



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA E CALIBRAÇÃO DE UM CALIBRADOR DE EXTENSÓMETROS DE CORDA VIBRANTE

Estudo realizado para o Departamento de Barragens  
de Betão do LNEC

Lisboa • junho 2021

**OAC&T** INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 219/2021 – **CIC/NQM**

## **Título**

**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA E CALIBRAÇÃO DE UM CALIBRADOR DE EXTENSÓMETROS DE CORDA VIBRANTE**

## **Autoria**

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

**Luís Filipe Lages Martins**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Qualidade Metrológica

**Alexandre Vieira Pinheiro**

Técnico Superior, Núcleo de Qualidade Metrológica

## **Colaboração**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

**Carlos Luís de Oliveira Macedo Serra**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

**Hugo Miguel Barros Pernauta**

Técnico Superior, Núcleo de Observação

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 219/2021

Proc. 0904/3202/CALBIN

## CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA E CALIBRAÇÃO DE UM CALIBRADOR DE EXTENSÓMETROS DE CORDA VIBRANTE

### Resumo

---

Este relatório descreve os ensaios de caracterização metrológica e de calibração realizados nas instalações laboratoriais da Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC, relativos a um calibrador de extensómetros de corda vibrante, utilizado como padrão itinerante na calibração *in situ* deste tipo de instrumentos de medição previamente à instalação em barragens de betão.

Palavras-chave: Barragem de betão / Instrumentação / Extensómetro de corda vibrante / Calibração / Caracterização metrológica

## METROLOGICAL CHARACTERIZATION AND CALIBRATION OF A VIBRATING WIRE STRAIN GAUGE CALIBRATOR

### Abstract

---

This report describes the metrological characterization and calibration tests performed at the laboratorial facilities of LNEC's Applied Metrology Unit, regarding a vibrating wire strain gauge calibrator, used as a traveling measurement standard for *in situ* calibration of this type of measurement instruments previously to their installation on concrete dams.

Keywords: Concrete dam / Instrumentation / Vibrating wire strain gauge / Calibration / Metrological characterization



## Índice

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução .....  | 1  |
| 2     | Descrição do calibrador.....  | 3  |
| 3     | Ensaio realizado .....  | 4  |
| 3.1   | Nota introdutória .....   | 4  |
| 3.2   | Calibração do comparador digital .....                                    | 4  |
| 3.3   | Ensaio dimensional e geométrico do calibrador .....                       | 5  |
| 4     | Resultados .....  | 10 |
| 4.1   | Calibração do comparador digital .....                                    | 10 |
| 4.2   | Ensaio do calibrador .....  | 11 |
| 4.2.1 | Ensaio dimensional .....  | 11 |
| 4.2.2 | Ensaio geométrico.....  | 13 |
| 4.2.3 | Deformações localizadas.....  | 15 |
| 5     | Conclusões e considerações finais .....                                   | 51 |
|       | Referências bibliográficas .....  | 53 |
|       | ANEXOS.....   | 55 |
|       | ANEXO I – Certificado de calibração do comparador digital .....           | 57 |
|       | ANEXO II – Boletim de ensaio dimensional e geométrico do calibrador ..... | 61 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Componentes principais do calibrador de extensómetros de corda vibrante .....                              | 3  |
| Figura 3.1 – Comparador digital do calibrador .....   | 4  |
| Figura 3.2 – Referencial de medição no calibrador .....   | 6  |
| Figura 3.3 – Ponto de medição manual para ativação do modo de medição automática .....                                  | 6  |
| Figura 3.4 – Pontos medidos na haste do comparador e na superfície de contacto com a ponta de medição.....              | 7  |
| Figura 3.5 – Eixo e plano de apoio do comparador .....  | 7  |
| Figura 3.6 – Pontos medidos para definição do plano móvel .....   | 7  |
| Figura 3.7 – Pontos medidos para definição do plano fixo .....  | 7  |
| Figura 3.8 – Pontos medidos na extremidade móvel do extensómetro.....   | 7  |
| Figura 3.9 – Pontos medidos na extremidade fixa do extensómetro .....   | 7  |
| Figura 3.10 – Pontos medidos na fixação da extremidade móvel do extensómetro .....                                      | 8  |
| Figura 3.11 – Pontos medidos na fixação da extremidade fixa do extensómetro .....                                       | 8  |
| Figura 3.12 – Pontos medidos na superfície de fixação da extremidade móvel do extensómetro.....                         | 8  |
| Figura 3.13 – Pontos medidos na superfície da fixação da extremidade fixa do extensómetro.....                          | 8  |
| Figura 3.14 – Circunferências e eixo do extensómetro.....   | 9  |
| Figura 3.15 – Circunferências e eixos das barras de guiamento.....  | 9  |
| Figura 4.1 – Resultados dimensionais das calibrações do comparador.....   | 10 |
| Figura 4.2 – Resultados da força exercida pela haste do comparador .....  | 10 |
| Figura 4.3 – Desvios dimensionais associados ao deslocamento do plano móvel, antes e depois da adaptação .....          | 12 |
| Figura 4.4 – Desvios dimensionais associados à distância entre os planos móvel e fixo, antes e depois da adaptação..... | 13 |
| Figura 4.5 – Ortogonalidade do calibrador antes e depois da adaptação .....   | 14 |
| Figura 4.6 – Paralelismo entre elementos do calibrador antes e depois da adaptação .....                                | 15 |
| Figura 4.7 – Direção X – deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio .....                               | 16 |
| Figura 4.8 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio .....                               | 16 |
| Figura 4.9 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio.....                                | 16 |
| Figura 4.10 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio .....                              | 17 |
| Figura 4.11 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio .....                              | 17 |
| Figura 4.12 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio .....                              | 17 |
| Figura 4.13 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio .....                              | 18 |
| Figura 4.14 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio .....                              | 18 |
| Figura 4.15 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio .....                              | 18 |
| Figura 4.16 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio.....                                     | 20 |
| Figura 4.17 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio.....                                     | 20 |
| Figura 4.18 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio.....                                     | 20 |
| Figura 4.19 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio.....                                     | 21 |
| Figura 4.20 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio.....                                     | 21 |
| Figura 4.21 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio.....                                     | 21 |
| Figura 4.22 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio.....                                     | 22 |
| Figura 4.23 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio.....                                     | 22 |
| Figura 4.24 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio.....                                     | 22 |
| Figura 4.25 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio.....                                     | 24 |
| Figura 4.26 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio.....                                     | 24 |
| Figura 4.27 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio.....                                     | 24 |

Figura 4.28 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio.....25

Figura 4.29 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio.....25

Figura 4.30 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio.....25

Figura 4.31 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio.....26

Figura 4.32 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio.....26

Figura 4.33 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio.....26

Figura 4.34 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio .....28

Figura 4.35 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio .....28

Figura 4.36 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio .....28

Figura 4.37 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio .....29

Figura 4.38 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio .....29

Figura 4.39 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio .....29

Figura 4.40 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio .....30

Figura 4.41 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio .....30

Figura 4.42 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio .....30

Figura 4.43 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio ..32

Figura 4.44 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio..32

Figura 4.45 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio ..32

Figura 4.46 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio..33

Figura 4.47 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio..33

Figura 4.48 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio ..33

Figura 4.49 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio..34

Figura 4.50 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio..34

Figura 4.51 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio ..34

Figura 4.52 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio.....36

Figura 4.53 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio.....36

Figura 4.54 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio.....36

Figura 4.55 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio.....37

Figura 4.56 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio.....37

Figura 4.57 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio.....37

Figura 4.58 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio.....38

Figura 4.59 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio.....38

Figura 4.60 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio.....38

Figura 4.61 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio .....40

Figura 4.62 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio .....40

Figura 4.63 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio .....40

Figura 4.64 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio .....41

Figura 4.65 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio .....41

Figura 4.66 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio .....41

Figura 4.67 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio .....42

Figura 4.68 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio .....42

Figura 4.69 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio .....42

Figura 4.70 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio.....44

Figura 4.71 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio.....44

Figura 4.72 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio.....44

Figura 4.73 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio.....45

Figura 4.74 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio.....45

Figura 4.75 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio.....45

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.76 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio..... | 46 |
| Figura 4.77 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio..... | 46 |
| Figura 4.78 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio..... | 46 |
| Figura 4.79 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio..... | 48 |
| Figura 4.80 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio..... | 48 |
| Figura 4.81 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio..... | 48 |
| Figura 4.82 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio..... | 49 |
| Figura 4.83 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio..... | 49 |
| Figura 4.84 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio..... | 49 |
| Figura 4.85 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio..... | 50 |
| Figura 4.86 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio..... | 50 |
| Figura 4.87 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio..... | 50 |

## Índice de quadros

|   |    |
|---|----|
| Quadro 4.1 – Resultados associados à avaliação da exatidão da medição do deslocamento do plano móvel.....   | 11 |
| Quadro 4.2 – Resultados associados à medição da distância entre os planos móvel e fixo .....                | 12 |
| Quadro 4.3 – Resultados associados à ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio ..... | 13 |
| Quadro 4.4 – Resultados do paralelismo entre elementos geométricos medidos no calibrador ensaiado.....      | 14 |



# 1 | Introdução

O Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) de Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC tem, entre as suas atribuições, o desenvolvimento de atividade de I&D em Metrologia Aplicada em Engenharia Civil. Esta atividade tem um carácter transversal, sendo aplicada em diversas áreas como são: as Barragens de Betão, a Geotecnia, a Hidráulica, as Estruturas, os Edifícios, os Materiais e as Vias de Comunicação.

A sua ação pode ser concretizada por diferentes formas, sendo uma delas o desenvolvimento de estudos visando promover a caracterização metrológica de equipamentos e sistemas de medição utilizados por outros Setores do LNEC ou por Entidades com as quais existe cooperação institucional. Dessa forma, o NQM disponibiliza informação relacionada com a qualidade da medição contribuindo, assim, para um nível mais elevado do estado de conhecimento.

Estes estudos de natureza metrológica podem ser desenvolvidos em ambientes distintos de atividade (do tipo laboratorial, industrial ou em obra), garantindo a rastreabilidade (JCGM 200:2012) das medições ao Sistema Internacional de Unidades (SI) e permitindo a quantificação da incerteza de medição (EA-4/02 M:2013; EA-4/16 G:2003; JCGM 100:2008) associada à utilização de instrumentos de medição nesses ambientes. Deste modo, é promovida a confiança nas medições realizadas, o que se revela essencial pelo impacto que têm no contexto económico e social.

O presente relatório é elaborado com o intuito de completar a resposta a uma solicitação do Núcleo de Observação do Departamento de Barragens do LNEC, visando a caracterização metrológica e a calibração de um calibrador de extensómetros de corda vibrante, o qual pretende-se que constitua um padrão de medição itinerante destinado a efetuar a calibração *in situ* deste tipo de instrumentos em barragens de betão.

Salienta-se que o calibrador sujeito a caracterização metrológica e a calibração foi inicialmente concebido e projetado para aplicação a extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson (Ribeiro; Martins; 2013) cuja produção foi, entretanto, descontinuada pelo seu fabricante. Este facto motivou a adoção de uma solução de instrumentação alternativa, por parte do Núcleo de Observação do Departamento de Barragens de Betão do LNEC, tendo-se optado pela utilização de extensómetros de corda vibrante, o que implicou a necessidade de adaptação mecânica do calibrador para realizar a calibração *in situ*.

A caracterização metrológica efetuada no seguimento desta adaptação foi suportada num conjunto de ensaios experimentais realizados nas instalações laboratoriais da Unidade de Metrologia Aplicada (UMA), inserida organicamente no CIC / NQM do LNEC. Esta Unidade Operativa laboratorial dispõe de ensaios acreditados no âmbito do Sistema Português da Qualidade desde 1994, sendo-lhe periodicamente reconhecida competência pelo IPAC – Instituto Português da Acreditação, para a realização de um conjunto significativo de calibrações (nas áreas Dimensional, Massa, Pressão, Força, Temperatura, Humidade, Velocidade e Aceleração) e de ensaios metrológicos (de meios

termorregulados, materiais de engenharia, maquinaria, estruturas e produtos). Deste modo, a UMA dispõe dos recursos necessários quer à caracterização metrológica pretendida quer à calibração, nomeadamente, de equipamento padrão de referência rastreado ao Sistema Internacional de Unidades (SI), instalações laboratoriais com condicionamento ambiental e quadro técnico qualificado.

Nas secções seguintes são descritos os ensaios experimentais visando a caracterização metrológica e a calibração do referido calibrador, incluindo os aspetos relacionados com a montagem experimental e a parte essencial para a compreensão do procedimento adotado, bem como os resultados obtidos e dos documentos (certificado de calibração e boletim de ensaio que se mostram, respetivamente, nos Anexos I e II) que resultaram deste estudo.

## 2 | Descrição do calibrador

A Figura 2.1 mostra o calibrador de extensómetros de corda vibrante que foi objeto da caracterização metrológica e calibração descritas neste relatório. Nesta Figura, constam os principais componentes nos quais se efetuaram medições dimensionais e geométricas com interesse para a caracterização metrológica e calibração do calibrador.

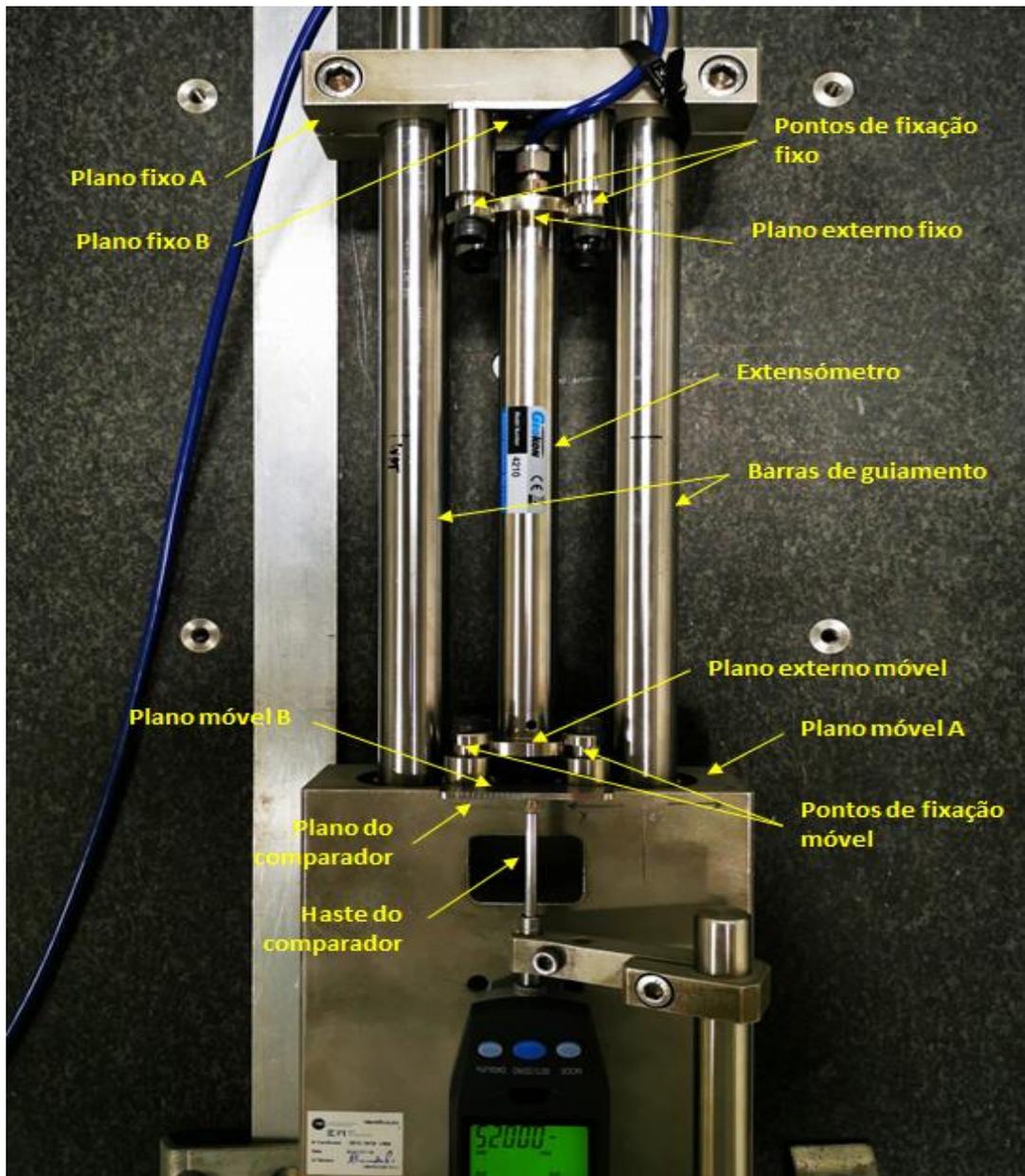


Figura 2.1 – Componentes principais do calibrador de extensómetros de corda vibrante

## 3 | Ensaios realizados

### 3.1 Nota introdutória

Os ensaios realizados no calibrador de extensómetros de corda vibrante podem ser agrupados em dois conjuntos: (i) a calibração do comparador que integra o calibrador (ver descrição na secção 3.2) e; (ii) o ensaio dimensional e geométrico do calibrador (ver descrição na secção 3.3).

### 3.2 Calibração do comparador digital

O comparador (marca Mitutoyo, modelo ID-H0560, identificação 11144524) que integra o calibrador de extensómetros de corda vibrante (Figura 3.1) apresenta uma haste telescópica e indicador digital, tendo um intervalo de medição compreendido entre 0 mm e 50 mm e uma resolução igual a 0,0005 mm.



Figura 3.1 – Comparador digital do calibrador

Na sua calibração dimensional foi utilizado, como equipamento padrão, um calibrador digital de comparadores (marca Sylvac, modelo D90/P50, identificação 692.01), com rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI), conforme mencionado no seu certificado de calibração (CDIM 3493/19 emitido pelo ISQ em 2019-06-25). Em acréscimo, foi também utilizado como equipamento padrão, um transdutor de força com indicador digital (marca Burster, modelo 9162-V200, identificação 33.08) para a medição da força exercida pela haste do comparador. A rastreabilidade deste equipamento ao Sistema Internacional de Unidades (SI) é mencionada no seu certificado de calibração (0045/2021-UMA emitido pela UMA/LNEC-EM em 2021-03-02).

A calibração do comparador decorreu nas instalações laboratoriais da UMA, cumprindo os requisitos de condicionamento ambiental estabelecidos internacionalmente para este efeito, isto é, uma temperatura do ar compreendida entre 19 °C e 21 °C e uma humidade relativa igual ou inferior a 65 %.

O procedimento adotado nesta operação metrológica (MA/MEC.PRC.0201; 2017) prevê a determinação dos desvios de calibração ao longo do intervalo de medição do comparador, em particular, os desvios máximos no sentido crescente, decrescente e em ambas as direções, bem como a reversibilidade e a repetibilidade. Prevê, ainda, a determinação da força máxima de contacto exercida pela haste do comparador e o valor máximo da diferença de força associada a diferentes posições de recolhimento da haste.

