição das respectivas pseudo-distancias sejam semelhantes e, assim, anuláveis pelo método de posicionamento relativo, resultando uma linha de base isenta de todos os erros que sejam comuns à estação de referência e às estações móveis.

Conclui-se ainda, por análise dos resultados apresentados no Capítulo 4, que os equipamentos utilizados nos ensaios são particularmente sensíveis à existência de elementos reflectores nas proximidades das antenas. A existência de grandes superfícies metálicas na proximidade das antenas leva à existência de picos de observação, resultantes da captação das ondas de sinal reflectido. A interferência destes elementos na leitura correcta dos deslocamentos sofridos pela antena móvel, será tanto maior quanto maior for a área da superfície reflectora. Tendo em conta a sensibilidade do sistema à presença de obstáculos de dimensão significativa e, considerando a capacidade diminuta de uma boa caracterização dos deslocamentos no plano vertical, uma das possíveis aplicações do sistema de monitorização com base em GNSS será na monitorização dos deslocamentos horizontais do topo dos mastros de obras de arte atirantadas. Mesmo neste caso, a sua aplicação será mais eficaz no caso das obras de arte com pouca densidade construtiva na sua envolvente.

Em resumo, os equipamentos GNSS utilizados no estudo retratado na presente dissertação, são caracterizados por possuírem uma boa exactidão mas uma precisão relativamente reduzida (as leituras apresentam muito ruído). A aplicação do sistema de monitorização com base em GNSS a casos práticos, nomeadamente no caso da ponte atirantada sobre a VCI no Porto, demonstra a possibilidade e a facilidade de aplicação deste sistema de monitorização às obras de arte.

No que respeita à medição de deslocamentos verticais, a aplicação do sistema de medição de flechas com base em níveis líquidos, desenvolvido pelo LABEST, revela-se uma solução eficaz, precisa e de fácil aplicação. No que respeita ao caso de variações lentas de deslocamento, o sistema permite a determinação de deslocamentos verticais com precisão na ordem dos ±0,2mm. Com o aumento da velocidade de aplicação dos deslocamentos, o erro de leitura dos transdutores ópticos e eléctricos aumenta consideravelmente, consequência do aumento da velocidade do escoamento que se processa nas condutas do circuito hidráulico. O fecho da válvula de seccionamento de ar, colocada a jusante dos sensores eléctricos e a montante da purga, resulta em medições de deslocamentos menos precisas e com maior nível de ruído. Este conjunto de ensaios, permitiu concluir que, com a válvula de seccionamento do ar fechada, os transdutores eléctricos não respondem de forma adequada à medição do deslocamento vertical aplicado.

Verifica-se ainda a existência de uma boa correlação linear entre os deslocamentos verticais aplicados aos transdutores e os deslocamentos medidos pelos mesmos. Em termos globais, no que respeita à cinemática da aplicação dos deslocamentos, a resposta dos transdutores eléctricos foi melhor (e mais

precisa) do que a resposta do transdutor óptico. Em geral, o desvio-padrão dos erros de medição do transdutor óptico é superior ao dobro do valor registado para os transdutores eléctricos. Foi observada uma boa correlação, através de uma lei logaritmica, entre a frequência dos ciclos sinusoidais de deslocamento aplicado e o desvio-padrão do erro de medição dos transdutores. Esta correlação é válida para os dois tipos de transdutores testados.

No que respeita à estabilidade de comportamento dos transdutores ao longo do tempo, verifica-se que os transdutores ópticos demonstram ser mais estáveis e menos influenciados pelas variações de temperatura do que os transdutores eléctricos. Além disso, o comportamento do transdutor óptico de referência e do transdutor óptico activo é muito semelhante. No caso dos sensores eléctricos, o comportamento de dois deles (SP1 e SP3) é muito semelhante, tendo pouca semelhança com o comportamento do terceiro sensor (SP2). Neste caso, o comportamento do sensor eléctrico que se diferencia dos restantes dois é fortemente correlacionado com a variação da temperatura.

Com o objectivo de melhorar os resultados obtidos e de melhor entender o funcionamento dos sistemas de monitorização estudados, seguidamente serão apresentadas as perspectivas de desenvolvimentos futuros que, no entender do autor deste trabalho, serão úteis para a obtenção de melhorias no que respeita à precisão dos sistemas de monitorização de deslocamentos estudados, em particular no caso do sistema GNSS.

7.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O crescimento dos sistemas de navegação global por satélites, em particular com o aumento do número de satélites disponíveis, faz prever melhoramentos futuros na precisão que actualmente se consegue atingir. Este progresso previsível é também apoiado pelo nível de desenvolvimento tecnológico que actualmente existe, no que respeita à aplicação de filtros ao sinal recebido. Desta forma, o desenvolvimento de filtros electrónicos mais complexos poderá ser a base futura do processamento de sinal, pelo seu potencial na redução dos níveis de ruído que afectam o sinal enviado pelos satélites.

Desta forma, o estudo das necessidades da Engenharia Civil, no que respeita à monitorização, combinado com a oferta tecnológica actualmente disponível, é a base da dos desenvolvimentos futuros, no que respeita ao melhoramento da precisão das medições realizadas com recurso ao sistema GNSS. Neste contexto, o desenvolvimento e a aplicação de filtros inteligentes, capazes de "aprender" com as observações realizadas em períodos anteriores ao instante em análise, são uma perspectiva de desenvolvimentos futuros. Assim, este tipo de filtros será capaz descartar a medição de deslocamentos que, para um determinado conjunto de condições, sejam considerados sem significado. Deverão ser realizados estudos sobre as potencialidades da decomposição do sinal GNSS em séries de Fourier, permitindo avaliar a eficiência da aplicação deste método na filtragem das frequências de ruído que compõem o sinal (por exemplo as frequências associadas ao *multipath*).

A repetição de ensaios deste tipo, utilizando equipamentos GNSS mais recentes, permitirá o acompanhamento do estado da arte do sistema. Este conjunto de desenvolvimentos futuros poderá contribuir para um aumento da precisão associada à medição de deslocamentos por GNSS, ampliando a utilidade e a utilização do sistema no que respeita à sua aplicação na monitorização das obras da Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Figueiredo, E. *Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2006.

[2] http://sinergia.mota-engil.pt/Detail.aspx?ContentId=620&ParentId=566 acedido em Maio de 2010.

[3] Meng, X. *Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using GPS/Accelerometers*. PhD Thesis, University of Nottingham, 2002.

[4] Larocca, A. *O Uso do GPS como Instrumento de Controlo de Deslocamentos Dinâmicos de Obras Civis – Aplicação na Área de Transportes.* Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de são Paulo, 2004.

[5] Casciati, F., Fuggini, C. *Monitoring an Industrial Steel Building by GPS Receivers*, Proceedings of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2-4 July 2008, Krakow, p. 219-226.

[6] http://www.fe.up.pt/si/projectos_geral.mostra_projecto?P_ID=1780 acedido em Maio de 2010.

[7] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, New York, 2008.

[8] Gleason, S., Gebre-Egziabher, D. *GNSS Applications and Methods.* Artech House, Norwood, Massachusetts, 2009.

[9] El-Rabbany, A. *Introduction to GPS: The Global Positioning System.* Artech House, Norwood, Massachusetts, 2002.

[10] Xu, G. *GPS Theory, Algorithms and Applications 2nd Edition.* Springer, Berlin, 2007.

[11] Pestana, A. *Posicionamento GPS - Versão 2.05* disponível em http://topografiasig.isep.ipp.pt/apontamentos/apontamentos_topografia/GPS%20v205.pdf e acedido em Março de 2010.

[12] Monteiro, N. *GPS: Há novas estrelas no Céu*. Comunicação apresentada na Academia de Marinha na 6ª sessão conjunta com o ICEA, 25 de Maio de 2010, disponível em http://www.marinha.pt/PT/amarinha/actividade/areacultural/academiademarinha/Documents/25MAI10.pdf acedido em Junho de 2010.

[13] http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2002/images/04_02a.gif acedido em Maio de 2010.

[14] www.google.com/images acedido em Maio de 2010

[15] www.en.wikipedia.com acedido em Maio de 2010

[16] Leick, A. *GPS satellite surveyng – 3rd edition.* John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.

[17] Samana, N. *Global Positioning: Technologies and Performance.* John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.

[18] www.floranapoli.it/strumenti2.php acedido em Maio de 2010.

[19] Monico, J. *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS – Descrição, fundamentos e aplicações.* Editora Unesp, São Paulo, Brasil, 2000.

[20] Rosa, G. *Análise de Séries Temporais de Coordenadas Estimadas com GPS: Uma Proposta Metodológica para Eliminação de Efeitos Sazonais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Brasil, 2008.

[21] www.prof2000.pt/users/elisabethm/geo7/clima/atmosferap_ficheiros/trofr.jpg acedido em Maio de 2010.

[22] www.iag.usp.br/siae98/atmosfera/atmosf.jpg acedido em Maio de 2010.

[23] Mendes, V., Langley, R. (1995) *Zenith tropospheric delay determination using prediction models: accuracy analysis*. Cartografia e Cadastro, Instituto Português de Cartografia e Cadastro, Nº 2, pp. 41-47.

[24] Warren, D. *Broadcast vs Precise GPS Ephemerides: a Historical Perspective*. Dissertação de Mestrado, Department of the Air Force, Air University, Air Force Institute of Technology, 2002.