### 3.3 Ensaio dimensional e geométrico do calibrador

O ensaio dimensional e geométrico do calibrador foi realizado com recurso a uma máquina de medição de coordenadas tridimensionais (MMC 3D). Este equipamento de referência (marca DEA, modelo Gamma 2203, identificação 203.01) possui um intervalo de medição igual a 1500 mm x 1000 mm x 1000 mm e uma resolução de 0,0001 mm, incluindo uma aplicação computacional – MCosmos, versão 3.5 – que permite a construção de elementos geométricos (linhas, planos, circunferências, cilindros, entre outros) que suportam a medição de grandezas dimensionais e geométricas de interesse. A sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI) é mencionada no certificado de calibração (01/020/2018 emitido pela EAC em 2018-03-20).

O ensaio decorreu nas instalações laboratoriais da UMA, tendo-se assegurado o cumprimento dos requisitos de condicionamento ambiental em temperatura ( $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ ) e humidade relativa ( $\leq 65\%$ ) definidos internacionalmente para o domínio metrológico do comprimento.

O ensaio foi realizado seguindo as indicações genéricas que constam de um procedimento interno (MA/MEC.PRC.1301; 2014) dedicado à medição dimensional de componentes, as quais foram adaptadas ao contexto de caracterização do calibrador de extensómetros. No conjunto de ensaios realizados, destacam-se:

- i. a avaliação da exatidão da medição do deslocamento do plano móvel;
- ii. a medição da distância entre os planos móvel e fixo;
- iii. a determinação da ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio; e
- iv. a quantificação do paralelismo entre os seguintes elementos:
  - a. plano móvel e plano fixo;
  - b. eixo do comparador e eixo do extensómetro;
  - c. plano do comparador e plano externo móvel;
  - d. plano do comparador e plano móvel; e
  - e. eixos das barras de guiamento.

O referencial de medição utilizado (ver Figura 3.2) foi construído com base em elementos geométricos medidos, em modo manual, no calibrador, nomeadamente, dois círculos numa das barras de guiamento, um ponto no plano móvel e uma linha. Este referencial materializou o sistema de coordenadas cartesiano ( $X, Y, Z$ ), onde  $X$  representa a direção associada ao deslocamento unidimensional que se pretende aplicar ao extensómetro de corda vibrante instalado no calibrador,  $Y$  é a direção transversal ao deslocamento e  $Z$  é a direção perpendicular ao plano  $XY$ .

Em acréscimo ao referencial de medição mencionado anteriormente, a inicialização da rotina de medição automática dos pontos de interesse no calibrador foi suportada na medição de um ponto localizado na extremidade da haste do comparador, que se mostra na Figura 3.3.

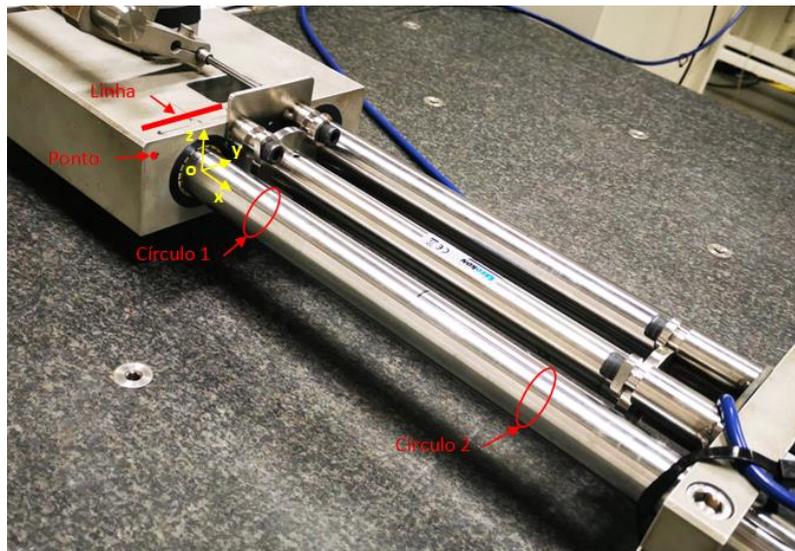


Figura 3.2 – Referencial de medição no calibrador

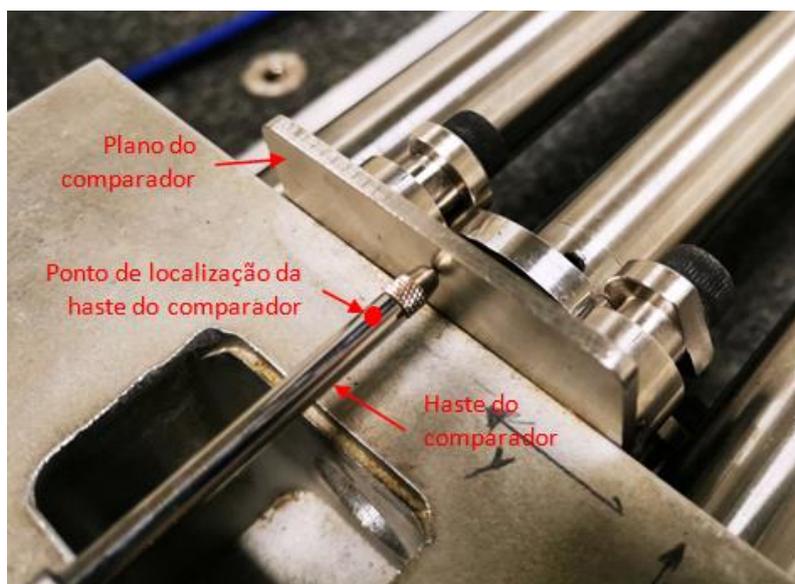


Figura 3.3 – Ponto de medição manual para ativação do modo de medição automática

No conjunto de elementos geométricos construídos com base na medição automática de pontos espaciais no calibrador, destacam-se:

- i. três circunferências ao longo da haste do comparador – Figura 3.4 – definidas com base em sete pontos por circunferência, a partir das quais se determinou o eixo associado à haste do comparador (ver Figura 3.5);
- ii. um plano representativo do plano de contacto com a ponta de medição do comparador (ver Figura 3.5), com base na determinação das coordenadas de cinco pontos espaciais distribuídos por essa superfície do calibrador (enumerados na Figura 3.4);

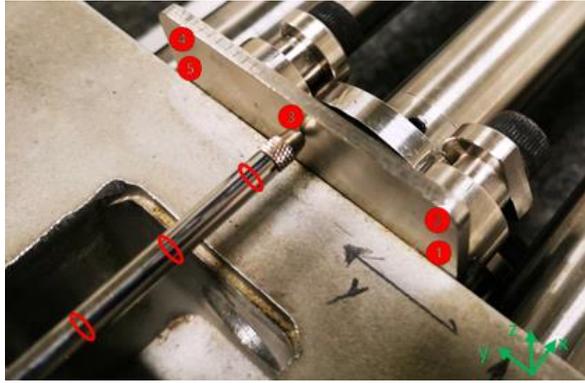


Figura 3.4 – Pontos medidos na haste do comparador e na superfície de contacto com a ponta de medição

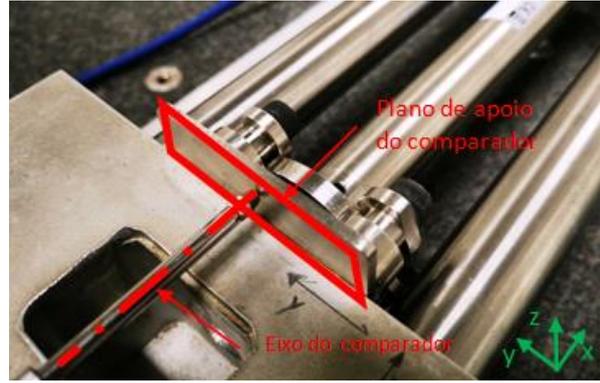


Figura 3.5 – Eixo e plano de apoio do comparador

- iii. dois planos representativos dos planos móvel e fixo, cada um obtido a partir da medição de quatro pontos espaciais na superfície de interesse (ver Figuras 3.6 e 3.7);



Figura 3.6 – Pontos medidos para definição do plano móvel



Figura 3.7 – Pontos medidos para definição do plano fixo

- iv. um plano e uma circunferência em cada extremidade (móvel e fixa) do extensómetro (ver Figuras 3.8 e 3.9);

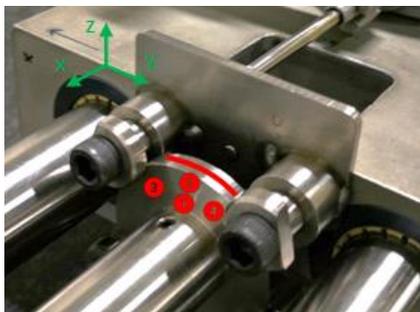


Figura 3.8 – Pontos medidos na extremidade móvel do extensómetro

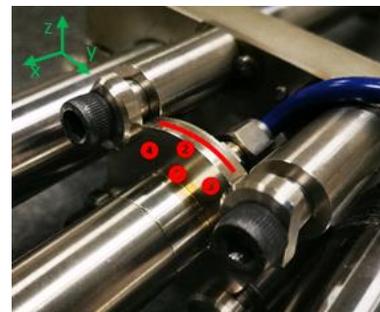


Figura 3.9 – Pontos medidos na extremidade fixa do extensómetro

- v. um ponto em cada região de fixação das extremidades (móvel e fixa) do extensómetro (ver Figura 3.10 e 3.11);

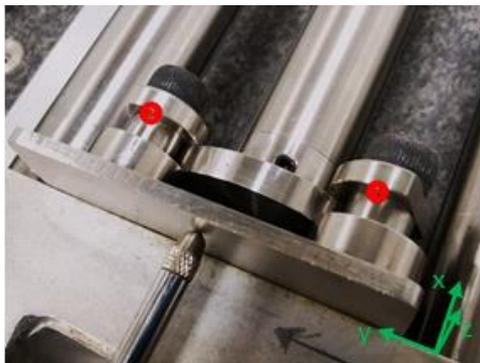


Figura 3.10 – Pontos medidos na fixação da extremidade móvel do extensómetro



Figura 3.11 – Pontos medidos na fixação da extremidade fixa do extensómetro

- vi. três pontos em cada superfície de fixação das extremidades (móvel e fixa) do extensómetro (ver Figuras 3.12 e 3.13);



Figura 3.12 – Pontos medidos na superfície de fixação da extremidade móvel do extensómetro



Figura 3.13 – Pontos medidos na superfície da fixação da extremidade fixa do extensómetro

- vii. três circunferências distribuídas pelo corpo cilíndrico do extensómetro (*vide* Figura 3.14), com base na medição de sete pontos por circunferência, e que suportaram a definição eixo do extensómetro instalado no calibrador;
- viii. três circunferências distribuídas por cada barra de guiamento do calibrador (*vide* Figura 3.15), obtidas com a medição de sete pontos por circunferência, e que suportaram a definição dos respetivos eixos das barras de guiamento do calibrador.

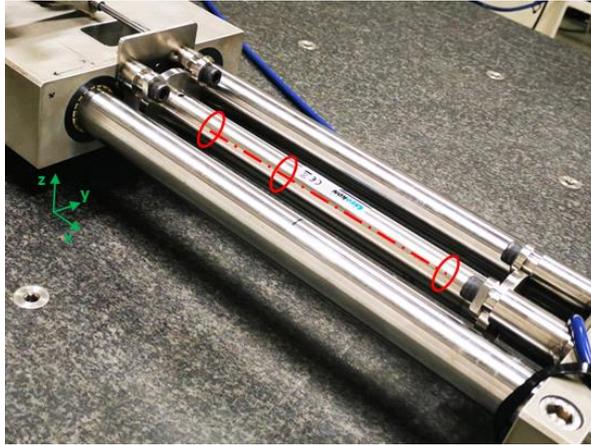


Figura 3.14 – Circunferências e eixo do extensômetro

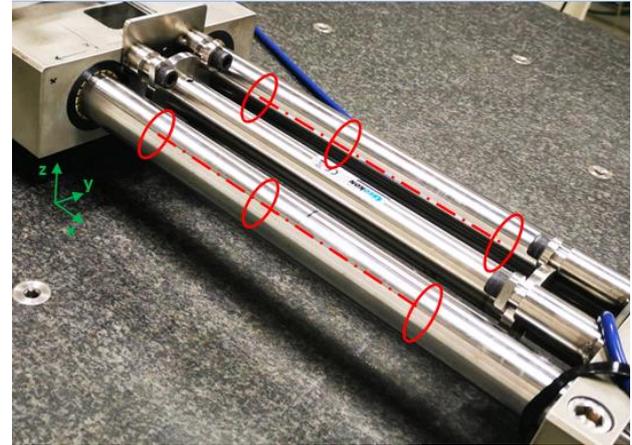


Figura 3.15 – Circunferências e eixos das barras de guiamento

As etapas de definição do referencial, inicialização e execução da rotina de medição descritas anteriormente foram executadas três vezes, tendo-se assegurado a desmontagem e montagem do extensômetro no calibrador entre repetições de ensaio.

As coordenadas espaciais obtidas permitiram, igualmente, o estudo das deformações localizadas nas regiões de medição no calibrador, nomeadamente, através da análise do deslocamento, segundo cada eixo do referencial de medição, entre patamares de calibração consecutivos nas três repetições de ensaio efetuadas. Este estudo foi efetuado nas seguintes regiões de medição no calibrador:

- i. no plano do comparador;
- ii. nos planos A e B nas regiões móvel e fixa do calibrador;
- iii. nos pontos de fixação nas regiões móvel e fixa do calibrador; e
- iv. nos planos externos nas regiões móvel e fixa do calibrador.

## 4 | Resultados

### 4.1 Calibração do comparador digital

As Figuras 4.1 e 4.2 resumem o conjunto de resultados obtidos na calibração do comparador do calibrador de extensómetros de corda vibrante efetuada em fevereiro de 2021. Estas Figuras mostram, igualmente, os resultados obtidos na última calibração (Certificado n.º 0513/2019-UMA) anterior à adaptação do calibrador (de extensómetros de resistência elétrica Carlson para extensómetros de corda vibrante).

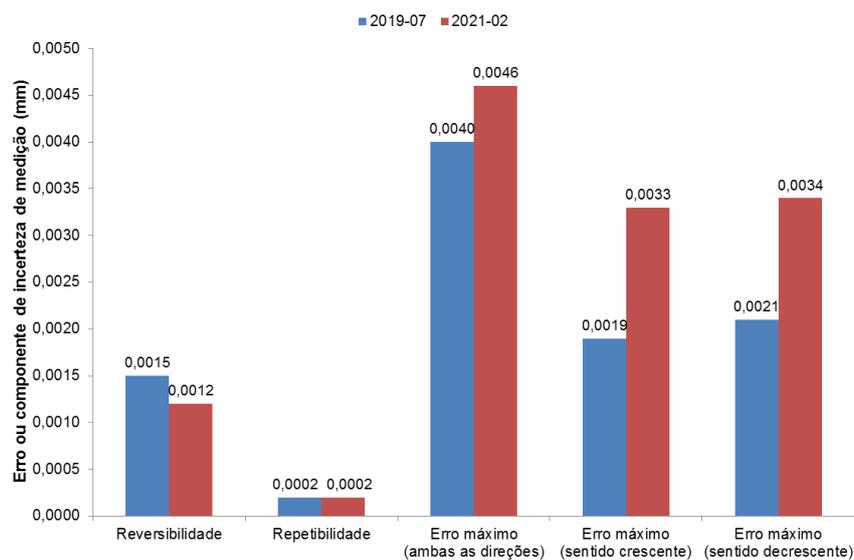


Figura 4.1 – Resultados dimensionais das calibrações do comparador

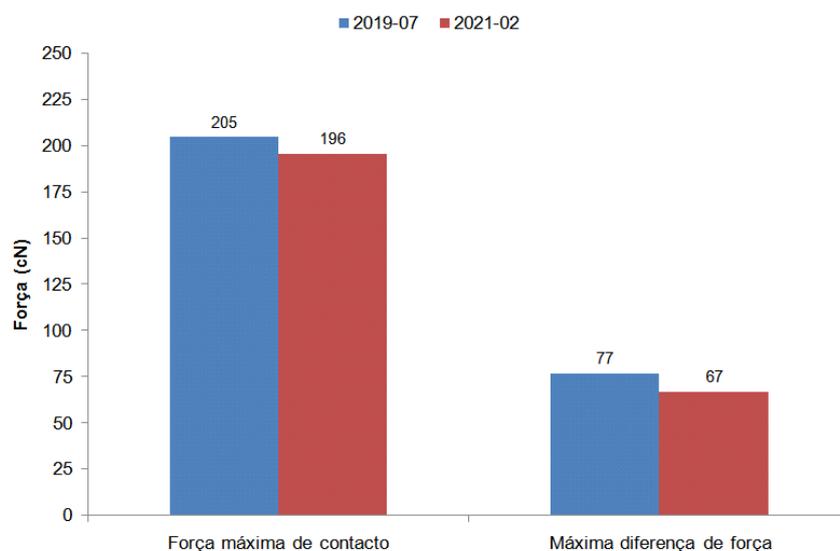


Figura 4.2 – Resultados da força exercida pela haste do comparador

No que respeita aos erros máximos obtidos, é possível observar um ligeiro acréscimo da sua magnitude entre as duas calibrações, na ordem de grandeza da incerteza de medição expandida associada à calibração efetuada (0,0017 mm, num intervalo de 95%). A reversibilidade e a repetibilidade instrumental do comparador permaneceram aproximadamente iguais entre calibrações, assim como a força máxima de contacto e a máxima diferença de força exercida pela haste, tendo em conta uma incerteza de medição expandida (num intervalo de 95 %) igual a 20 cN.

## 4.2 Ensaio do calibrador

### 4.2.1 Ensaio dimensionais

#### 4.2.1.1 Exatidão da medição do deslocamento do plano móvel

O Quadro 4.1 apresenta os resultados associados à avaliação da exatidão da medição do deslocamento do plano móvel do calibrador. Por sua vez, a Figura 4.3 apresenta os desvios dimensionais obtidos antes (Boletim n.º 514/2019-UMA) e os mesmos depois da adaptação do calibrador.