[25] http://www.air-radio.it/img/IonosphereLayers.gif acedido em Maio de 2010.

[26]http://1.bp.blogspot.com/_tgMSn4wibhA/SMQ4fFA2XEI/AAAAAAAAAXM/x2vFGelZWbo/s320/shumann_densplasma.gif acedido em Maio de 2010.

[27] Interface Specification IS-GPS-200 Revision D, 7 December 2004. Disponível em http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/is-gps-200d.pdf acedido em Maio de 2010.

[28] Kunysz, W., *High Performance GPS Pinwheel Antenna-NovAtel Inc.* Disponível em (http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Papers/gps_pinwheel_ant.pdf). Acedido em Maio de 2010.

[29] http://www.leica-geosystems.com/en/ acedido em Maio de 2010.

[30] Deshpande, Y., Ingole, J. *Microstrip Antenna For GPS System.* Proceedings of the International Conference on Antenna Technologies, 23-24 February 2005, New Delhi, p. 127-130.

[31] Seeber, G. *Sattelite Geodesy 2nd Edition.* Walter de Gruyter GmbH & Co., Berlin, 2003.

[32] Lima, J. *O Efeito da carga oceânica nas Séries Temporais GNSS.* 2º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada. LNEC, 12-13 de Outubro de 2009, Lisboa, p. 37-42.

[33]http://science.nasa.gov/media/medialibrary/2006/05/10/10may_longrange_resources/predictions3_strip.jpg acedido em Maio de 2010.

[34] http://www.noaanews.noaa.gov/stories2009/20090508_solarstorm.html acedido em Maio de 2010.

[35] http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html acedido em Maio de 2010.

[36] http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/kp_3d.html acedido em Maio de 2010.

[37] http://www.swpc.noaa.gov/alerts/alerts_timeline.html acedido em Maio de 2010.

[38] Ghilani, C., Wolf, P. *Elementary Surveying – An Introduction to Geomatics 12th Edition.* Pearson Education, New Jersey, 2008.

[39] http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/gl99_general.html acedido em Maio de 2010.

[40] http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Papers/GLONASSOverview.pdf acedido em Maio de 2010.

[41] http://www.esa.int/esaNA/SEMQ36MZCIE_index_0.html acedido em Maio de 2010.

[42] Galileo Mission High Level Document, 2002, p. 43. Disponível em http://galileo.khem.gov.hu/documents/angol/technikai_dokumentumok/high_level_mission_definition_version_3.0.pdf acedido em Maio de 2010.

[43] http://www.esa.int/esaNA/SEM5K8W797E_galileo_0.html acedido em Maio de 2010.

[44] LU, J. *COMPASS/Beidou Navigation Satellite System Development* – China Satellite Navigation Project Center. International Committee on GNSS. 8-12 December 2008. Pasadena, USA. Disponível em http://www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2008/icg3/06.pdf. Acedido em Maio de 2010.

[45] Tanajura, E: *Investigações Quanto aos Parâmetros que Influenciam no Processamento de dados GPS Visando a Geração do MDT do Esporão Arenoso da Ilha do Mel.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2008.

[46] http://www.gpsworld.com/gnss-system/gps-modernization/news/block-iif-successfully-launched-cape-canaveral-10003 acedido em Maio de 2010.

[47] http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5325 acedido em Junho de 2010.

[48] http://www.gpsworld.com/gnss-system/compass/news/china-launches-beidoucompass-satellite-10019 acedido em Junho de 2010.

[49] Félix, C. *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte.* Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2004.

[50] http://maps.google.com acedido em Março de 2010.

[51] Bond, L. *OVERVIEW OF GPS INTERFERENCES ISSUES.* Conference on GPS Interference and Mitigation Techniques ate the John A. Volpe – National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, 27 August 1998.

[52] http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/ acedido em Maio de 2010.

[53] http://www.redicecreations.com/specialreports/2006/09sep/solarflare2012.html acedido em Maio de 2010.

[54] http://www.tesis.lebedev.ru/en/magnetic_storms.html?m=4&d=7&y=2010 acedido em Maio de 2010.

[55] Skone, S., Jong, M. *The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance.Earth.* Planets Space, 52, 2000. p. 1067-1071.

[56] Zhang, W., Zhang, D., Xiao, Z. *The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases.* Annales Geophysicae by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, April 2009.

[57] Rao, N., Madhu, T., Kishore, K. *Geomagnetica Storm Effects on GPS Aided Navigation over Low Latitude South Indian Region.* IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.10 No.3, March 2010, p. 37-42.

[58] Marecos, J. *The measurement of vertical displacements through water leveling method.* Springer Netherlands, August 2006, p. 361-370. DOI: 10.1007/BF02473877.

[59] Rodrigues, C., Félix, C., Figueiras, J. *Fiber-optic-based displacement transducer to measure bridge deflections.* Structural Health Monitoring 2010. DOI: 10.1177/1475921710373289.

[60] Rodrigues, C., Félix, C., Figueiras, J. *Transdutor para medição de deslocamentos verticais.* iNPi, Patente Portuguesa Nº. PT104250, 2008.

[61] Stabile, M., Balastreire, L. *Comparação de três Receptores GPS para uso em Agricultura de Precisão.* Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.215-223, Jan./Abr. 2006 disponível em http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30113.pdf. Acedido em Maio de 2010.

[62] Coelho, A. *Avaliação do Desempenho de Receptores GPS em Levantamentos Altimétricos, para fim de Sistematização de Terras.* Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", São Paulo, Brasil, Setembro de 2003.

[63] Reis, S. *Sistema de Portagens Virtuais.* Relatório submetido como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Engenharia de Sistemas de Telecomunicações e Electrónica. Instituto Politécnico de Lisboa – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dezembro de 2004.

[64] Félix, C. *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão.* Dissertação apresentada para uma vaga de professor - coordenador do quadro do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Instituto Politécnico do Porto – Instituto Superior de Engenharia, Abril de 2002.

ANEXO A1

A1.1. Análise das séries GNSS do dia 8 de Abril de 2010 no período das 9h às 10h

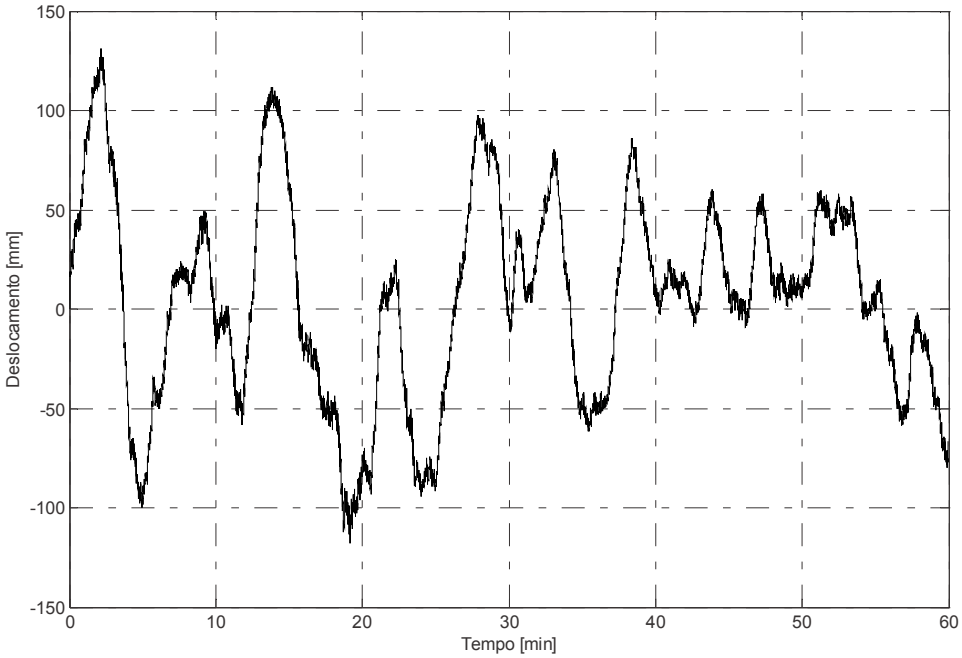


Figura A1.1 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS.

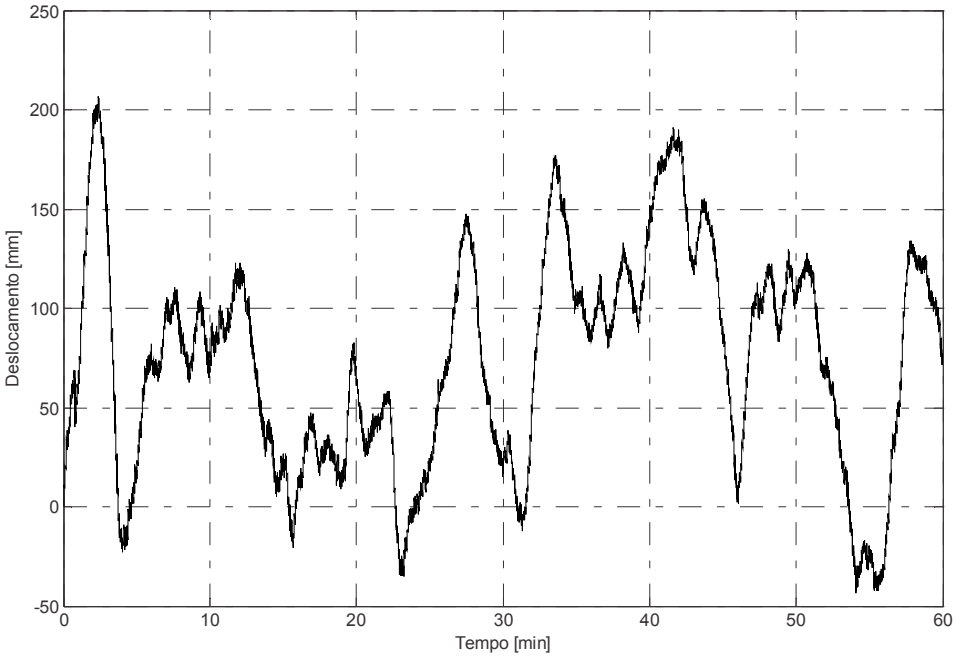


Figura A1.2 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW.