**Quadro 4.1 – Resultados associados à avaliação da exatidão da medição do deslocamento do plano móvel**

| Valor lido no comparador<br>/ mm | Valor médio de referência<br>/ mm | Incerteza expandida (95 %)<br>/ mm | Desvio dimensional<br>/ mm |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 0,000 0                          | 0,000 0                           | 0,007 0                            | 0,000 0                    |
| -0,031 7                         | -0,044 8                          | 0,010                              | 0,013                      |
| -0,062 0                         | -0,073 5                          | 0,008 2                            | 0,011 5                    |
| -0,093 0                         | -0,102 8                          | 0,007 8                            | 0,009 8                    |
| -0,079 0                         | -0,074 8                          | 0,008 0                            | -0,004 2                   |
| -0,051 2                         | -0,047 0                          | 0,008 7                            | -0,004 2                   |
| -0,024 2                         | -0,019 0                          | 0,008 4                            | -0,005 2                   |
| 0,008 5                          | 0,012 2                           | 0,008 0                            | -0,003 7                   |
| 0,041 7                          | 0,044 3                           | 0,008 7                            | -0,002 6                   |
| 0,031 5                          | 0,015 2                           | 0,008 2                            | 0,016 3                    |
| -0,001 0                         | -0,017 0                          | 0,008 5                            | 0,016 0                    |

Conforme se nota no Quadro 4.1 e na Figura 4.3, no ensaio efetuado não foi possível realizar patamares de deslocamento compreendidos entre +0,050 mm e +0,100 mm em resultado da limitação da força de tração associada ao acionamento manual do calibrador. Este facto é justificado pelo comportamento mecânico diferenciado dos dois tipos de extensómetros estudados, quando sujeitos à ação de uma força axial de tração. O extensómetro de resistência elétrica tipo Carlson apresenta uma composição estrutural com menor rigidez comparativamente com o extensómetro de corda vibrante, o que se reflete numa menor força necessária para atingir um determinado nível de deformação elástica.

A adaptação do calibrador ensaiado centrou-se na garantia de compatibilidade dimensional e geométrica com extensómetros de corda vibrante, não abrangendo a vertente do comportamento mecânico diferenciado em relação aos extensómetros de resistência tipo Carlson. Por este motivo, a realização dos mesmos patamares de deslocamento, implicou a aplicação de forças com maior magnitude, o que se traduziu numa degradação do comportamento metrológico do calibrador visto que os desvios dimensionais obtidos antes da adaptação se situavam no intervalo de  $\pm 0,005$  mm enquanto que, após a adaptação, estão compreendidos entre  $-0,005$  mm e  $+0,015$  mm. Os desvios com maior magnitude (absoluta) foram obtidos nos ciclos de compressão crescente e de tração decrescente, os quais favorecem a ocorrência de deformações acentuadas.

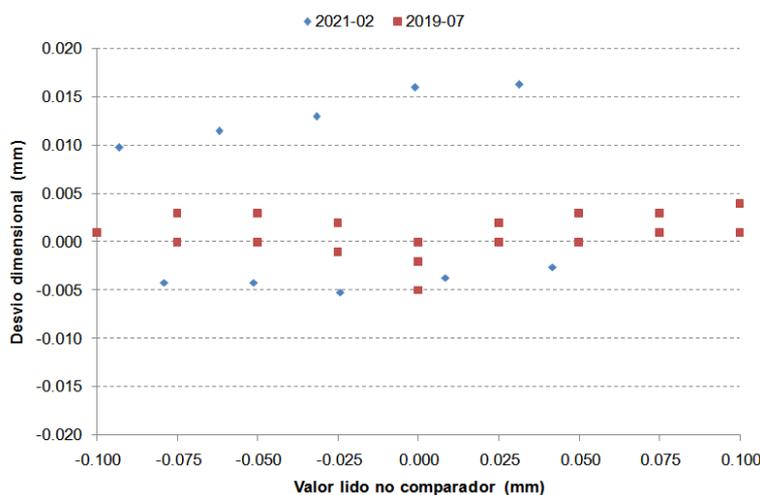


Figura 4.3 – Desvios dimensionais associados ao deslocamento do plano móvel, antes e depois da adaptação

#### 4.2.1.2 Distância entre os planos móvel e fixo

O Quadro 4.2 apresenta os resultados associados à medição da distância entre os planos móvel e fixo do calibrador. Por sua vez, a Figura 4.4 apresenta os desvios dimensionais obtidos antes e depois da adaptação do calibrador.

Quadro 4.2 – Resultados associados à medição da distância entre os planos móvel e fixo

| Valor lido no comparador / mm | Valor médio de referência / mm | Incerteza expandida (95 %) / mm | Desvio dimensional / mm |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,000 0                       | 0,000 0                        | 0,007 0                         | 0,000 0                 |
| -0,031 7                      | -0,043 8                       | 0,007 3                         | 0,012 1                 |
| -0,062 0                      | -0,072 2                       | 0,007 0                         | 0,010 2                 |
| -0,093 0                      | -0,102 7                       | 0,007 3                         | 0,009 7                 |
| -0,079 0                      | -0,073 1                       | 0,007 1                         | -0,005 9                |
| -0,051 2                      | -0,044 5                       | 0,007 4                         | -0,006 7                |
| -0,024 2                      | -0,014 8                       | 0,007 3                         | -0,009 4                |
| 0,008 5                       | 0,017 2                        | 0,007 1                         | -0,008 7                |
| 0,041 7                       | 0,048 9                        | 0,007 7                         | -0,007 2                |
| 0,031 5                       | 0,018 6                        | 0,007 0                         | 0,012 9                 |
| -0,001 0                      | -0,014 4                       | 0,007 1                         | 0,013 4                 |

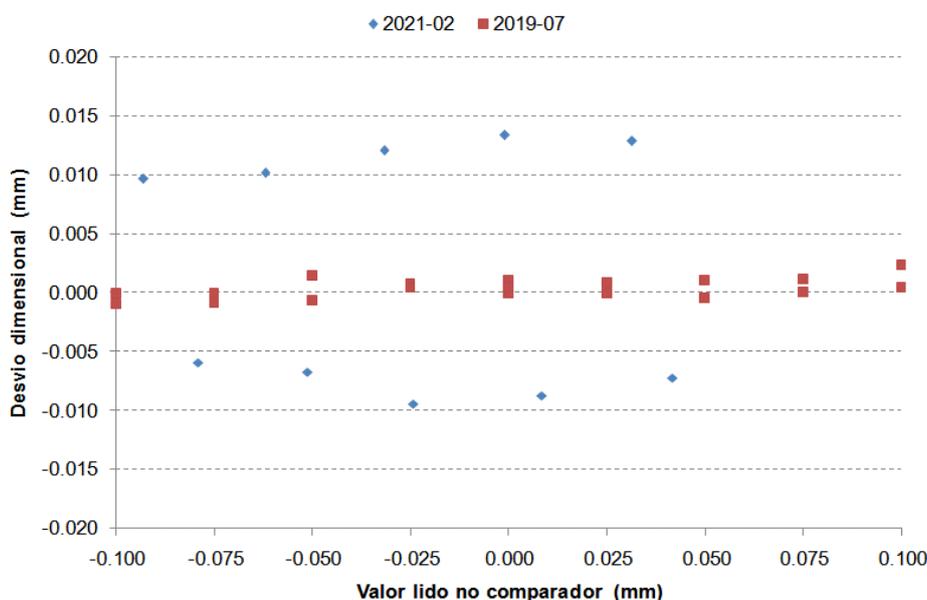


Figura 4.4 – Desvios dimensionais associados à distância entre os planos móvel e fixo, antes e depois da adaptação

Os resultados apresentados no Quadro 4.2 e na Figura 4.4 confirmam o comportamento metrológico observado anteriormente na avaliação da exatidão do deslocamento do plano móvel. Os desvios dimensionais obtidos antes da adaptação do calibrador situavam-se muito próximos de zero, com reduzida reversibilidade. Após a adaptação do calibrador, os desvios dimensionais obtidos estão compreendidos entre -0,010 mm e +0,015 mm notando-se que, nos ciclos de compressão crescente e tração decrescente, permanecem muito próximos dos mencionados na secção 4.2.1.1, tendo aumentado a sua magnitude para os restantes ciclos (de compressão decrescente e tração crescente). Este resultado é traduzido num aumento na reversibilidade de, aproximadamente, 5 µm.

## 4.2.2 Ensaio geométricos

### 4.2.2.1 Ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio

O Quadro 4.3 apresenta os resultados associados à ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio. Por sua vez, a Figura 4.5 apresenta os desvios de ortogonalidade obtidos antes e depois da adaptação do calibrador.

Quadro 4.3 – Resultados associados à ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio

| Identificação do ângulo | Valor médio de referência /° | Incerteza expandida (95 %) /° | Desvio de ortogonalidade /° |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 3D (XYZ)                | 89,852                       | 0,021                         | 0,148                       |
| 2D (XY)                 | 89,976                       | 0,025                         | 0,024                       |
| 2D (XZ)                 | 89,855                       | 0,023                         | 0,145                       |

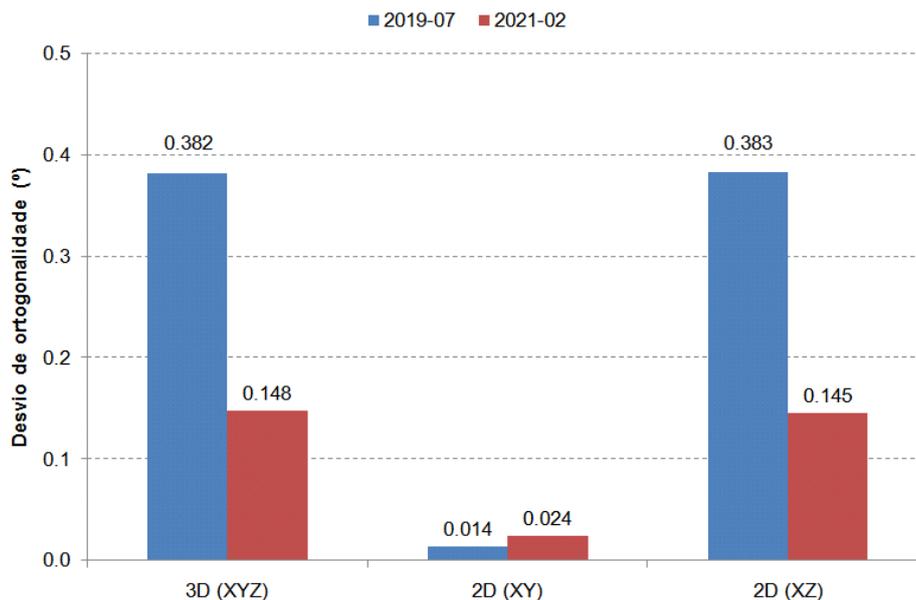


Figura 4.5 – Ortogonalidade do calibrador antes e depois da adaptação

Tendo em conta os desvios de ortogonalidade obtidos antes e após a adaptação do calibrador, verificou-se uma diminuição da sua magnitude, sobretudo, no plano XZ (aproximadamente paralelo ao plano associado à mesa da MMC 3D), o que contribuiu para a melhoria do comportamento metrológico do calibrador.

#### 4.2.2.2 Paralelismo

O Quadro 4.4 apresenta os resultados associados ao paralelismo entre elementos medidos no calibrador. Por sua vez, a Figura 4.5 apresenta os desvios dimensionais obtidos antes (em julho de 2019) e depois da adaptação do calibrador.

Quadro 4.4 – Resultados do paralelismo entre elementos geométricos medidos no calibrador ensaiado

| Elementos do calibrador                       | Desvio de paralelismo / mm | Incerteza expandida (95 %) / mm |
|---|----------------------------|---------------------------------|
| Plano móvel // plano fixo                     | 0,065                      | 0,017                           |
| Eixo do comparador // eixo do extensómetro    | 1,802                      | 0,056                           |
| Plano do comparador // plano externo móvel    | 0,216                      | 0,023                           |
| Plano do comparador // plano móvel            | 0,161                      | 0,015                           |
| Eixo da guia esquerda // eixo da guia direita | 0,055                      | 0,011                           |

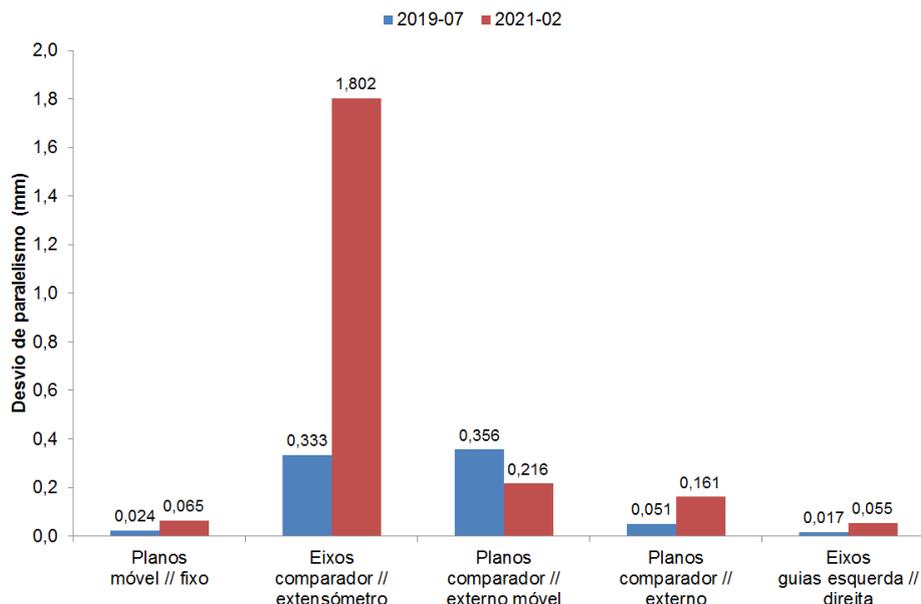


Figura 4.6 – Paralelismo entre elementos do calibrador antes e depois da adaptação

Tendo em conta a magnitude das incertezas de medição referidas no Quadro 4.4, os resultados que constam na Figura 4.6 mostram que a principal alteração do paralelismo entre elementos do calibrador ocorre entre os eixos do comparador e do extensómetro de corda vibrante, observando-se um aumento de 0,333 mm para 1,802 mm entre ensaios realizados antes e após a adaptação. Esta diferença pode ser justificada pelos componentes de fixação mecânica que são diferentes para os extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson e para os extensómetros de corda vibrante. No primeiro caso, os componentes de fixação promovem um contacto envolvente com as extremidades do extensómetro do tipo Carlson, ao assumirem a forma de um molde (negativo), que favorece o alinhamento entre o calibrador e o extensómetro nele instalado. No segundo caso, a fixação do extensómetro de corda vibrante é efetuada de forma pontual através de três ligações roscadas entre o calibrador e cada uma das extremidades do extensómetro. O desequilíbrio dimensional e mecânico entre os apertos das ligações roscadas estabelecidas constitui um fator de desalinhamento entre o calibrador e o extensómetro nele instalado.

### 4.2.3 Deformações localizadas

#### 4.2.3.1 Plano do comparador

Nas Figuras 4.7 a 4.15 são apresentados os deslocamentos nas direções X, Y e Z dos pontos medidos no plano de comparador entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

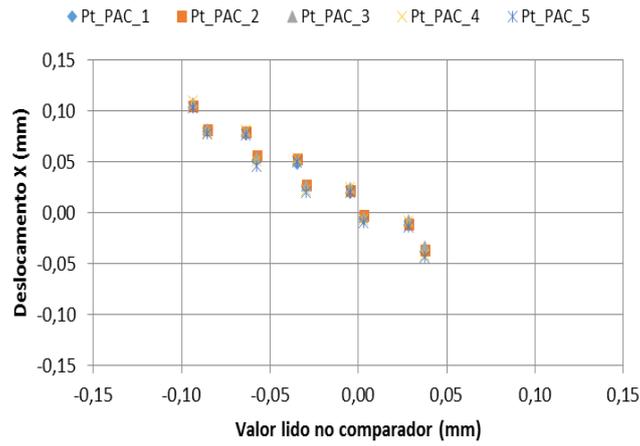


Figura 4.7 – Direção X – deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio

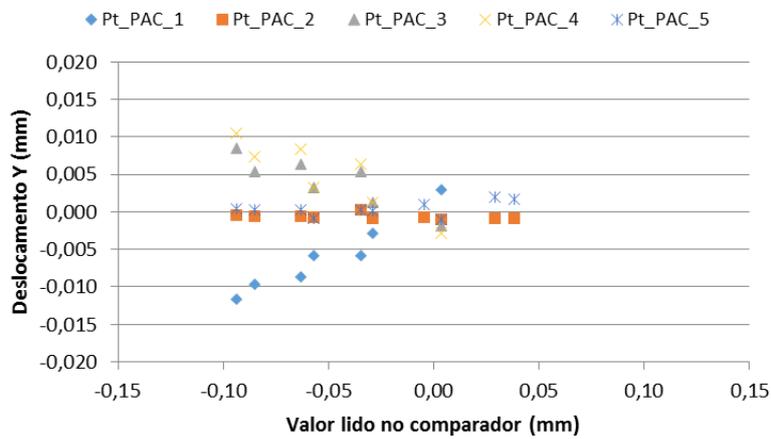


Figura 4.8 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio

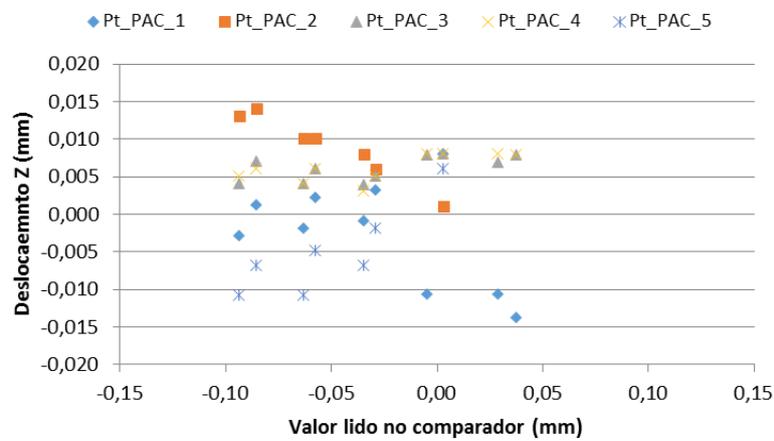


Figura 4.9 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 1º ensaio

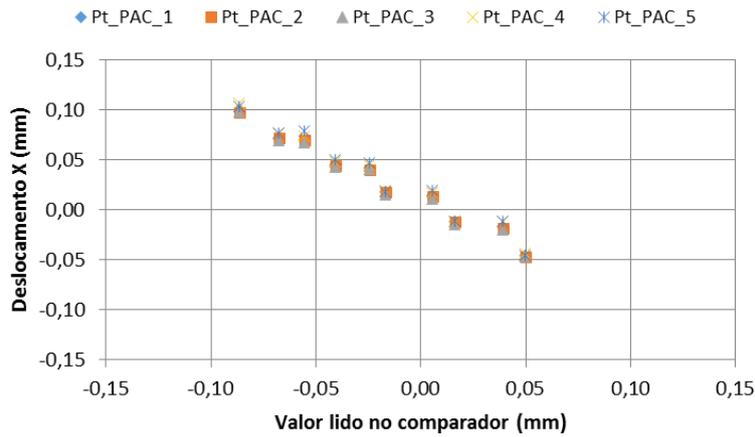


Figura 4.10 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio

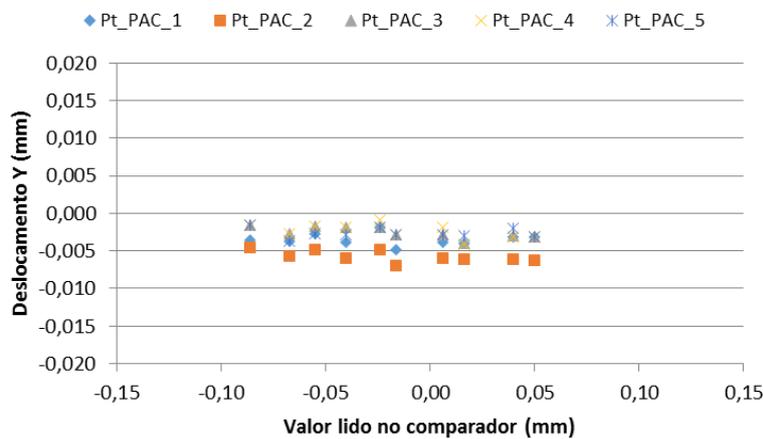


Figura 4.11 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio

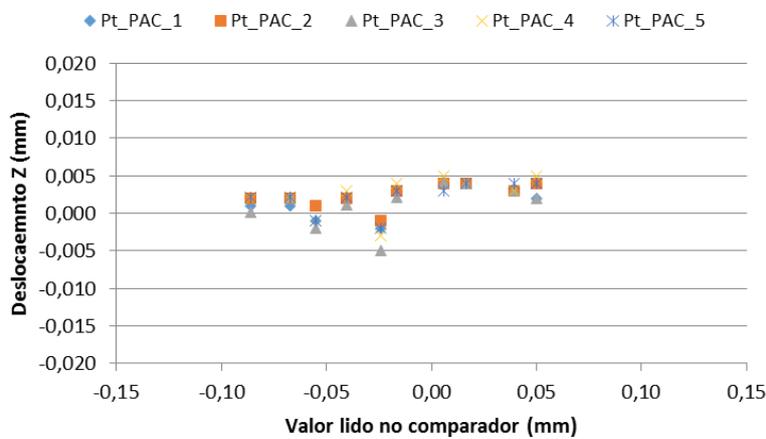


Figura 4.12 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 2º ensaio

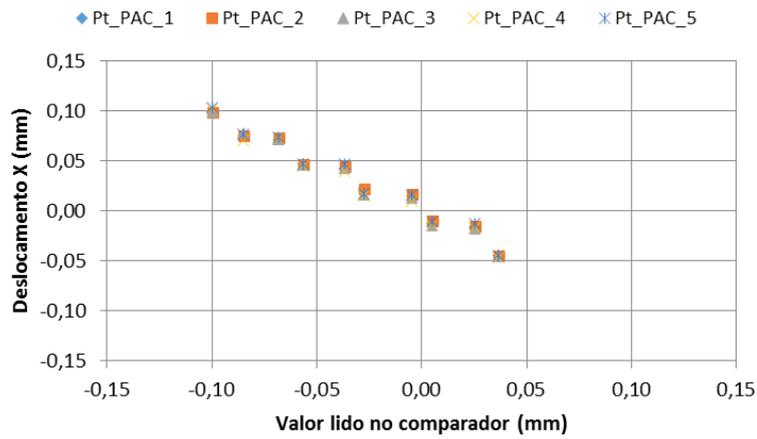


Figura 4.13 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio

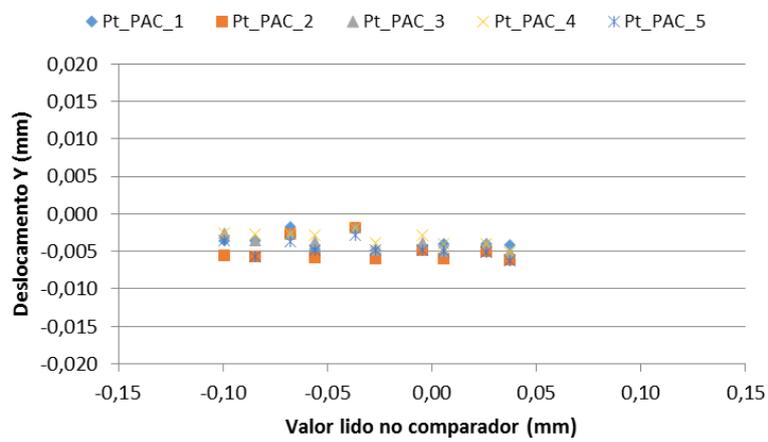


Figura 4.14 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio

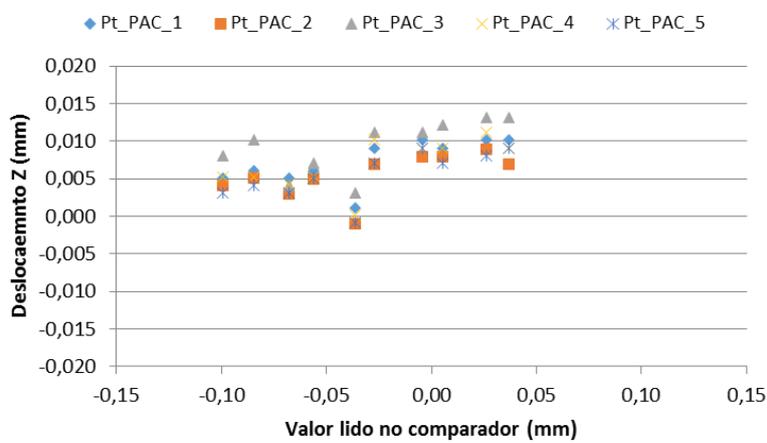


Figura 4.15 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano do comparador – 3º ensaio

Os deslocamentos medidos na direção  $X$  (*vide* Figuras 4.7, 4.10 e 4.13) mostram uma relação aproximadamente linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido, conforme era expectável tendo em conta a funcionalidade pretendida do calibrador (aplicação de deslocamento unidimensional segundo o eixo do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção  $Y$  (*vide* Figuras 4.8, 4.11 e 4.14), o seu valor máximo absoluto corresponde, aproximadamente, a 0,005 mm, com a exceção do primeiro ensaio, onde se observou um deslocamento próximo de 0,010 mm em alguns pontos na região negativa do intervalo de medição (compressão do extensómetro). Tratando-se do primeiro ensaio realizado e não se observando esta magnitude de deslocamento nos dois ensaios seguintes, este comportamento pode ser justificado pela ocorrência de deslizamento inicial na região em torno do plano do comparador na aplicação de compressão ao extensómetro.

Os deslocamentos medidos na direção  $Z$  (*vide* Figuras 4.9, 4.12 e 4.15) apresentam uma magnitude máxima absoluta de, aproximadamente, 0,015 mm, no primeiro ensaio realizado em todo o intervalo de medição do comparador. Nos restantes ensaios este valor é mais reduzido, contudo, ligeiramente superior ao observado na direção  $Y$ .

#### 4.2.3.2 Plano móvel B

Nas Figuras 4.16 a 4.24 são apresentados os deslocamentos nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  dos pontos medidos no plano móvel B entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção  $X$  (*vide* Figuras 4.16, 4.19 e 4.22) mostram uma relação aproximadamente linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido, conforme era expectável tendo em conta a funcionalidade pretendida do calibrador (aplicação de deslocamento unidimensional segundo o eixo do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção  $Y$  (*vide* Figuras 4.17, 4.20 e 4.23), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção  $Z$  (*vide* Figuras 4.18, 4.21 e 4.24), a magnitude dos deslocamentos medidos é ligeiramente superior à observada na direção  $Y$ , atingindo um valor de aproximadamente 0,010 mm, em particular, na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

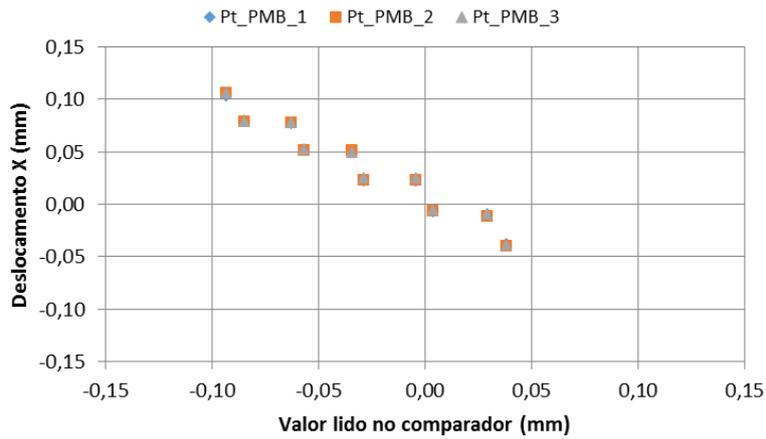


Figura 4.16 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio

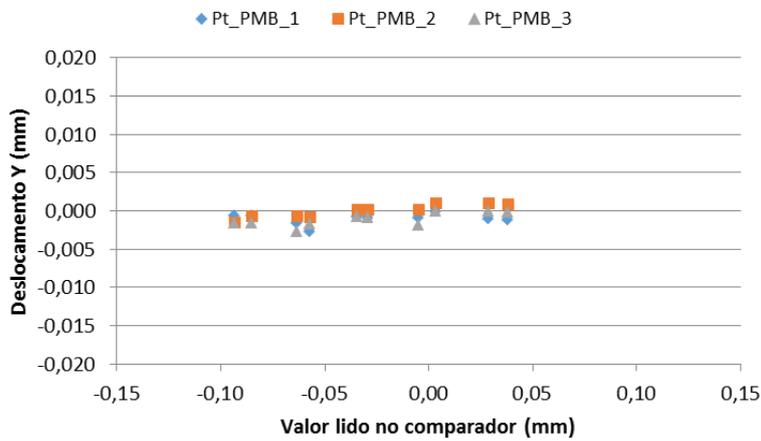


Figura 4.17 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio

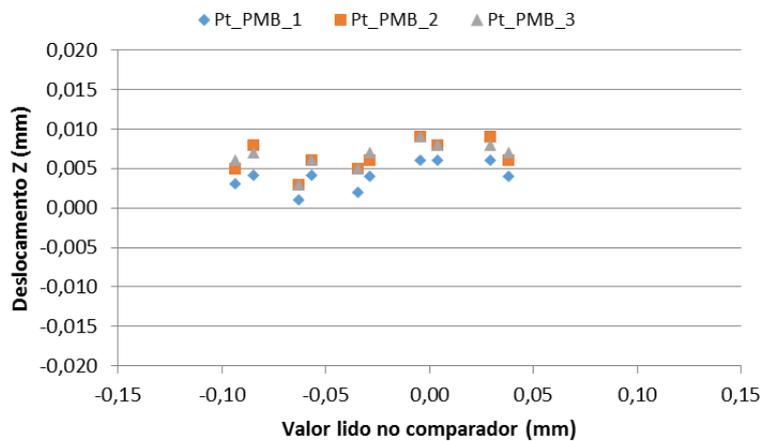


Figura 4.18 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 1º ensaio

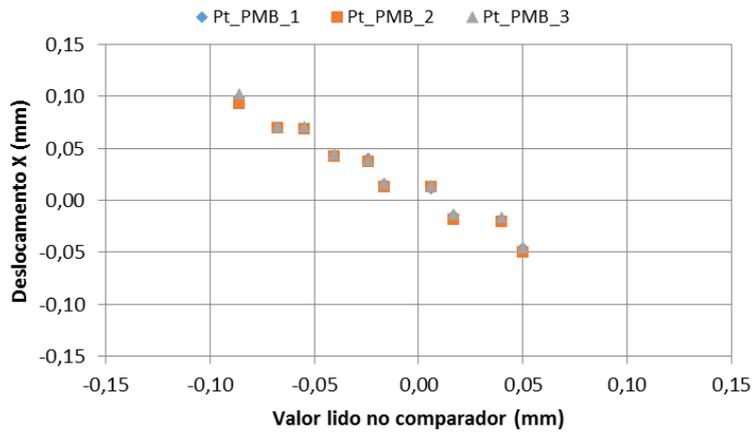


Figura 4.19 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio

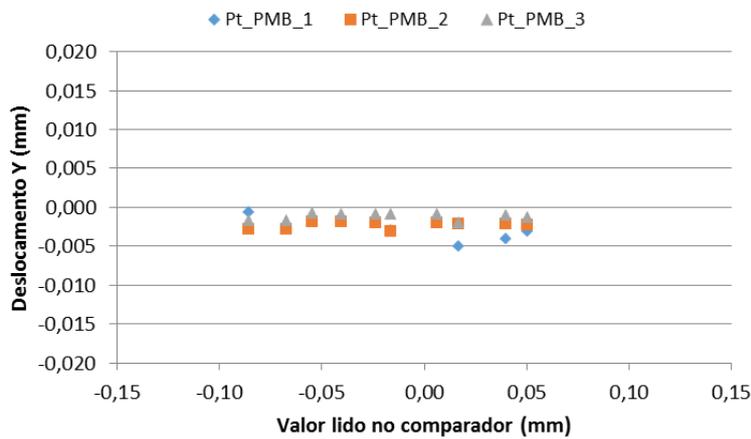


Figura 4.20 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio

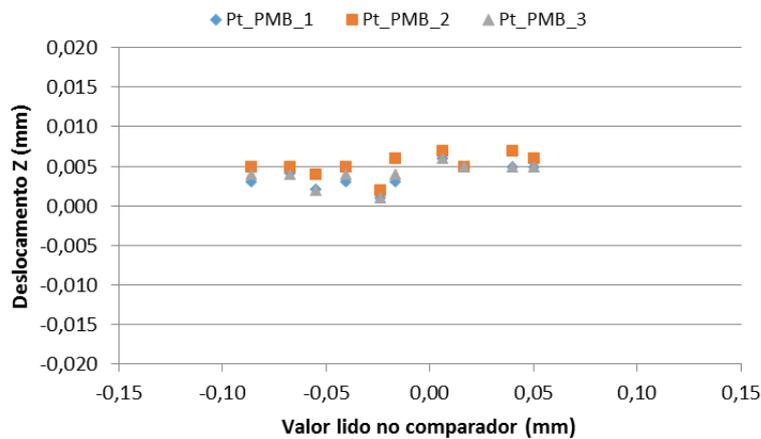


Figura 4.21 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 2º ensaio

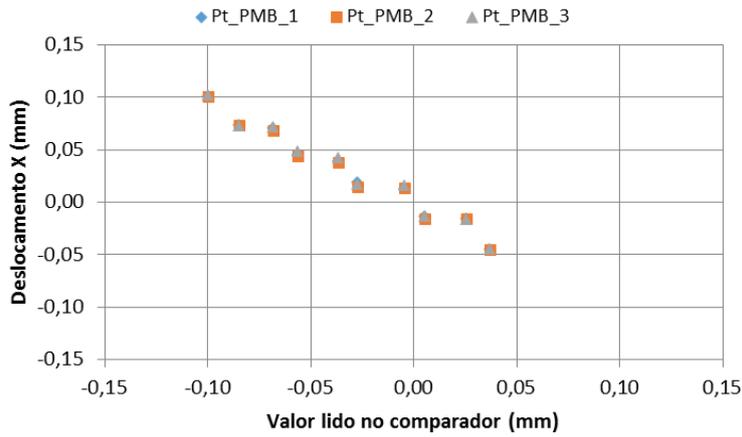


Figura 4.22 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio

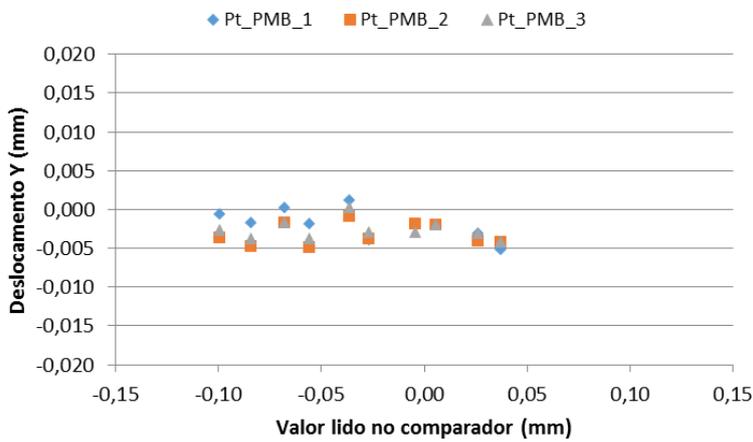


Figura 4.23 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio

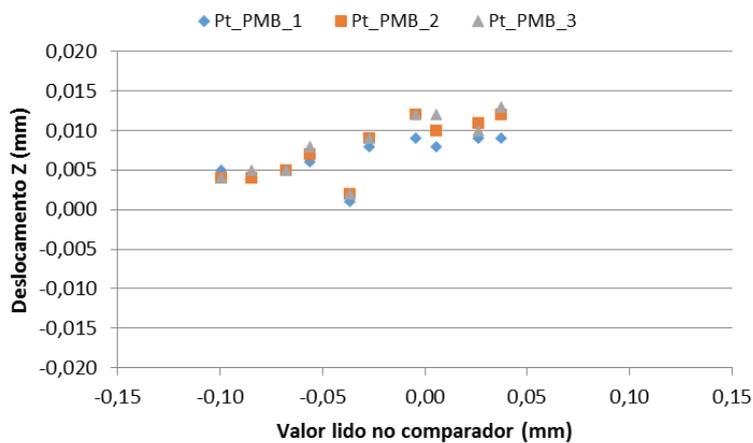


Figura 4.24 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel B – 3º ensaio

#### 4.2.3.3 *Plano móvel A*

Nas Figuras 4.25 a 4.33 são apresentados os deslocamentos nas direções *X*, *Y* e *Z* dos pontos medidos no plano móvel *A* entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção *X* (*vide* Figuras 4.25, 4.28 e 4.31) mostram uma relação aproximadamente linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido, conforme era expectável tendo em conta a funcionalidade pretendida do calibrador (aplicação de deslocamento unidimensional segundo o eixo do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção *Y* (*vide* Figuras 4.26, 4.29 e 4.32), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção *Z* (*vide* Figuras 4.27, 4.30 e 4.33), a magnitude dos deslocamentos medidos é ligeiramente superior à observada na direção *Y*, atingindo um valor de aproximadamente 0,008 mm, em particular, na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

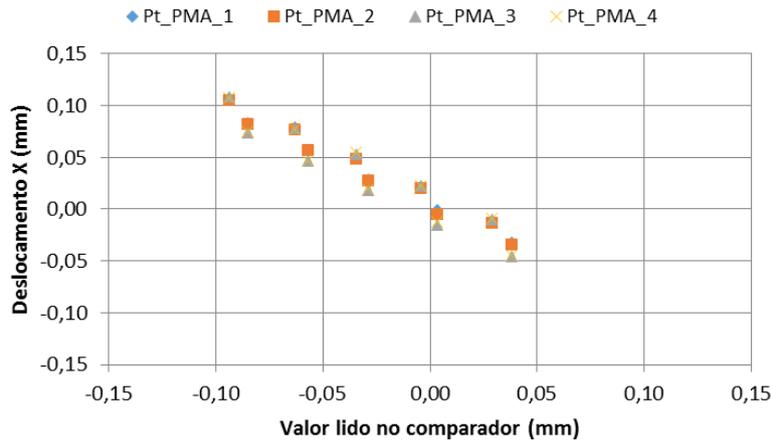


Figura 4.25 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio

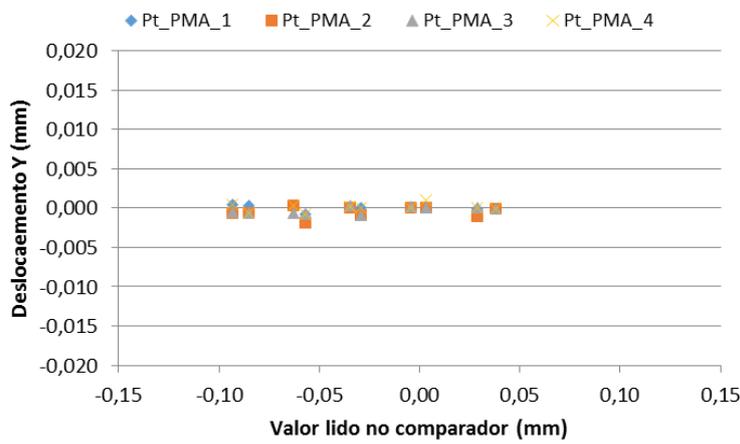


Figura 4.26 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio

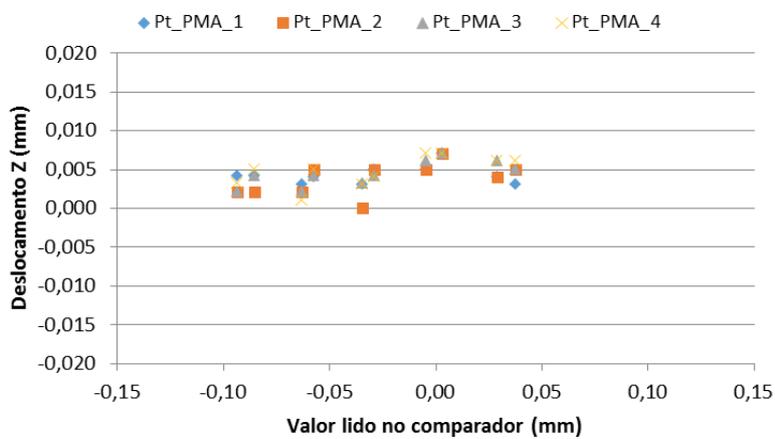


Figura 4.27 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 1º ensaio

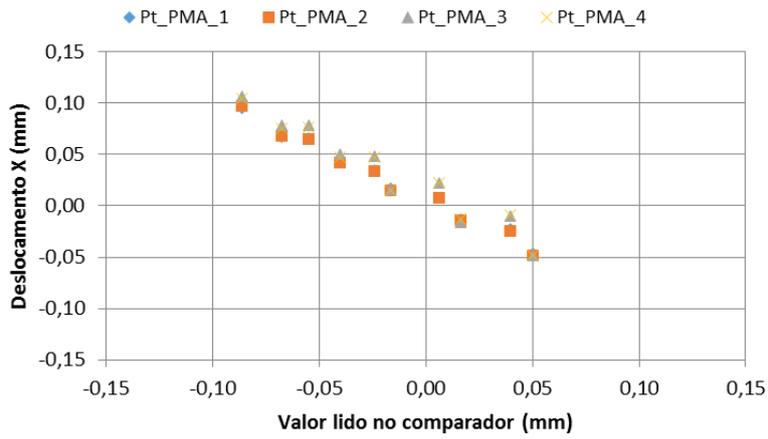


Figura 4.28 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio

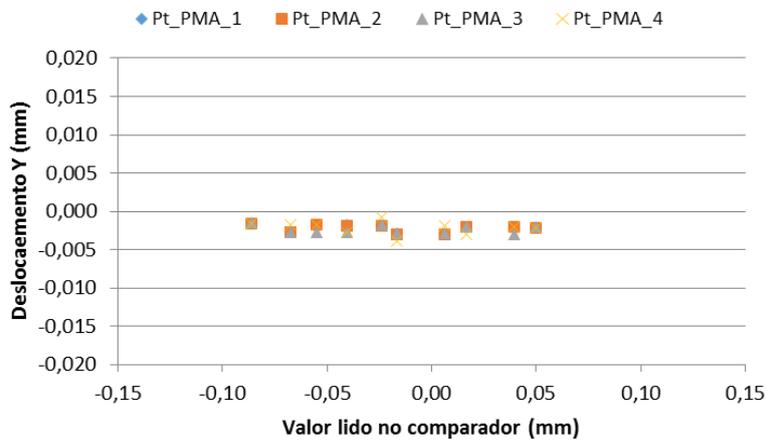


Figura 4.29 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio

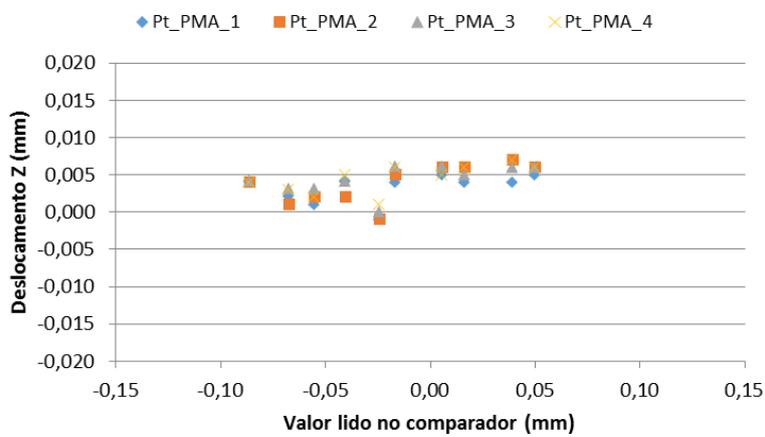


Figura 4.30 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 2º ensaio

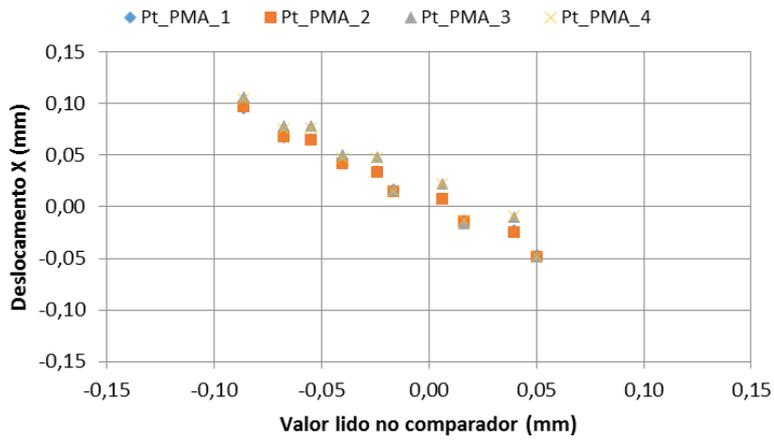


Figura 4.31 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio

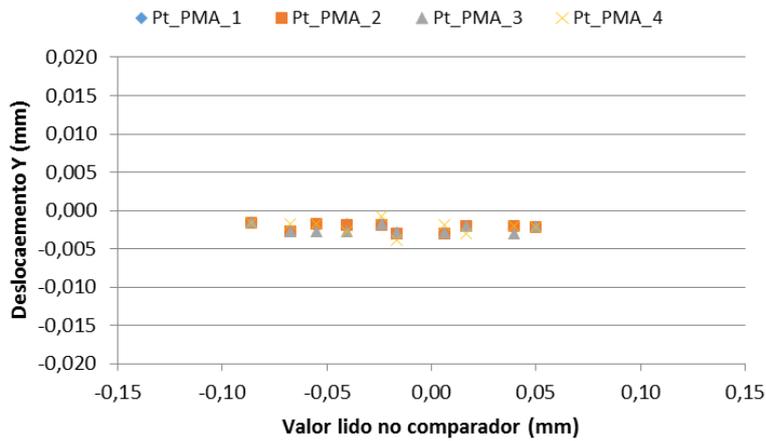


Figura 4.32 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio

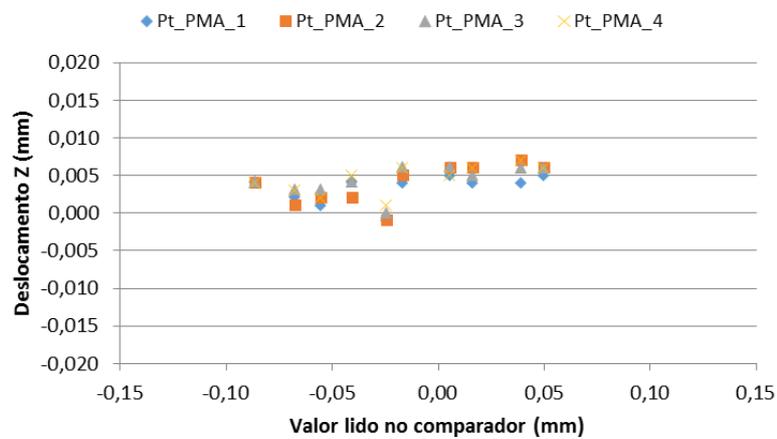


Figura 4.33 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano móvel A – 3º ensaio

#### 4.2.3.4 Pontos de fixação na região móvel

Nas Figuras 4.34 a 4.42 são apresentados os deslocamentos nas direções X, Y e Z dos pontos de fixação na região móvel, entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção X (*vide* Figuras 4.34, 4.37 e 4.40) mostram uma relação aproximadamente linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido, conforme era expectável tendo em conta a funcionalidade pretendida do calibrador (aplicação de deslocamento unidimensional segundo o eixo do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção Y (*vide* Figuras 4.35, 4.38 e 4.41), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção Z (*vide* Figuras 4.36, 4.39 e 4.42), a magnitude dos deslocamentos medidos é superior à observada na direção Y, atingindo um valor de aproximadamente 0,010 mm no terceiro ensaio, em particular, na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

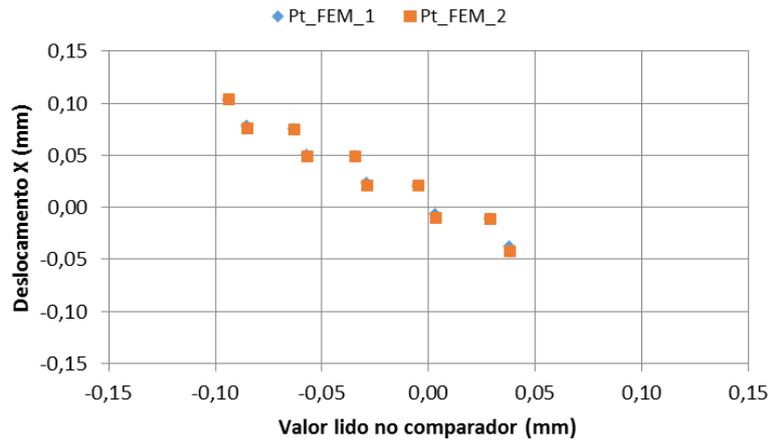


Figura 4.34 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio

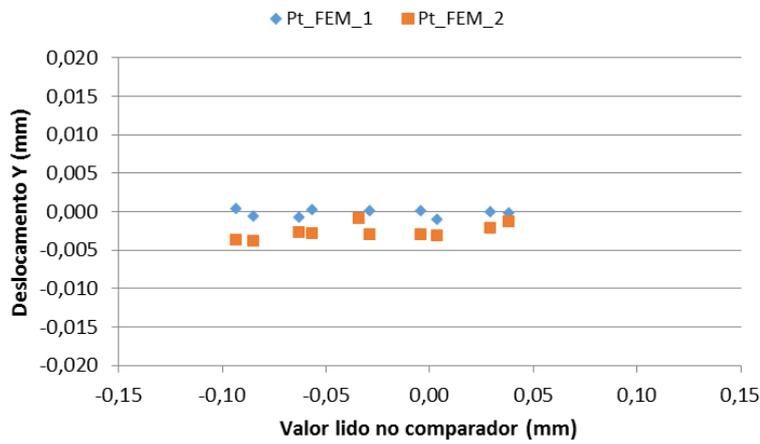


Figura 4.35 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio

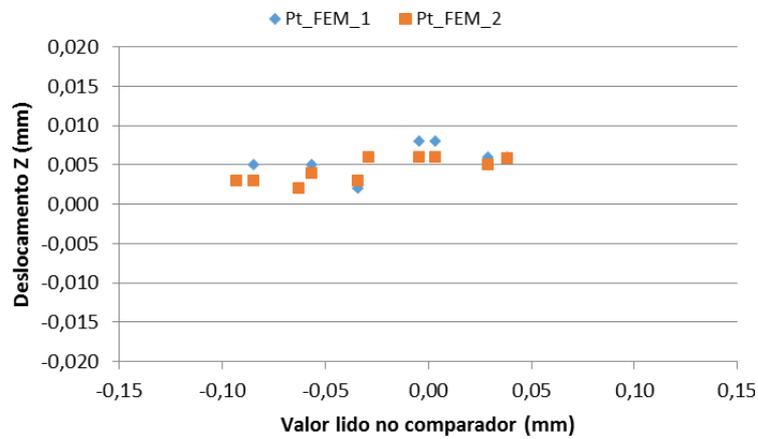


Figura 4.36 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 1º ensaio

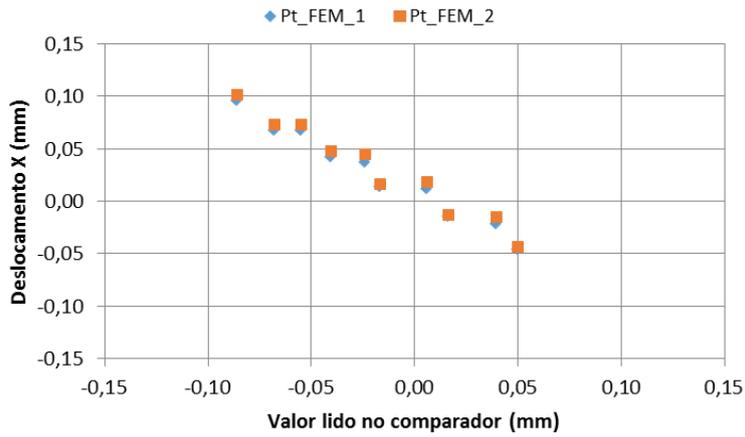


Figura 4.37 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio

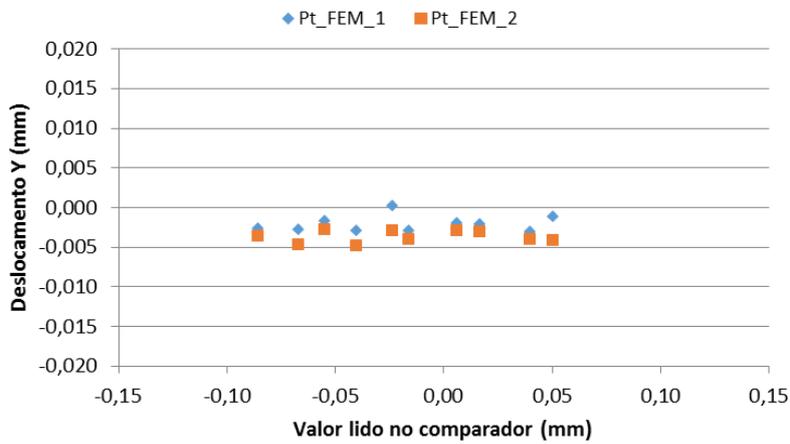


Figura 4.38 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio

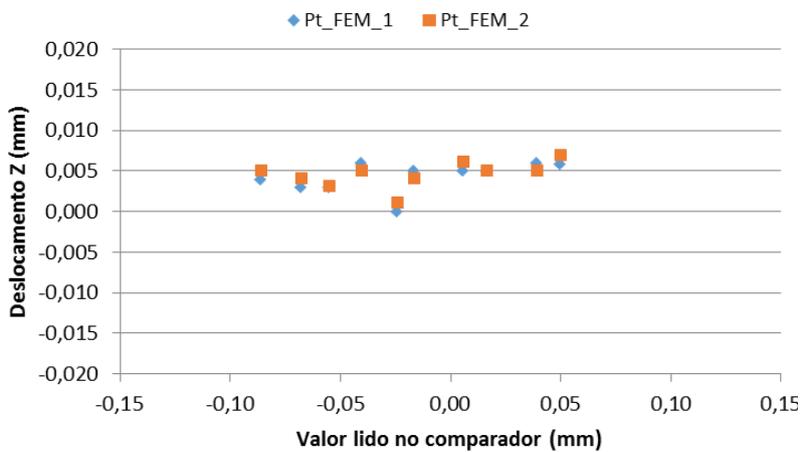


Figura 4.39 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 2º ensaio

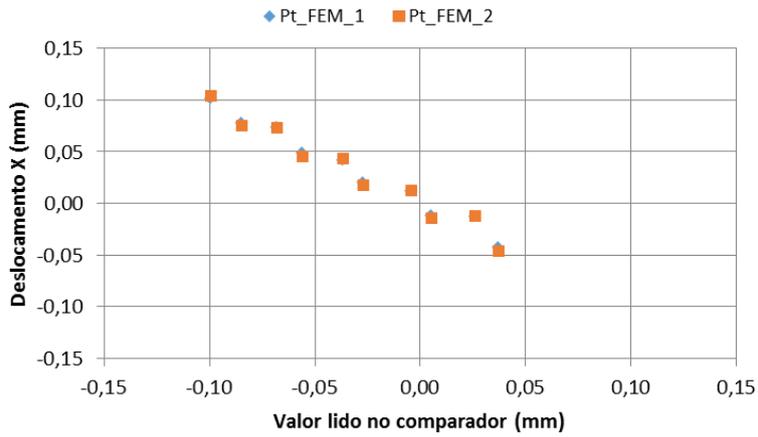


Figura 4.40 – Direção X –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio

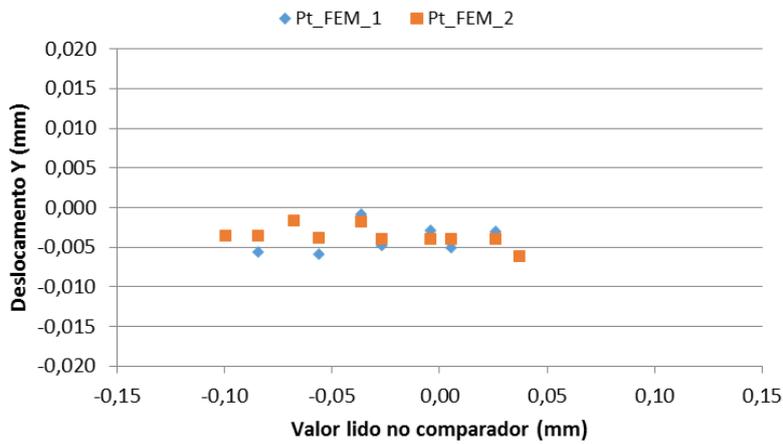


Figura 4.41 – Direção Y –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio

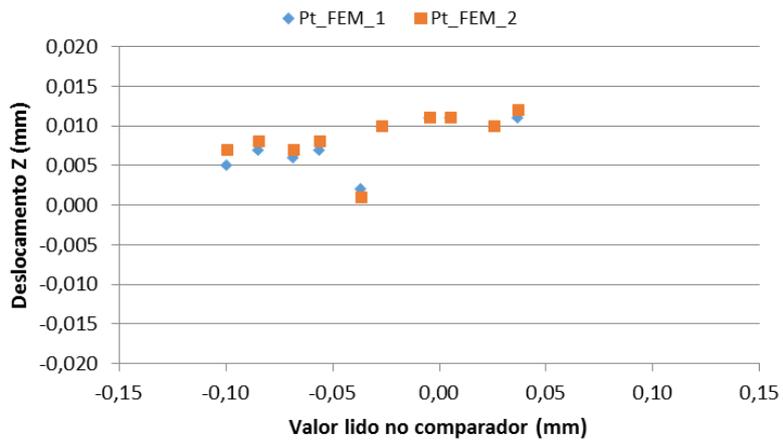


Figura 4.42 – Direção Z –Deslocamento dos pontos de fixação na região móvel – 3º ensaio