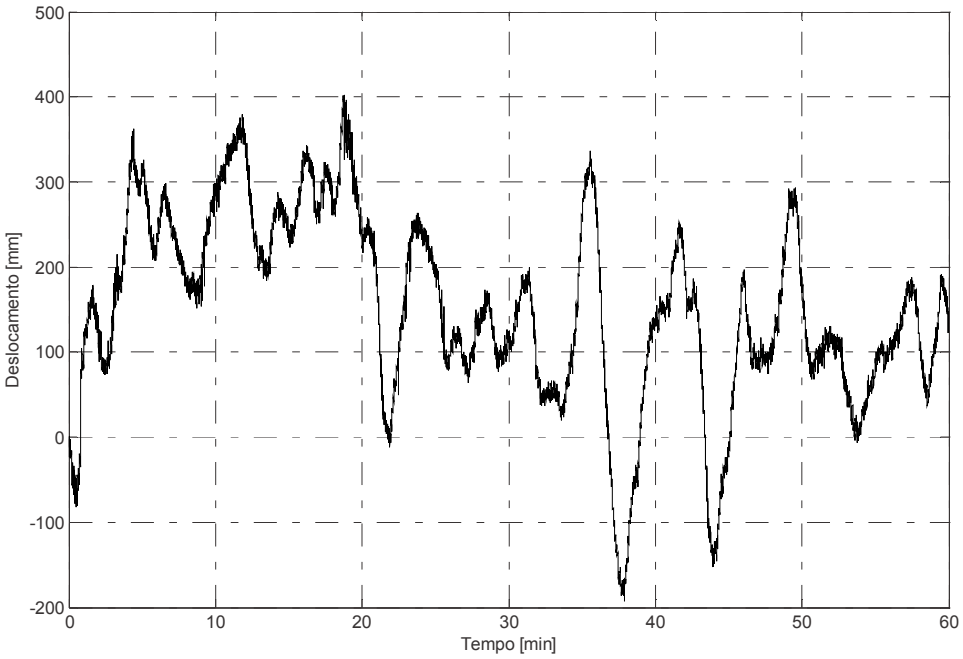


Figura A1.3 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção Vertical.

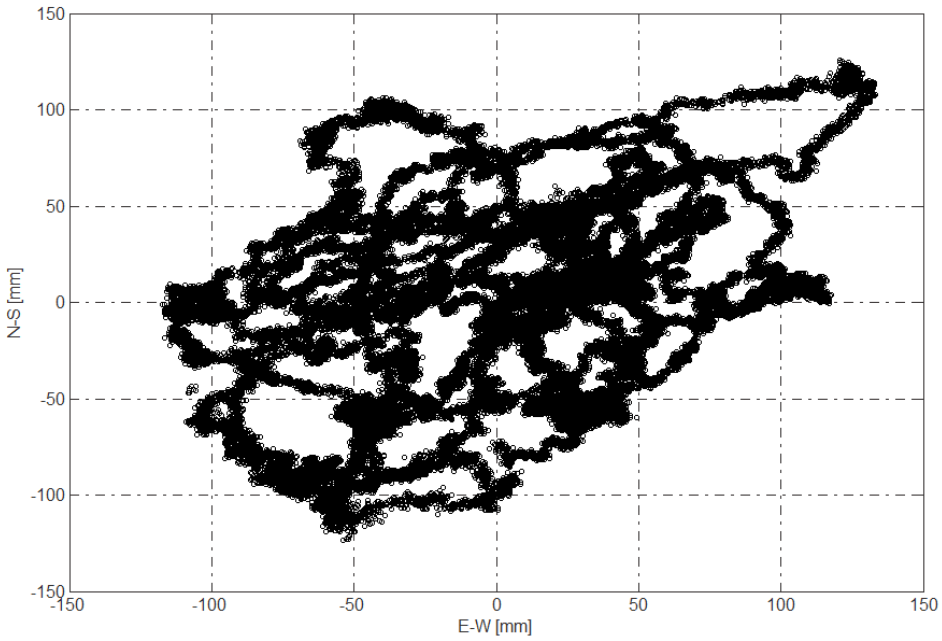


Figura A1.4 – Nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal.

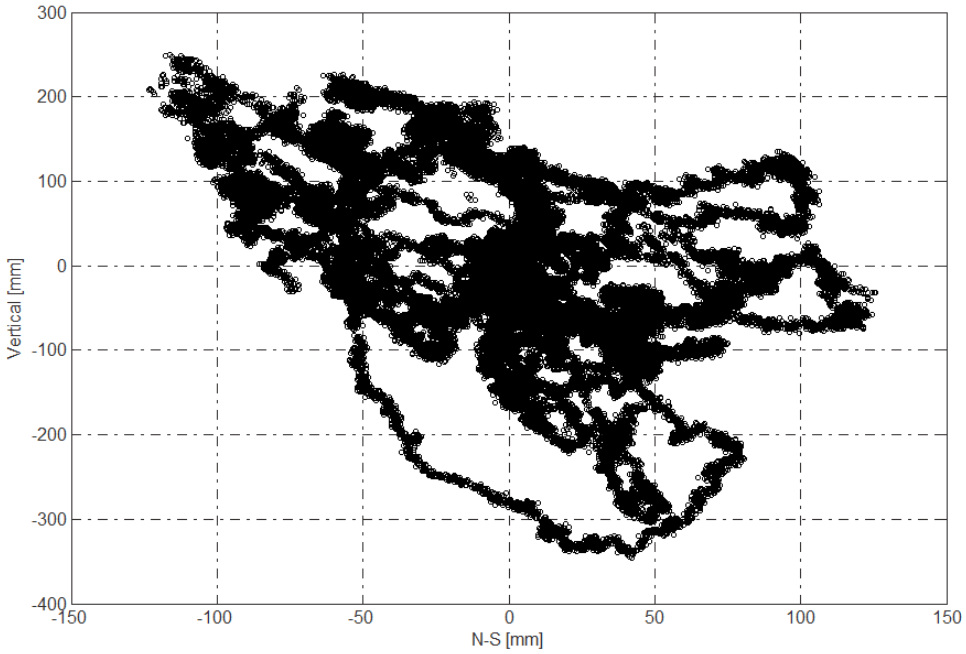


Figura A1.5 – Nuvem de pontos da linha de base no plano NS - Vertical.

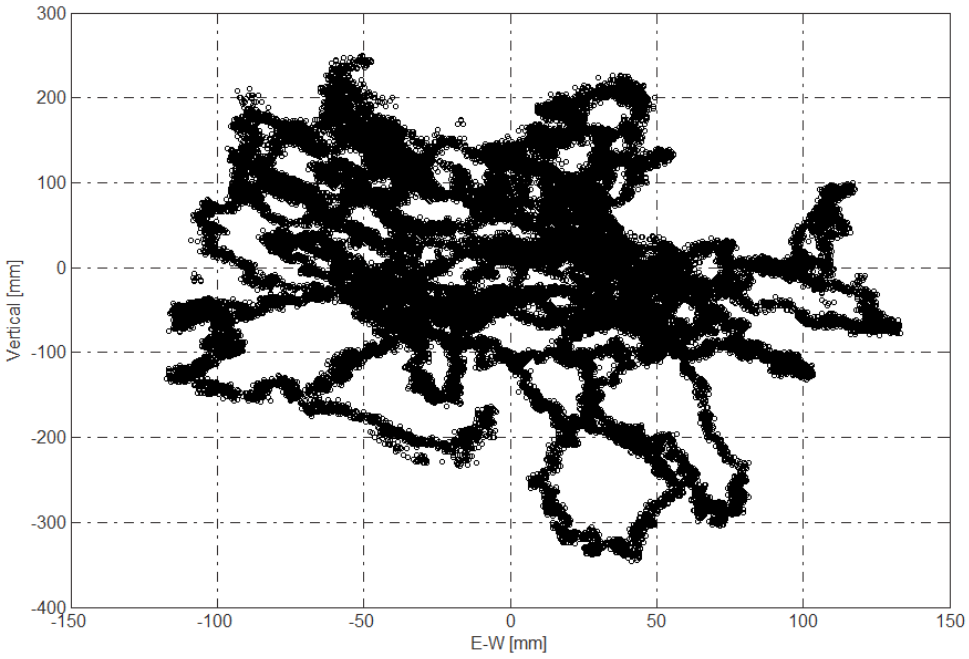


Figura A1.6 – Nuvem de pontos da linha de base no plano EW - Vertical.