#### 4.2.3.5 Plano externo na região móvel

Nas Figuras 4.43 a 4.51 são apresentados os deslocamentos nas direções X, Y e Z dos pontos do plano externo na região móvel, entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção X (*vide* Figuras 4.43, 4.46 e 4.49) mostram uma relação aproximadamente linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido, conforme era expectável tendo em conta a funcionalidade pretendida do calibrador (aplicação de deslocamento unidimensional segundo o eixo do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção Y (*vide* Figuras 4.44, 4.47 e 4.50), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção Z (*vide* Figuras 4.45, 4.48 e 4.51), a magnitude dos deslocamentos medidos é superior à observada na direção Y, atingindo um valor de aproximadamente 0,010 mm no terceiro ensaio, em particular, na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

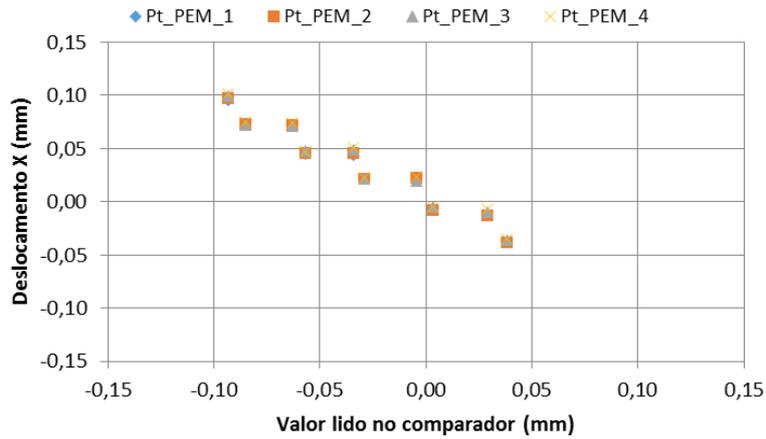


Figura 4.43 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio

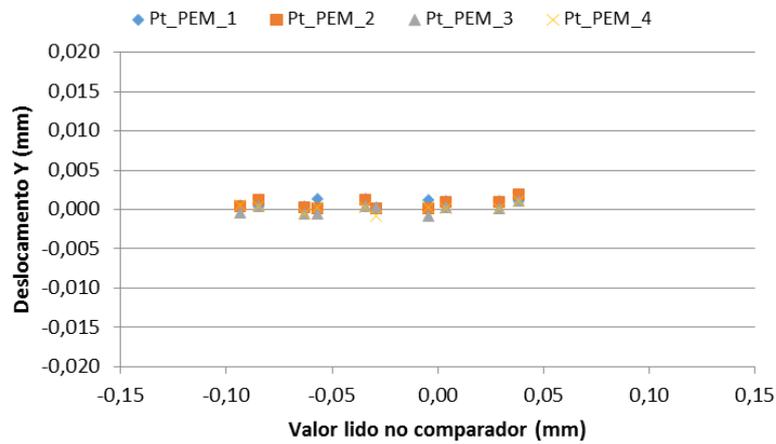


Figura 4.44 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio

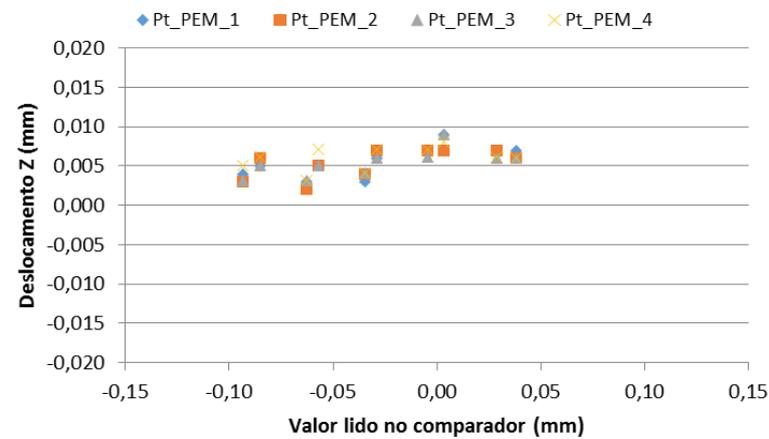


Figura 4.45 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 1º ensaio

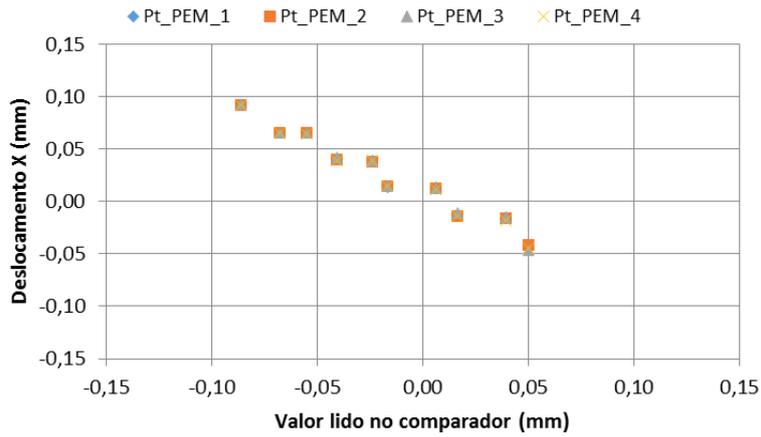


Figura 4.46 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio

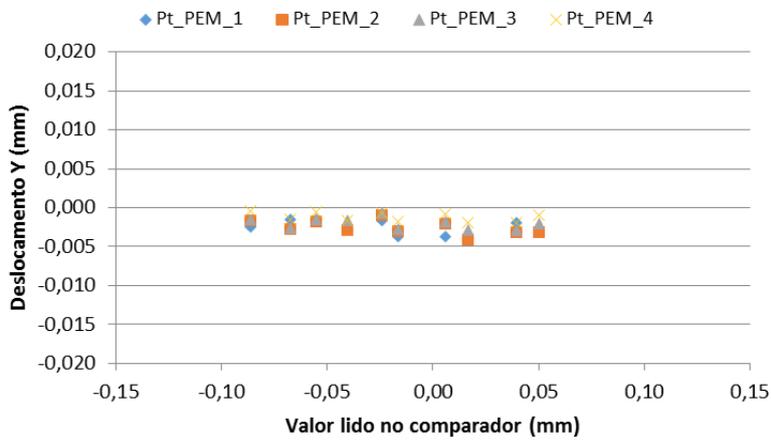


Figura 4.47 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio

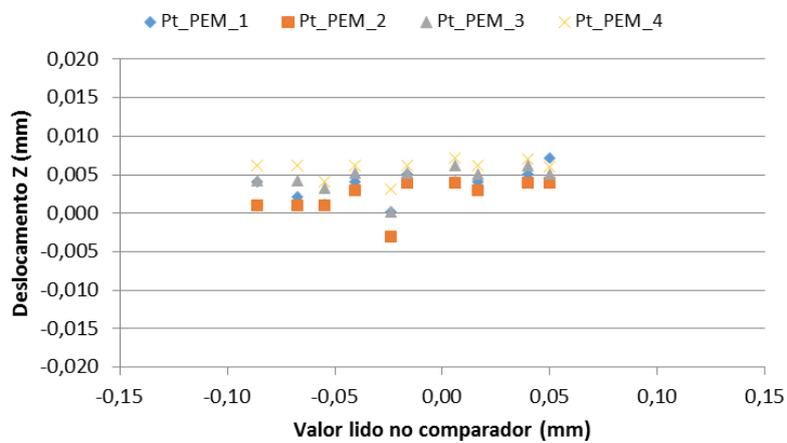


Figura 4.48 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 2º ensaio

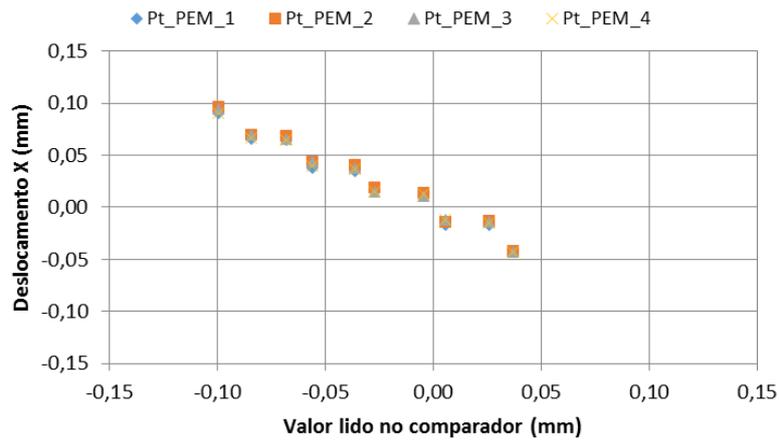


Figura 4.49 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio

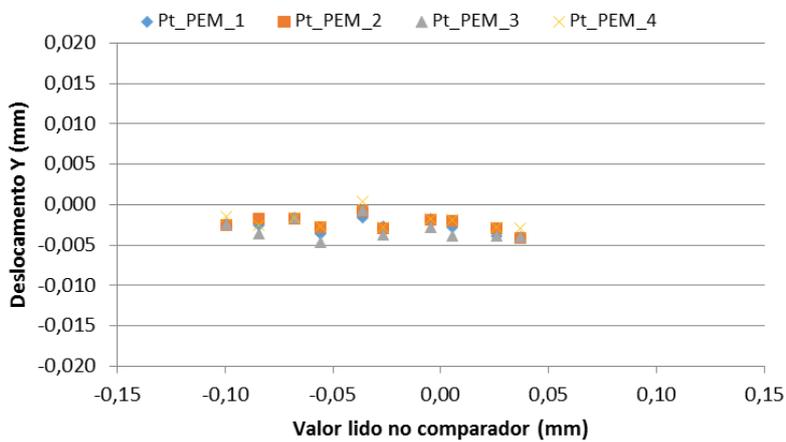


Figura 4.50 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio

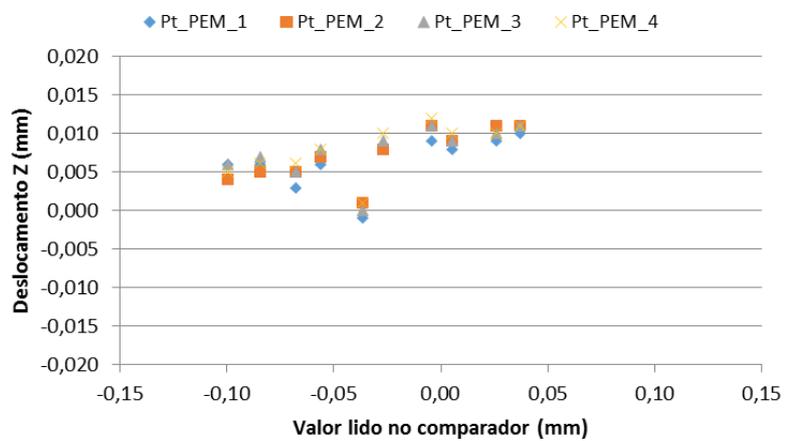


Figura 4.51 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região móvel – 3º ensaio

#### 4.2.3.6 Plano externo na região fixa

Nas Figuras 4.52 a 4.60 são apresentados os deslocamentos nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  dos pontos do plano externo na região fixa, entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção  $X$  (*vide* Figuras 4.52, 4.55 e 4.58) apresentam uma magnitude variável consoante o intervalo de medição do comparador, quando seria expectável um valor constante próximo de zero, visto tratar-se de uma região fixa que se pretende imóvel. Na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro) o deslocamento na direção  $X$  atinge, em regra, o valor de  $-0,005$  mm, enquanto que na região negativa (compressão do extensómetro) este valor evolui de forma aproximadamente linear para  $0,015$  mm.

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção  $Y$  (*vide* Figuras 4.53, 4.56 e 4.59), a sua magnitude é muito próxima de zero em todo o intervalo de medição, com a exceção do terceiro ensaio, onde atinge um valor absoluto de  $0,005$  mm. De qualquer forma, é possível afirmar que esta região do calibrador apresenta um comportamento estático na direção  $Y$  na totalidade do intervalo de medição.

Na direção  $Z$  (*vide* Figuras 4.54, 4.57 e 4.60), a magnitude absoluta dos deslocamentos medidos varia entre  $0,005$  mm e  $0,010$  mm, sendo ligeiramente mais acentuada na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