A1.2. Análise das séries GNSS do dia 9 de Abril de 2010 no período das 9h às 10h

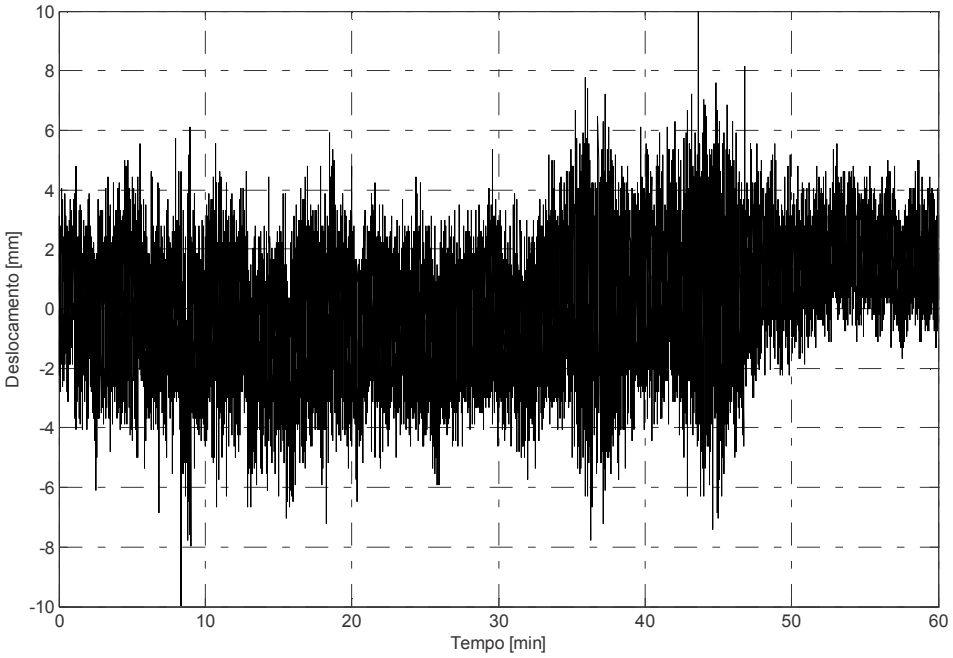


Figura A1.7 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção NS.

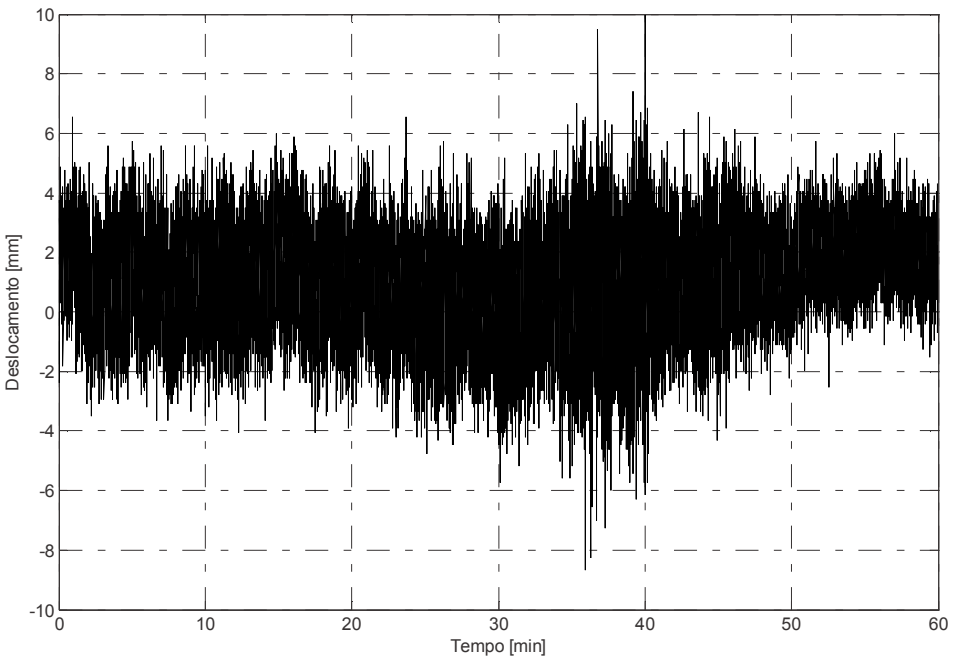


Figura A1.8 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção EW.

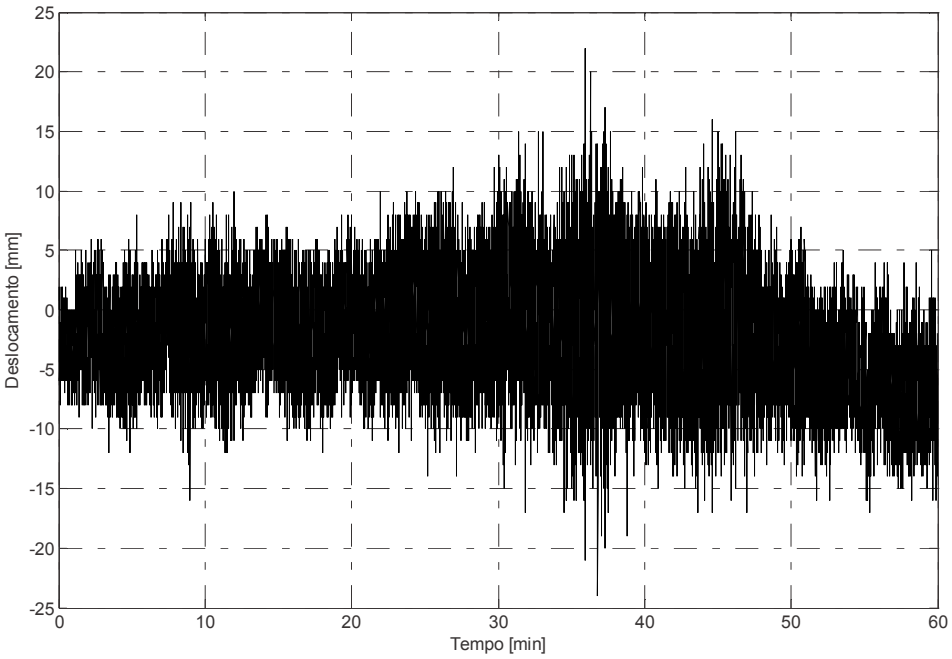


Figura A1.9 – Variação do deslocamento da linha de base na direcção vertical.

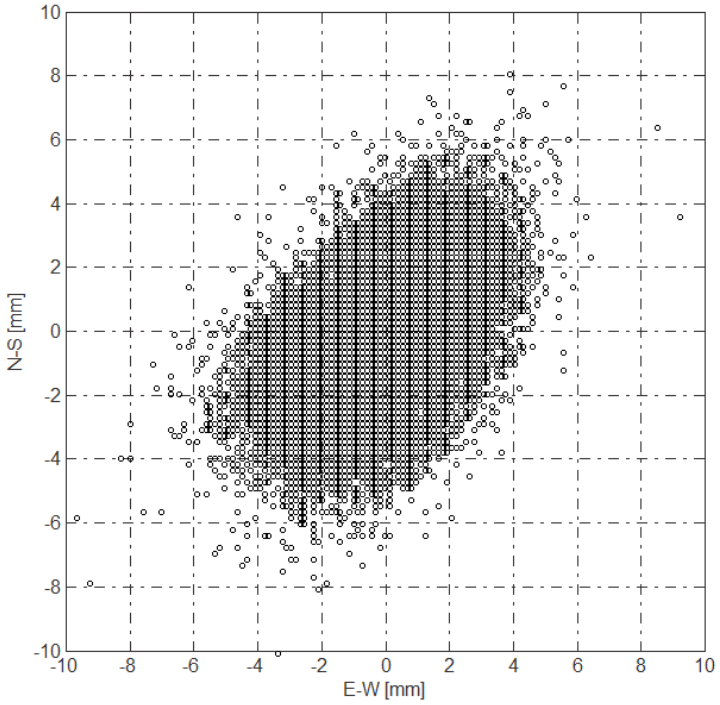
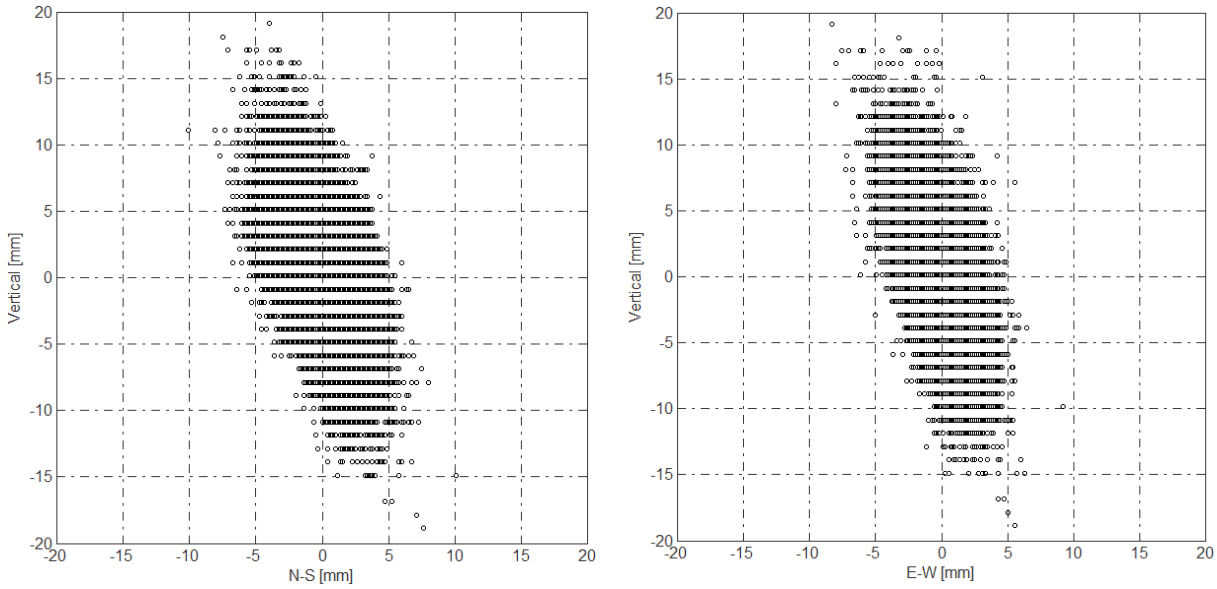


Figura A1.10 – Nuvem de pontos da linha de base no plano horizontal.