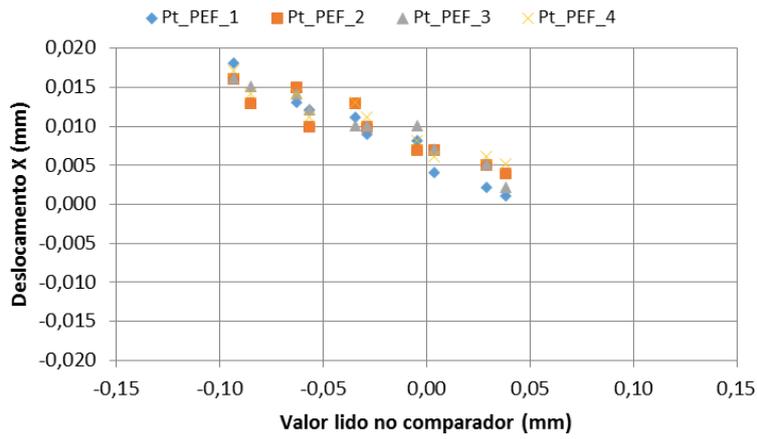


Figura 4.52 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio

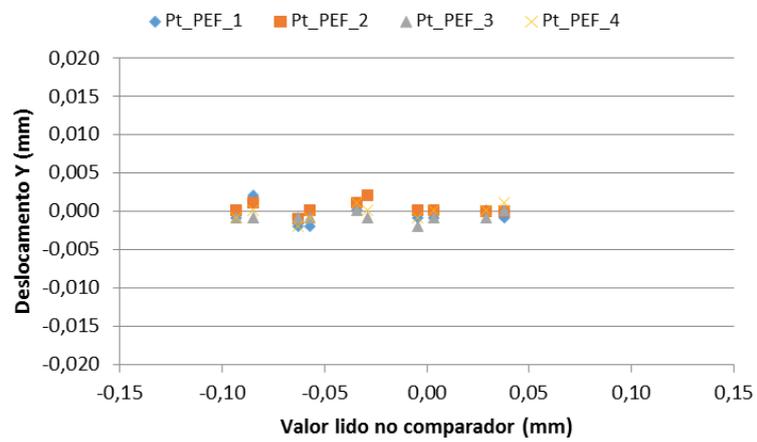


Figura 4.53 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio

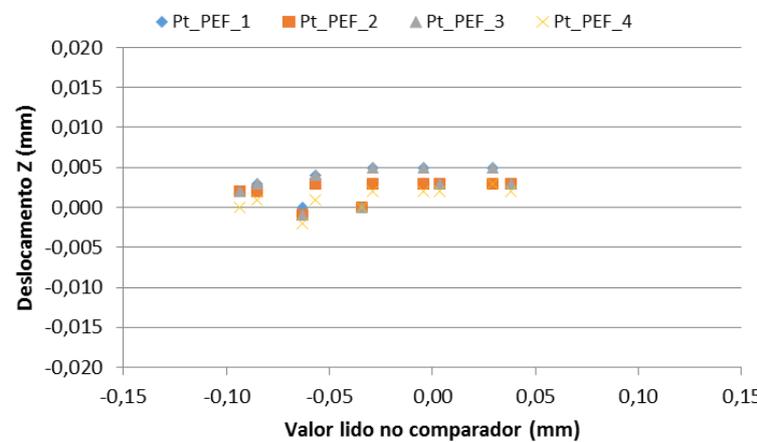


Figura 4.54 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 1º ensaio

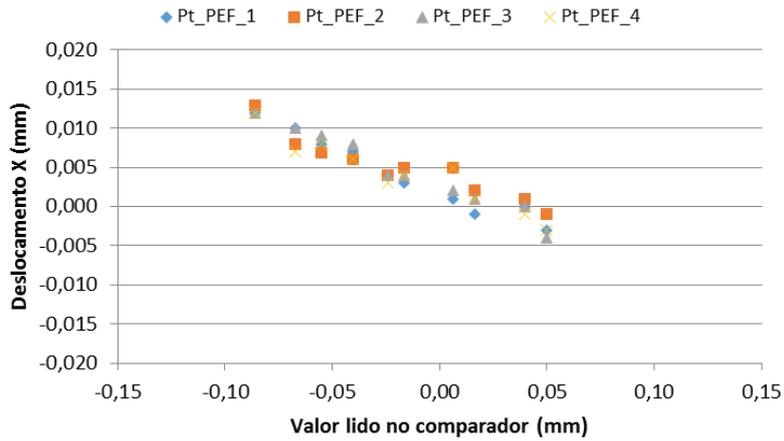


Figura 4.55 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio

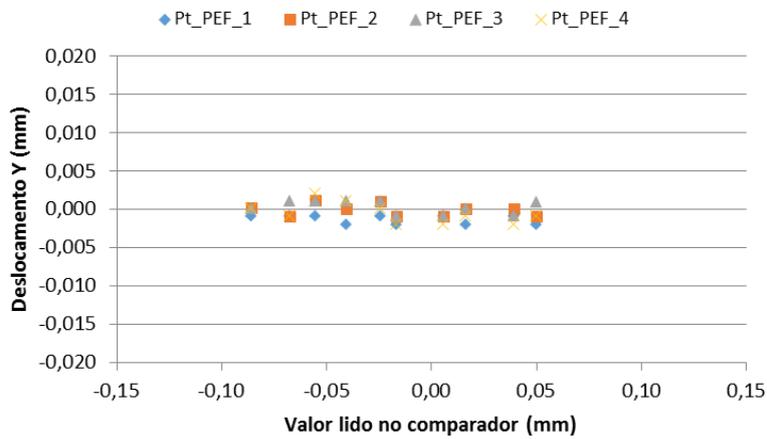


Figura 4.56 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio

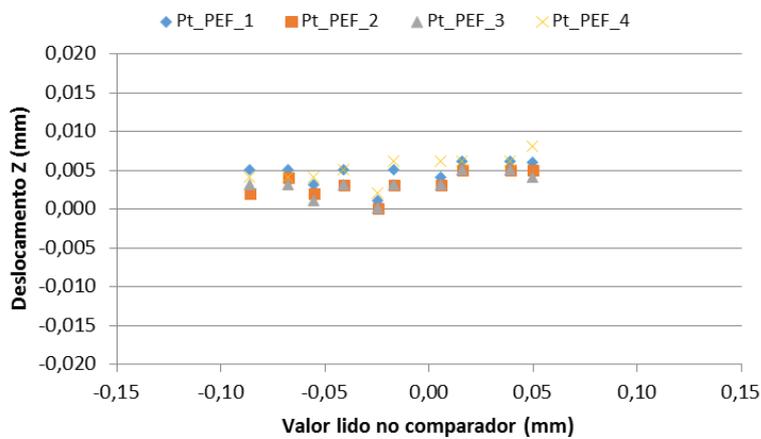


Figura 4.57 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 2º ensaio

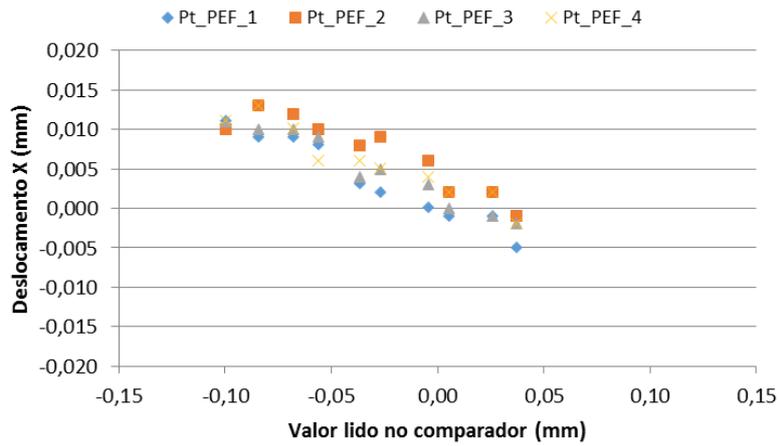


Figura 4.58 – Direção X – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio

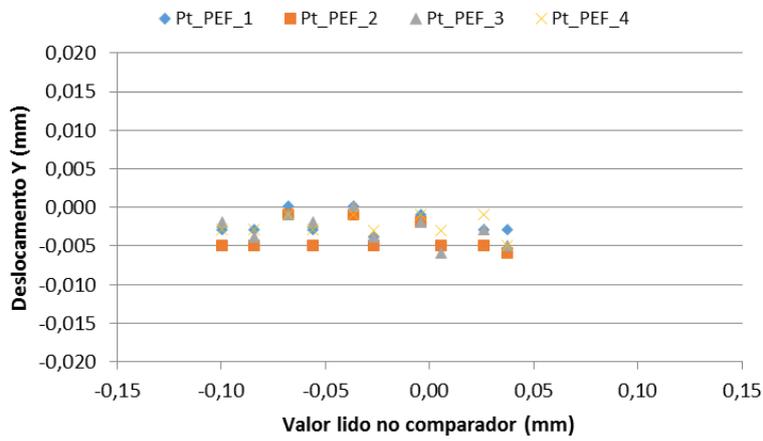


Figura 4.59 – Direção Y – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio

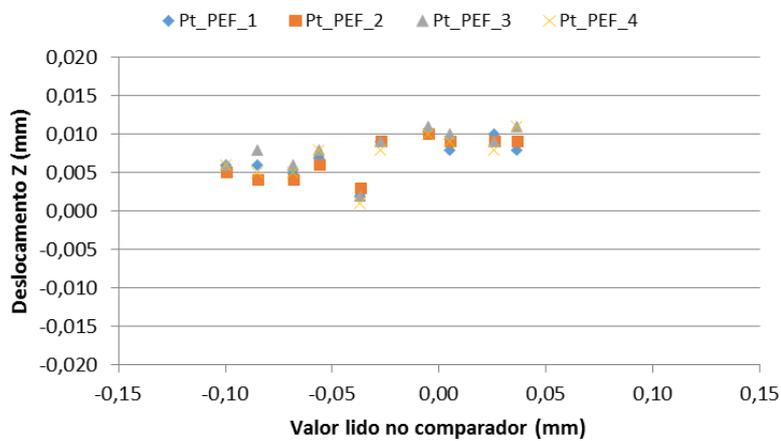


Figura 4.60 – Direção Z – Deslocamento dos pontos do plano externo na região fixa – 3º ensaio

#### 4.2.3.7 Pontos de fixação na região fixa

Nas Figuras 4.61 a 4.69 são apresentados os deslocamentos nas direções *X*, *Y* e *Z* dos pontos de fixação na região fixa, entre patamares de ensaio, respetivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Comparativamente com os deslocamentos medidos na direção *X* no plano externo na região fixa (*vide* resultados apresentados na secção 4.2.3.6), as Figuras 4.61, 4.64 e 4.67 mostram uma magnitude de deslocamento aproximadamente constante no intervalo de medição do comparador, independente do tipo de esforço aplicado no extensómetro (compressão ou tração). A variação máxima de deslocamento foi registada no primeiro ensaio, variando entre -0,010 mm e 0,015 mm, sendo de salientar um deslocamento diferenciado dos dois pontos de fixação no alívio da compressão do extensómetro e posterior tração. Este comportamento não foi observado nos dois ensaios seguintes, pelo que poderá ser justificado pela ocorrência de deslizamento nesta região do calibrador.

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção *Y* (*vide* Figuras 4.62, 4.65 e 4.68), a sua magnitude é muito próxima de zero em todo o intervalo de medição, evidenciando um comportamento estático desta região do calibrador na direção considerada.

Na direção *Z* (*vide* Figuras 4.63, 4.66 e 4.69), a magnitude absoluta dos deslocamentos medidos varia entre 0,005 mm e 0,010 mm, sendo ligeiramente mais acentuada na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

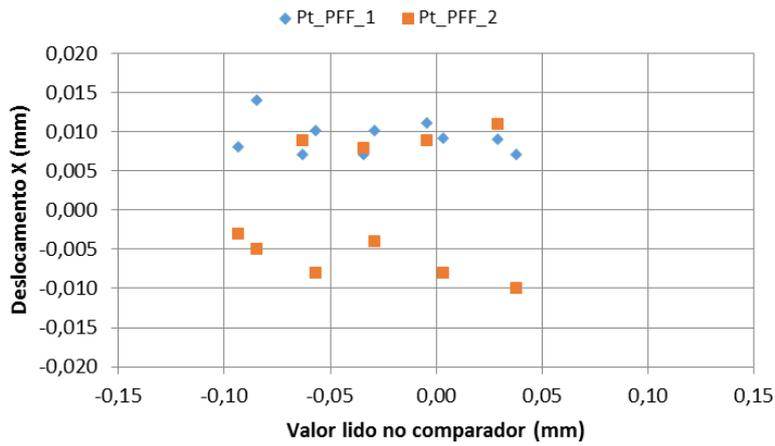


Figura 4.61 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio

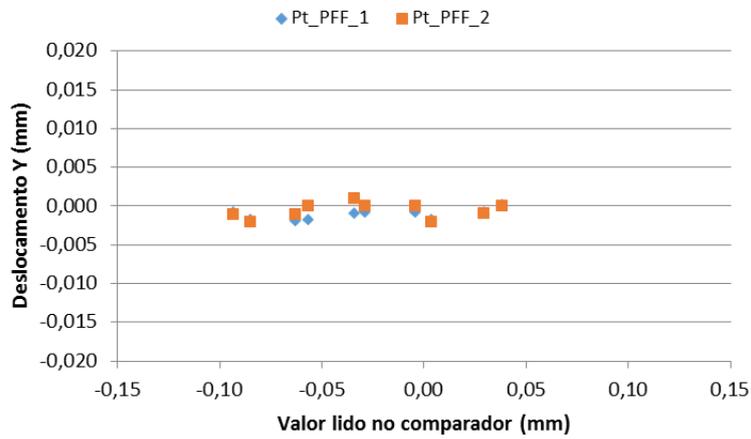


Figura 4.62 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio

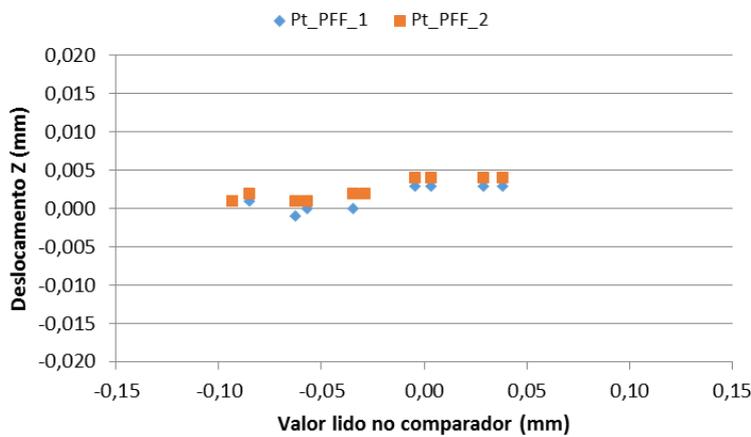


Figura 4.63 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 1º ensaio

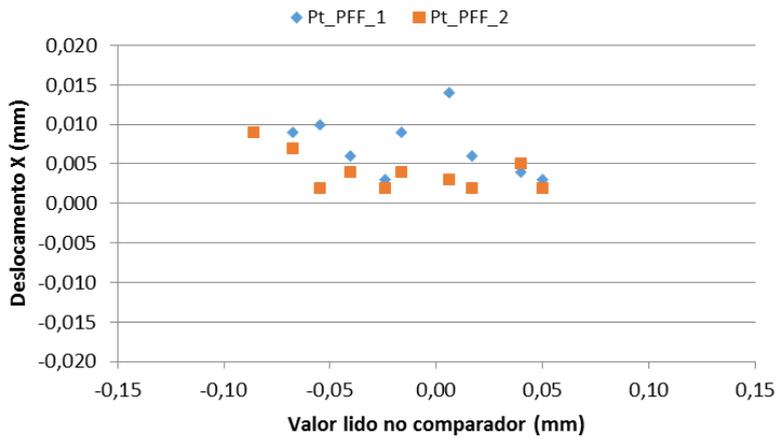


Figura 4.64 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio

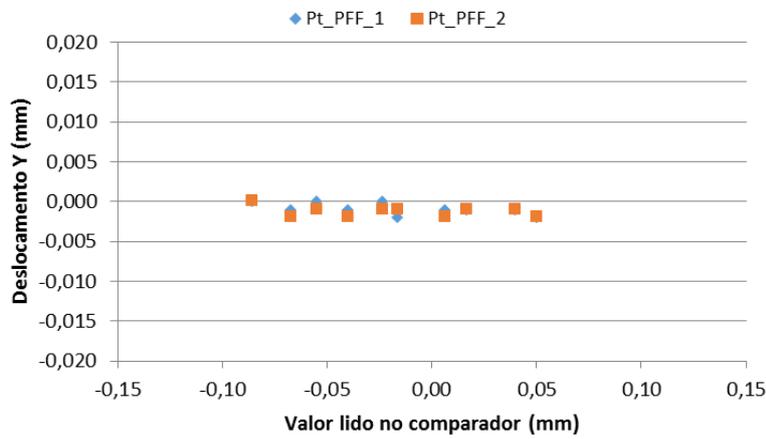


Figura 4.65 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio

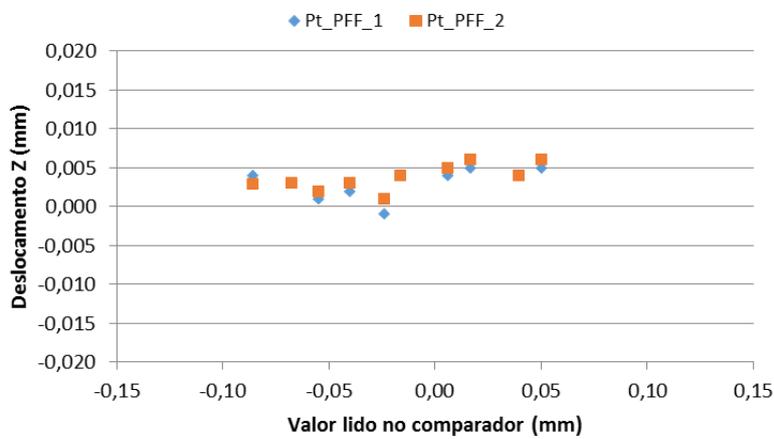


Figura 4.66 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 2º ensaio

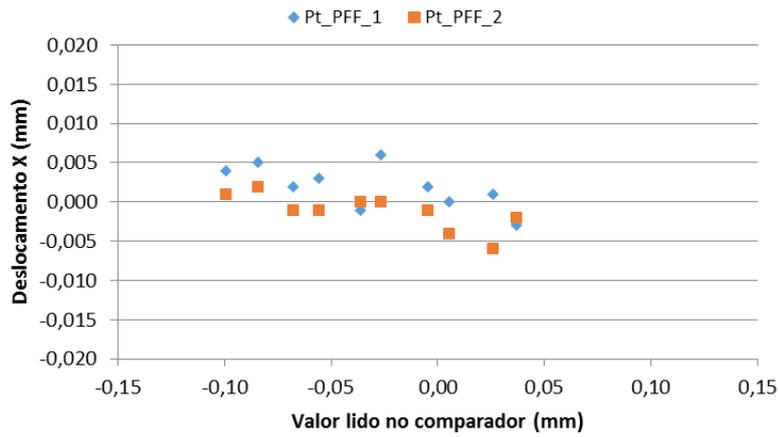


Figura 4.67 – Direção X – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio

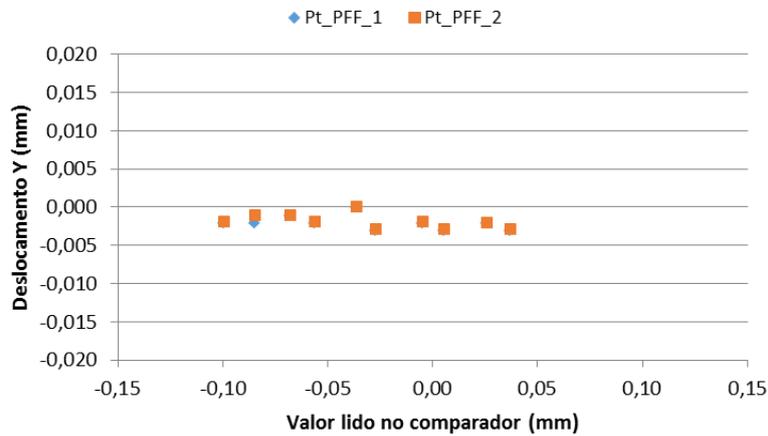


Figura 4.68 – Direção Y – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio

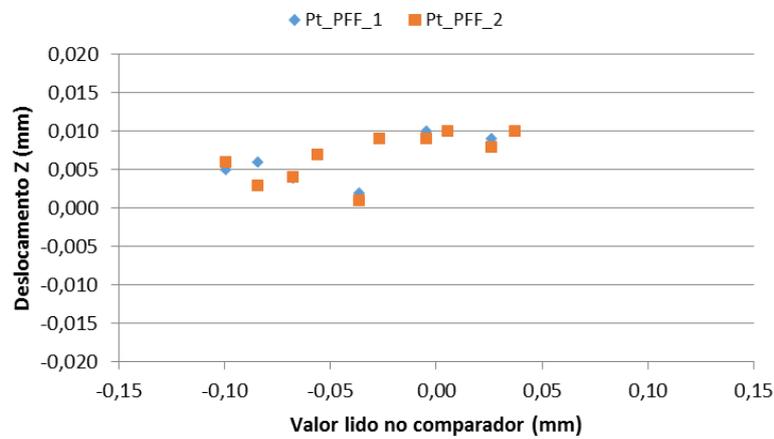


Figura 4.69 – Direção Z – Deslocamento dos pontos de fixação na região fixa – 3º ensaio

#### 4.2.3.8 Plano fixo A

Nas Figuras 4.70 a 4.78 são apresentados os deslocamentos nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  dos pontos medidos no plano fixo A, entre patamares de ensaio, respectivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção  $X$  (*vide* Figuras 4.70, 4.73 e 4.76) apresentam uma magnitude máxima absoluta igual a 0,005 mm, exceto no primeiro ensaio onde atinge um valor próximo de 0,015 mm. O comportamento diferenciado entre o primeiro e os restantes dois ensaios pode ser justificado pela ocorrência de deslizamento nesta região do calibrador. Nos três ensaios realizados não se observam diferenças significativas de deslocamento consoante o tipo de esforço aplicado no extensómetro.