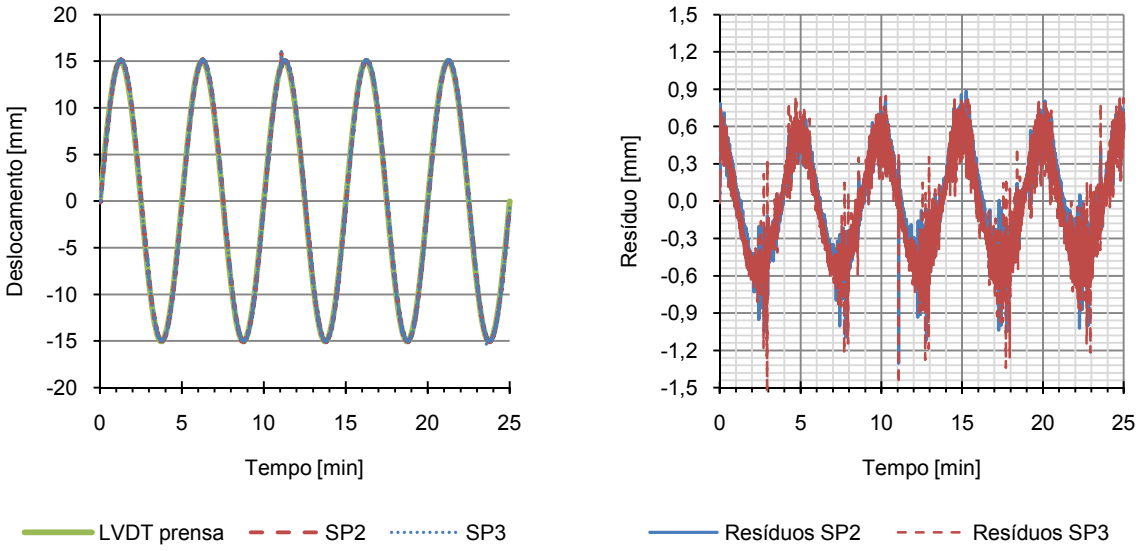
(a) (b)

Figura A1.11 – Nuvem de pontos da linha de base no plano NS - Vertical (a) e EW - Vertical (b).

ANEXO A2

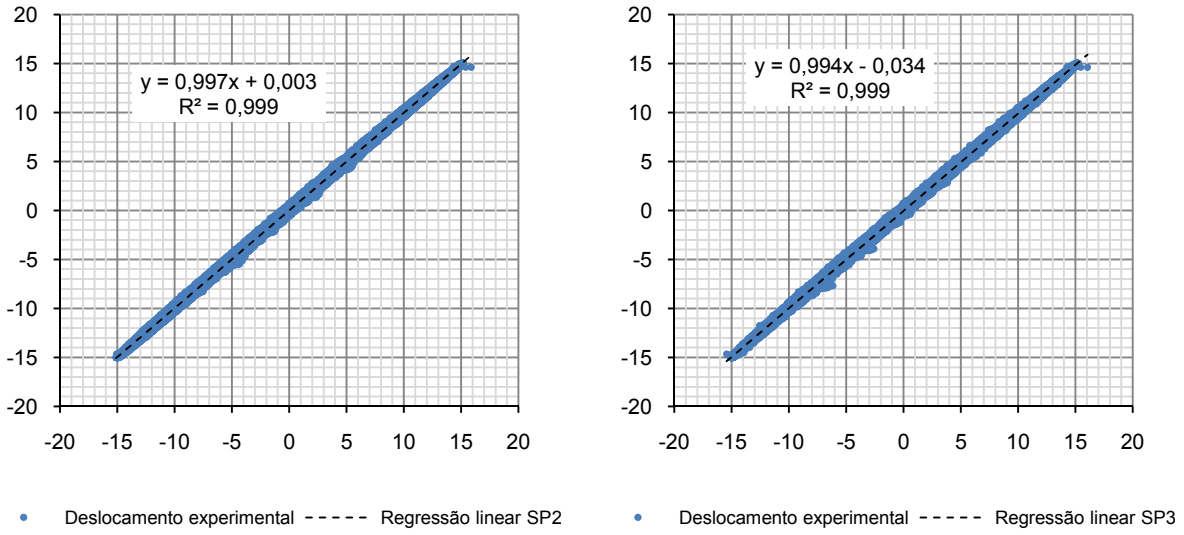
A2.1. Análise do segundo conjunto de ensaios de medição de flechas com sistema de níveis líquidos

A2.1.1. Ensaio 2.1



(a) (b)

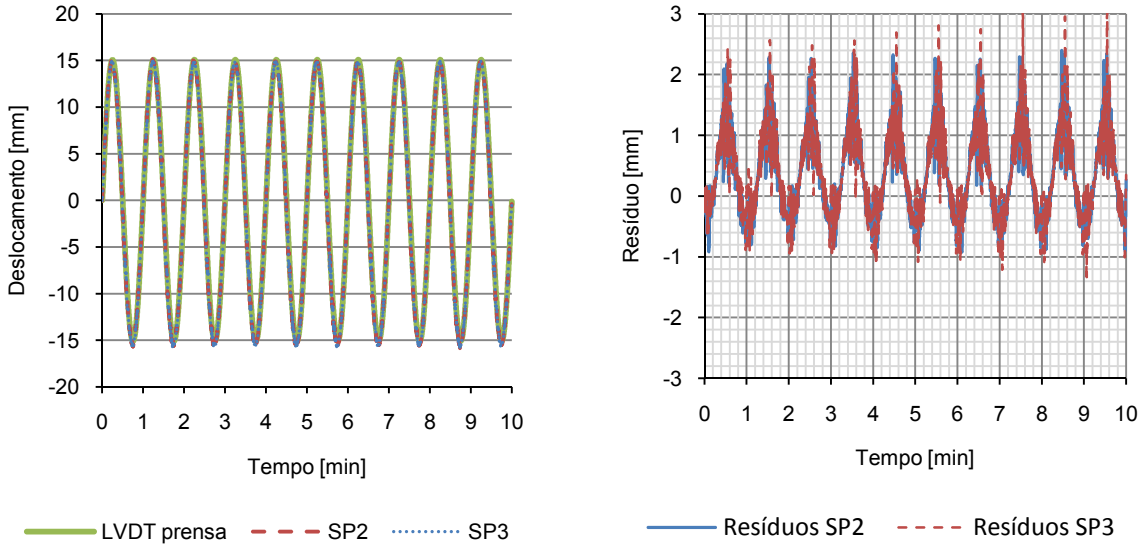
Figura A2.1 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

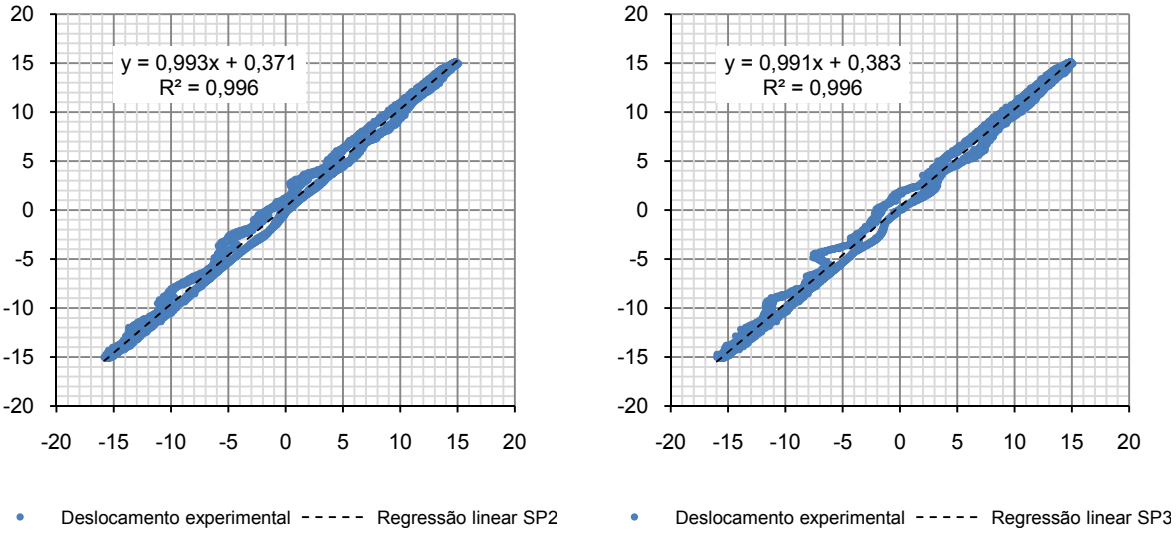
Figura A2.2 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.1.2. Ensaio 2.2



(a) (b)

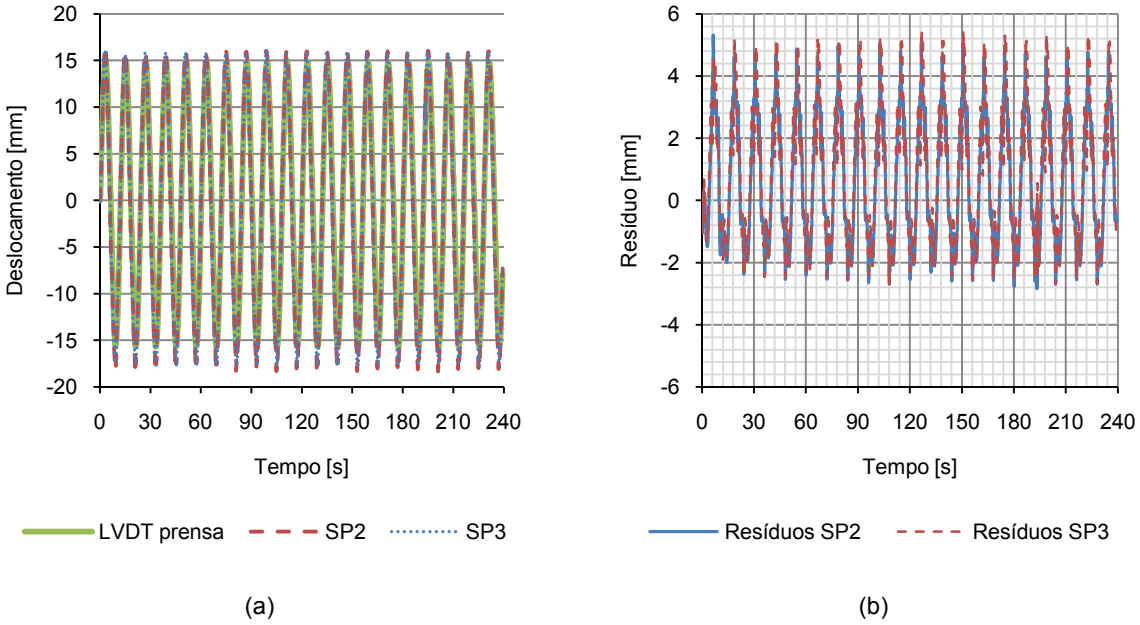
Figura A2.3 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

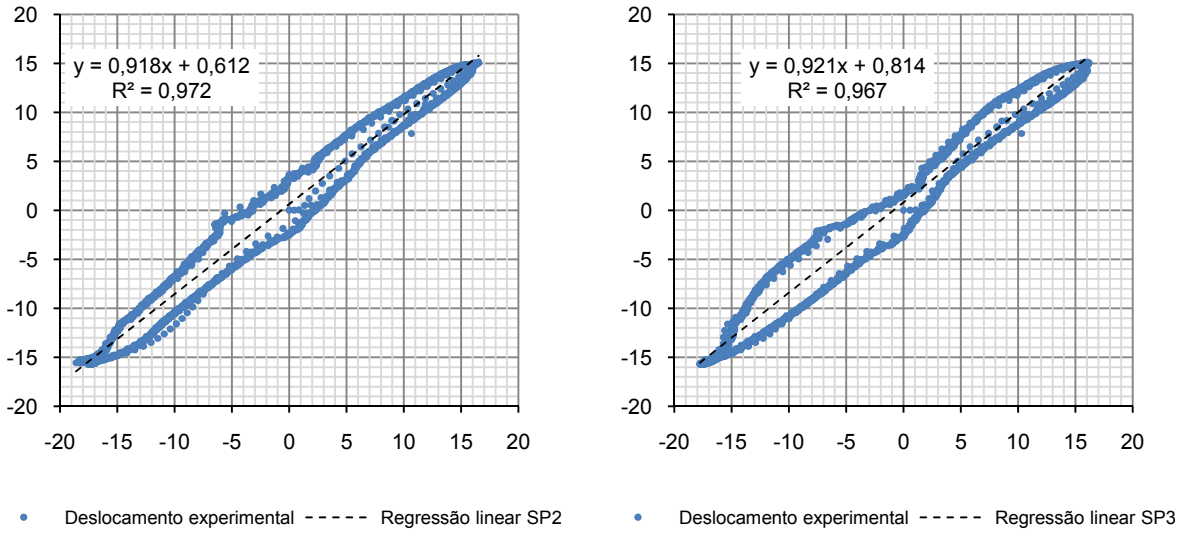
Figura A2.4 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.1.3. Ensaio 2.3



(a) (b)

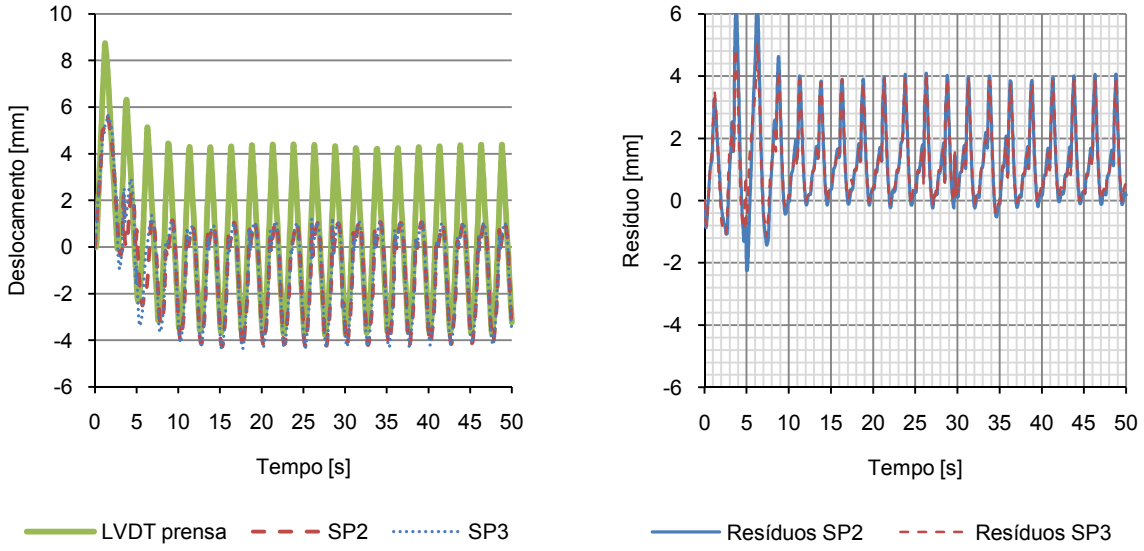
Figura A2.5 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

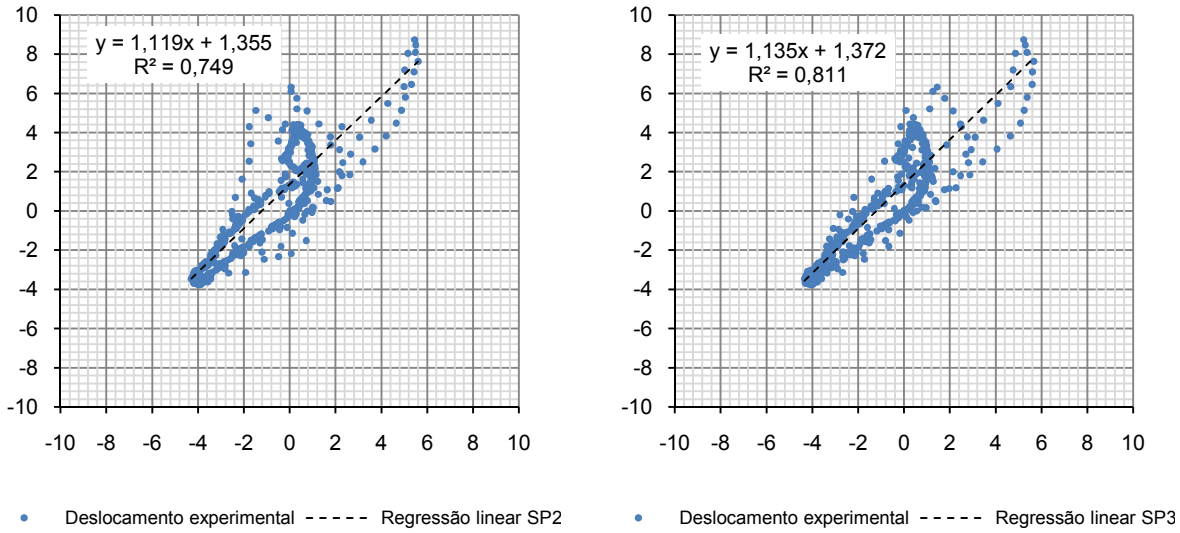
Figura A2.6 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.1.4. Ensaio 2.4



(a) (b)

Figura A2.7 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).

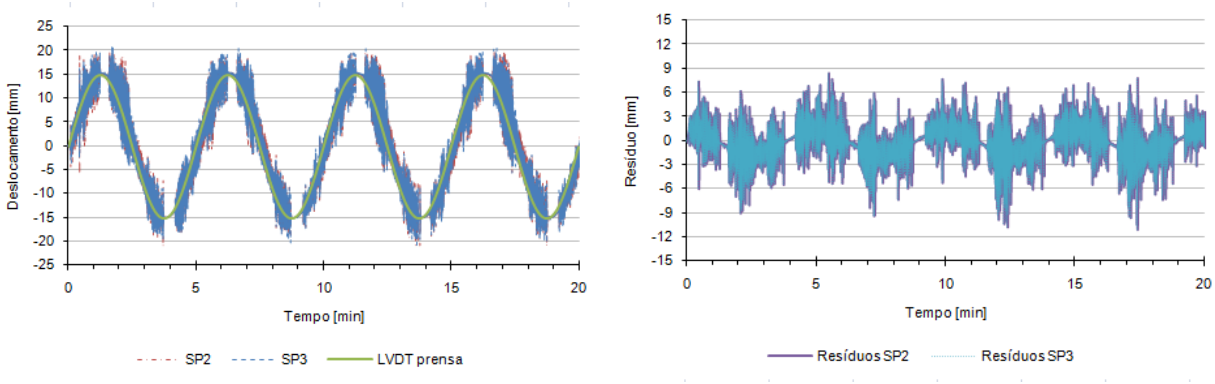


(a) (b)

Figura A2.8 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

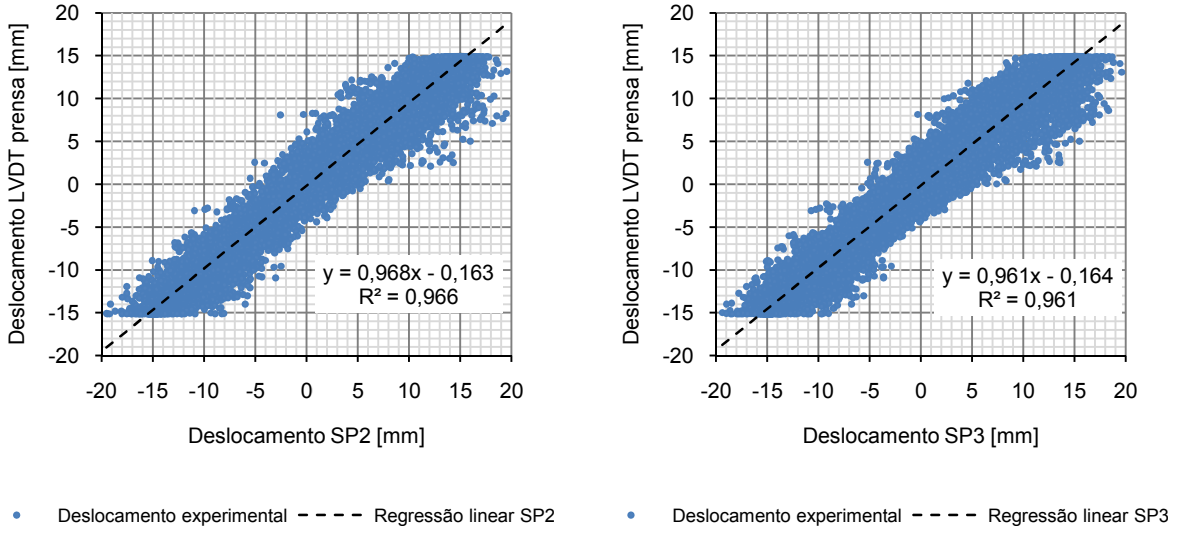
A2.2. Análise do terceiro conjunto de ensaios de medição de flechas com sistema de níveis líquidos

A2.2.1. Ensaio 3.1



(a) (b)

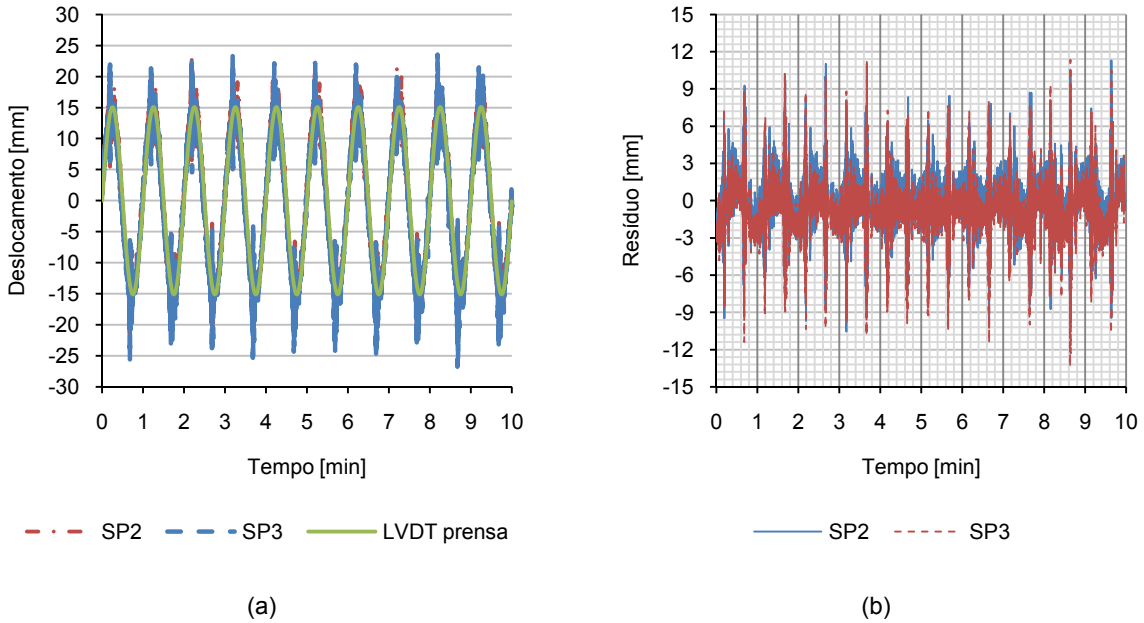
Figura A2.9 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

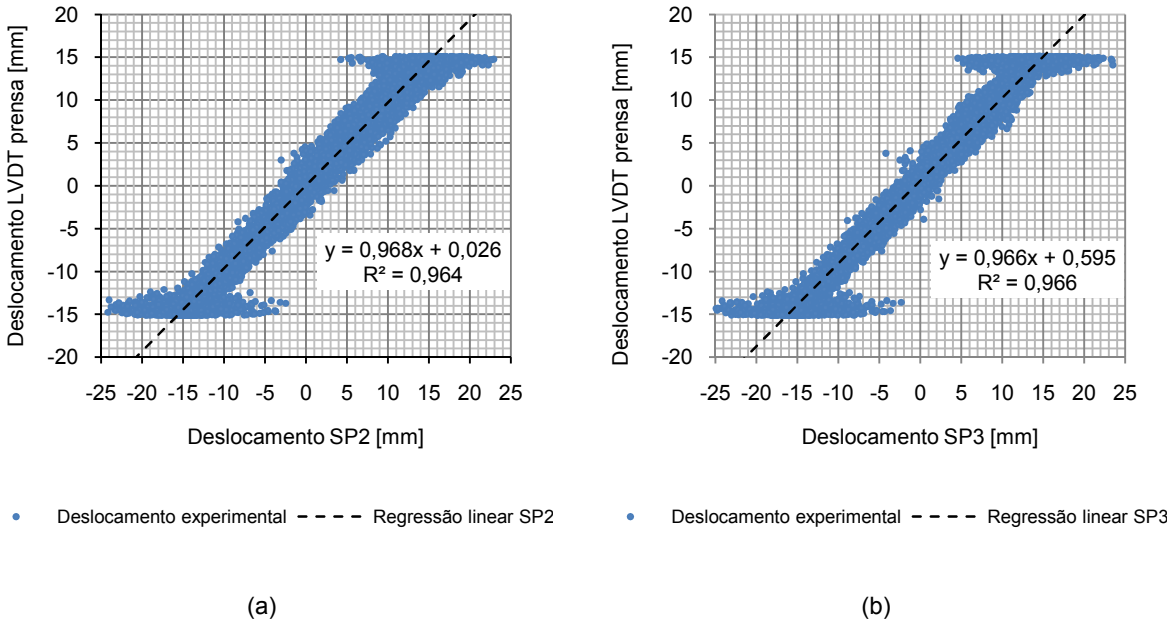
Figura A2.10 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.2.2. Ensaio 3.2



(a) (b)

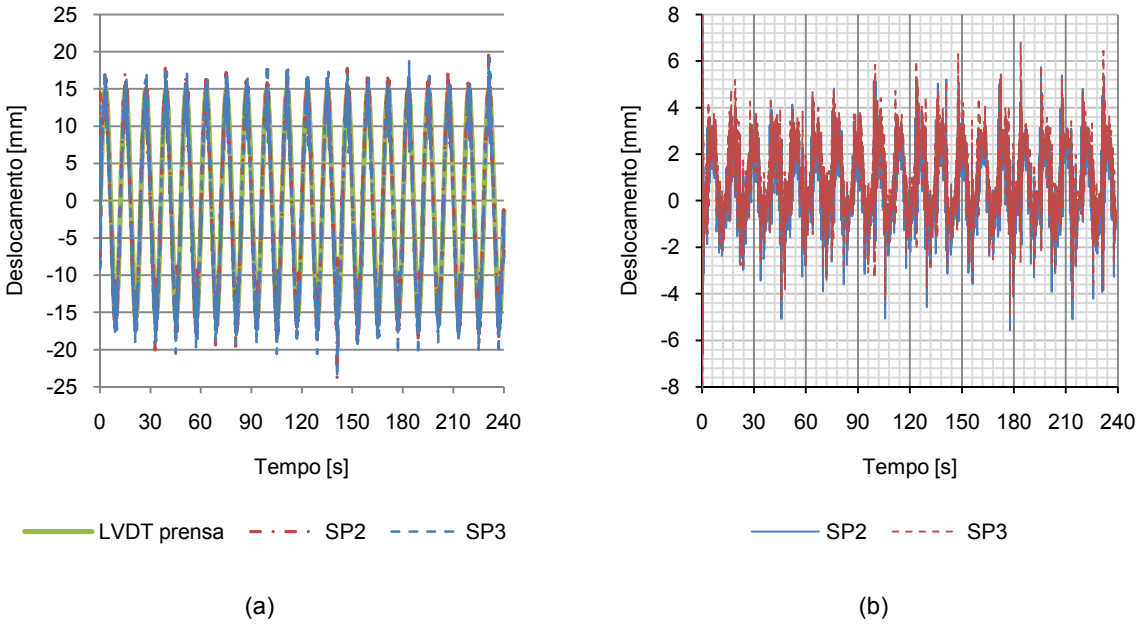
Figura A2.11 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

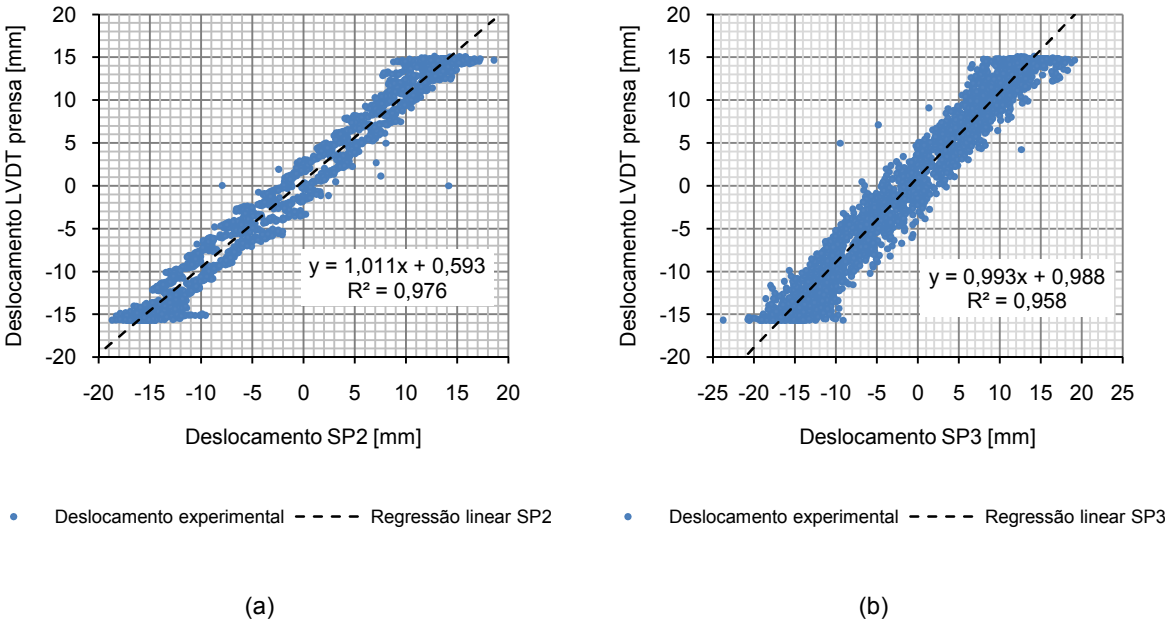
Figura A2.12 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.2.3. Ensaio 3.3



(a) (b)

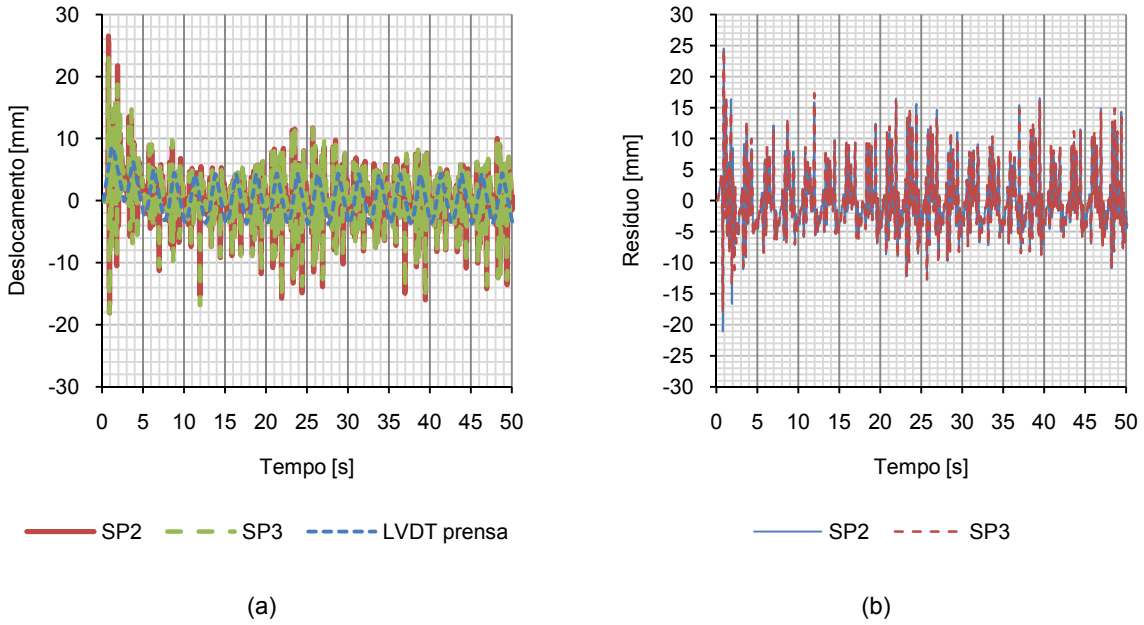
Figura A2.13 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

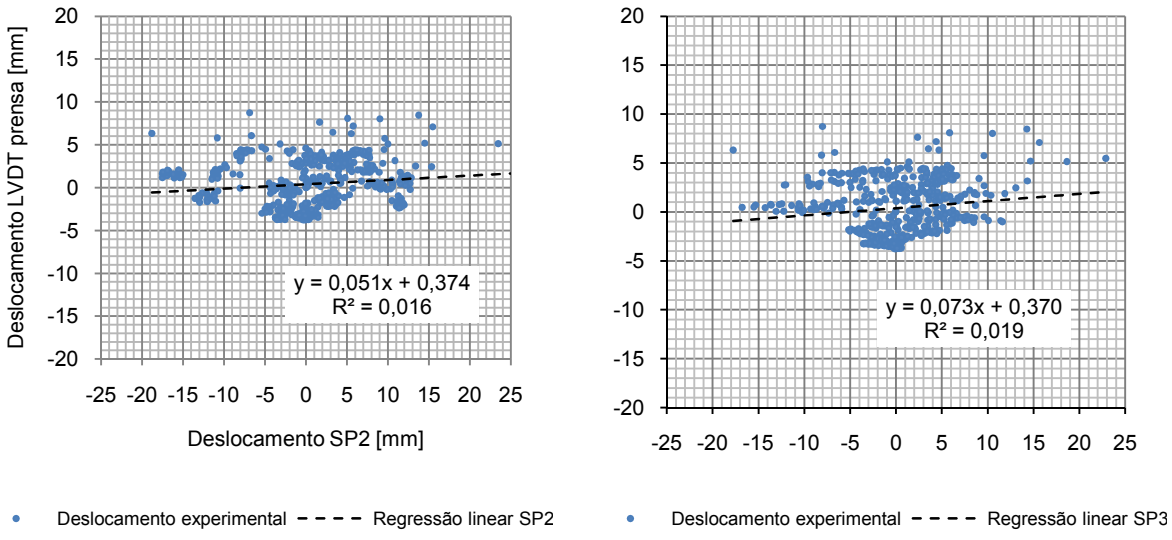
Figura A2.14 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).

A2.2.4. Ensaio 3.4



(a) (b)

Figura A2.15 - Comparação do deslocamento registado pela prensa e pelos transdutores eléctricos (a) e respectivo resíduo (b).



(a) (b)

Figura A2.16 – Correlação entre deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e pelos transdutores eléctricos: SP2 (a) e SP3 (b).