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção  $Y$  (*vide* Figuras 4.71, 4.74 e 4.77), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção  $Z$  (*vide* Figuras 4.72, 4.75 e 4.78), a magnitude absoluta dos deslocamentos medidos varia entre 0,005 mm e 0,010 mm, sendo ligeiramente mais acentuada na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

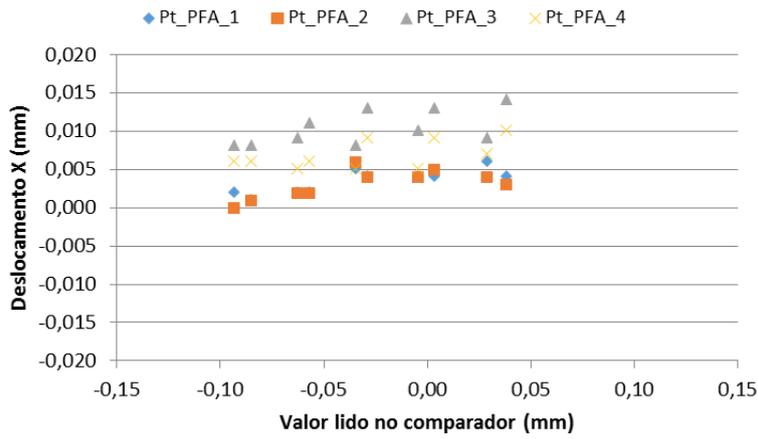


Figura 4.70 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio

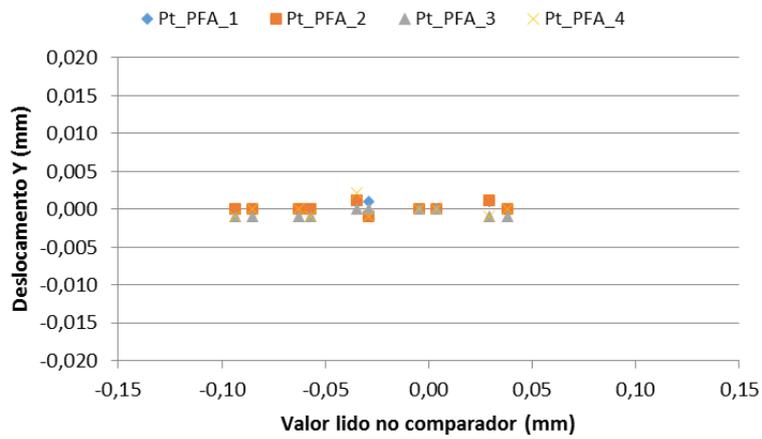


Figura 4.71 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio

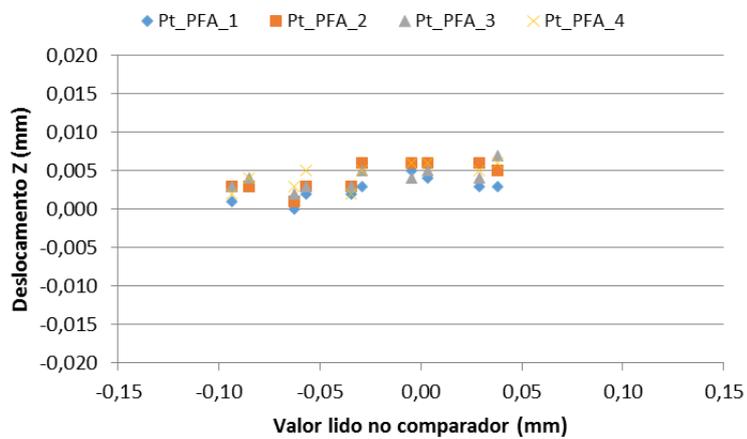


Figura 4.72 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 1º ensaio

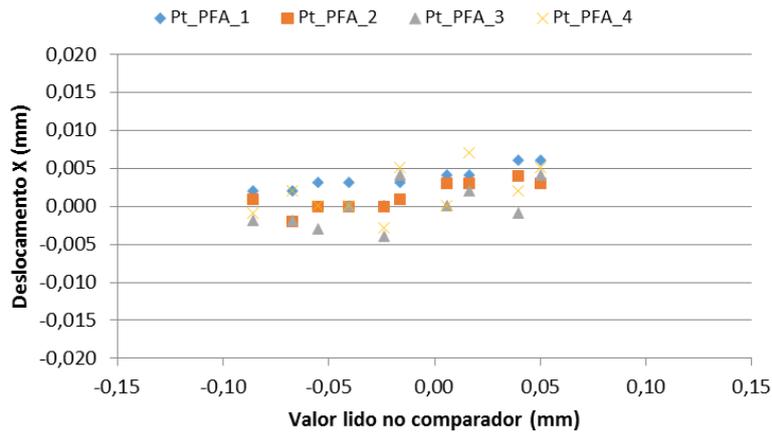


Figura 4.73 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio

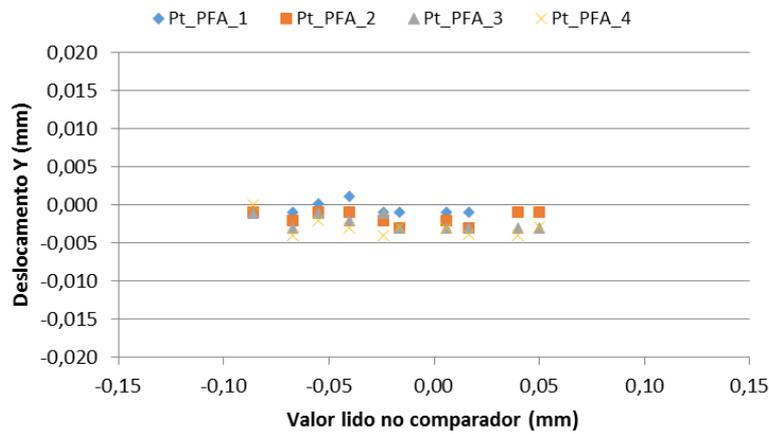


Figura 4.74 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio

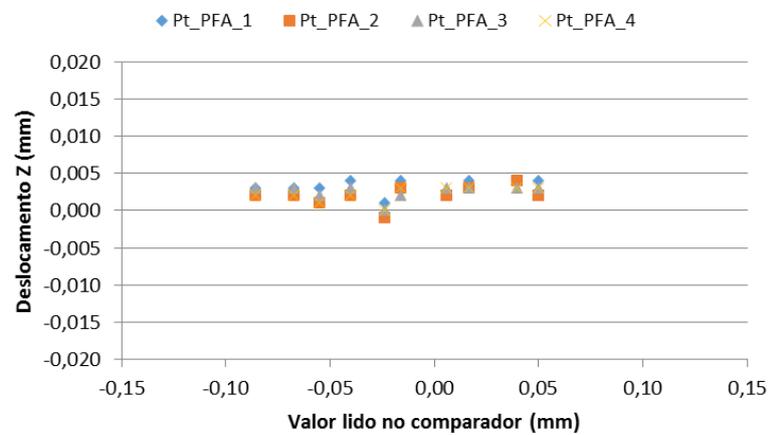


Figura 4.75 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 2º ensaio

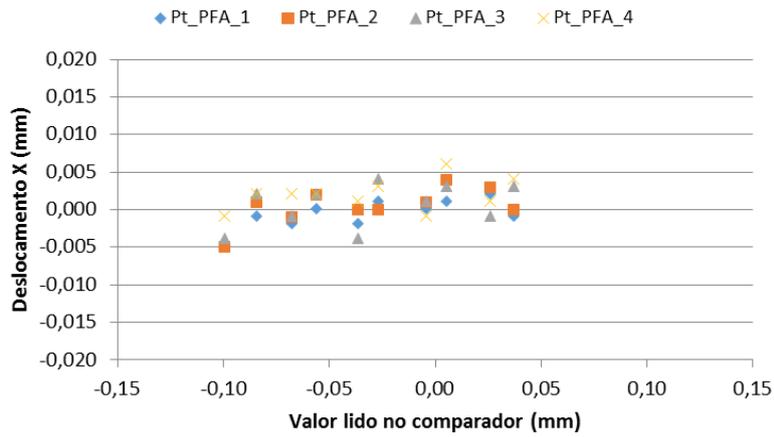


Figura 4.76 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio

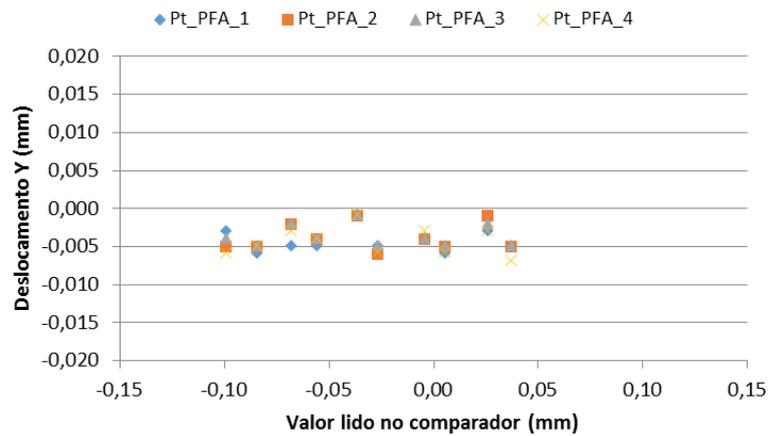


Figura 4.77 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio

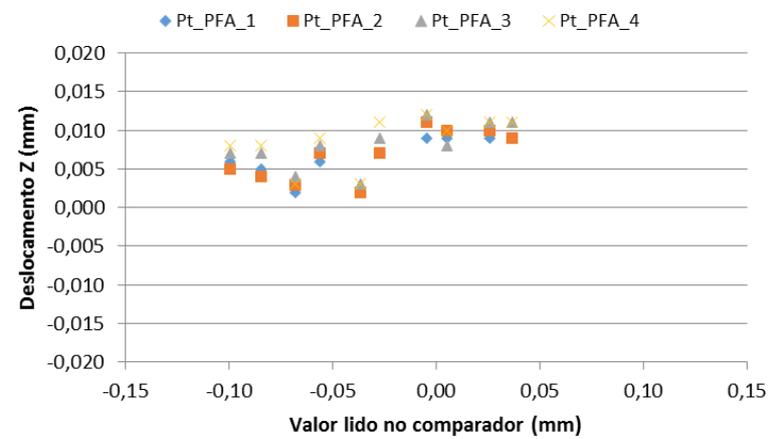


Figura 4.78 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo A – 3º ensaio

#### 4.2.3.9 Plano fixo B

Nas Figuras 4.79 a 4.87 são apresentados os deslocamentos nas direções *X*, *Y* e *Z* dos pontos medidos no plano fixo B, entre patamares de ensaio, respectivamente, para os três ensaios realizados no calibrador.

Os deslocamentos medidos na direção *X* (*vide* Figuras 4.79, 4.82 e 4.85) apresentam uma magnitude máxima absoluta igual a 0,010 mm, exceto no primeiro ensaio onde pontualmente é atingido um valor de deslocamento próximo de 0,020 mm. O comportamento diferenciado entre o primeiro e os restantes dois ensaios pode ser justificado pela ocorrência de deslizamento nesta região do calibrador. Nesta direção nota-se uma ligeira tendência para deslocamentos mais acentuados na região negativa do intervalo de medição (compressão do extensómetro).

No que respeita aos deslocamentos medidos na direção *Y* (*vide* Figuras 4.80, 4.83 e 4.86), a sua magnitude absoluta é inferior a 0,005 mm em todo o intervalo de medição, mostrando um comportamento estático nesta direção e região do calibrador.

Na direção *Z* (*vide* Figuras 4.81, 4.84 e 4.87), a magnitude absoluta dos deslocamentos medidos varia entre 0,005 mm e 0,010 mm, sendo ligeiramente mais acentuada na região positiva do intervalo de medição (tração do extensómetro).

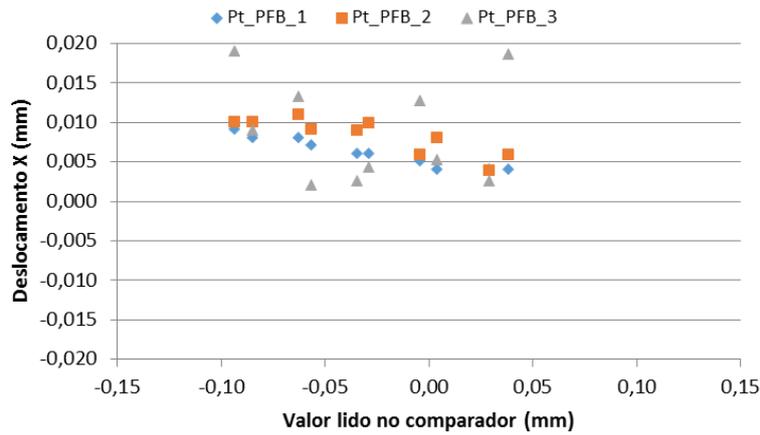


Figura 4.79 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio

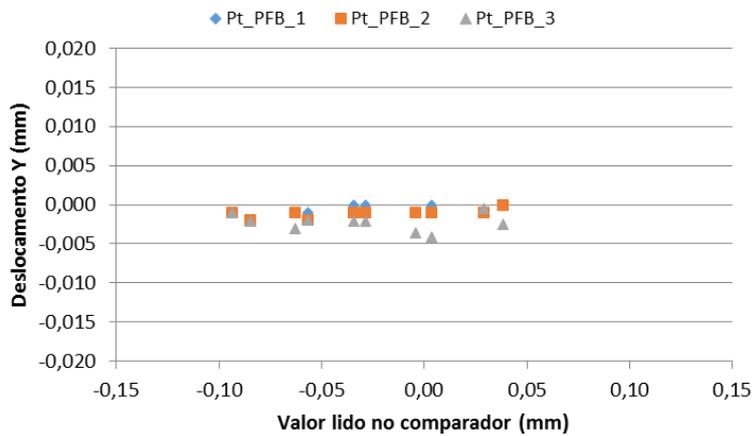


Figura 4.80 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio

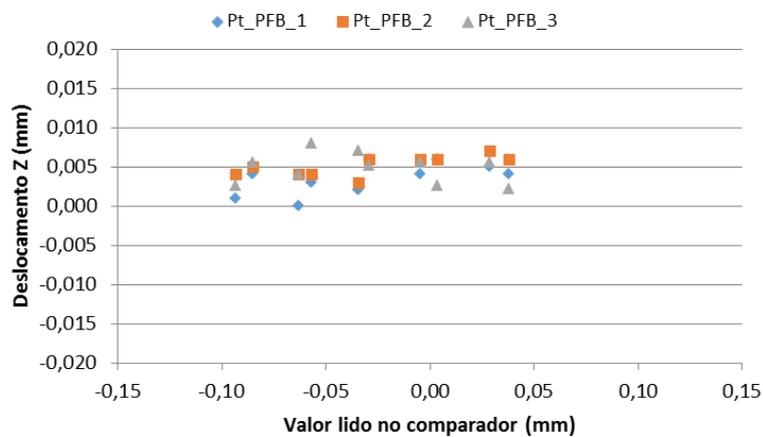


Figura 4.81 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 1º ensaio

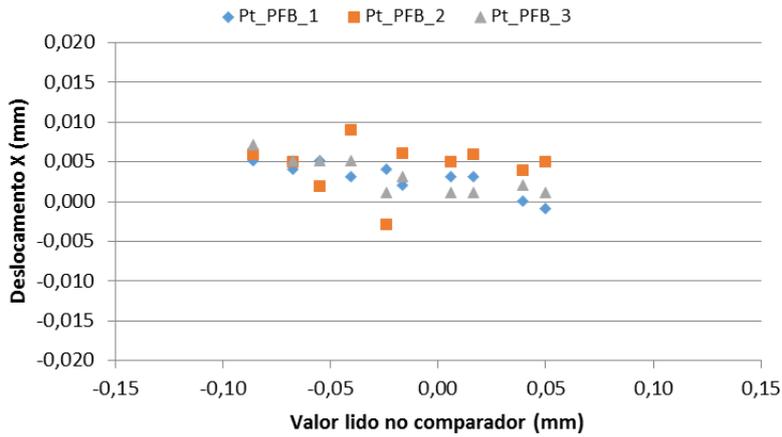


Figura 4.82 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio

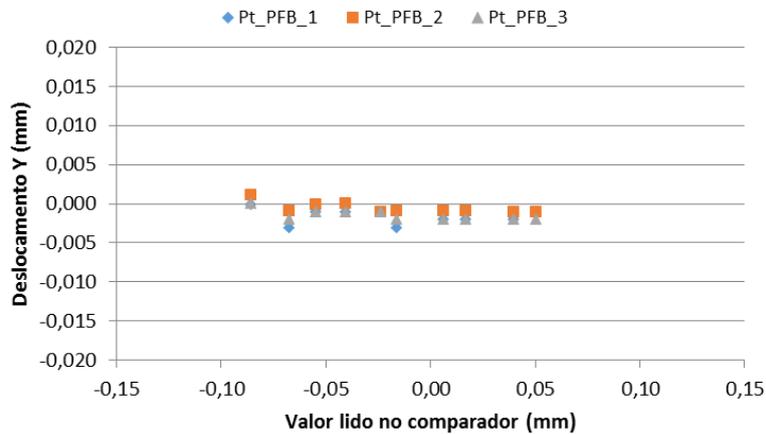


Figura 4.83 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio

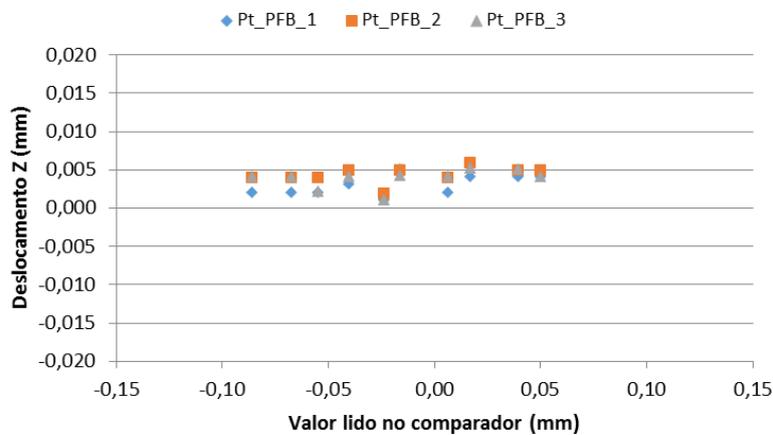


Figura 4.84 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 2º ensaio

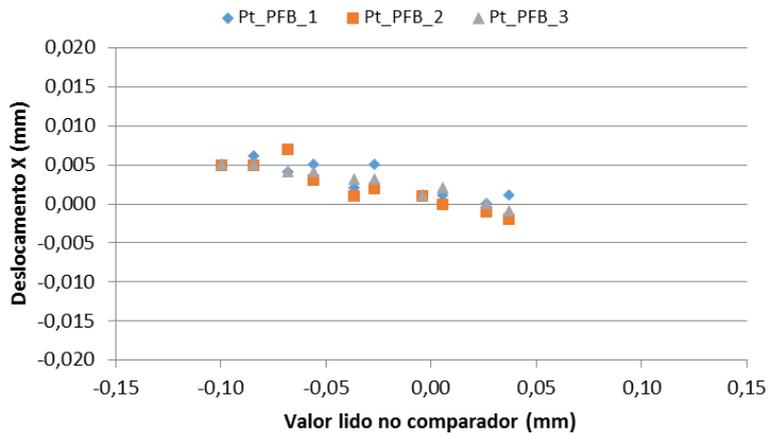


Figura 4.85 – Direção X – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio

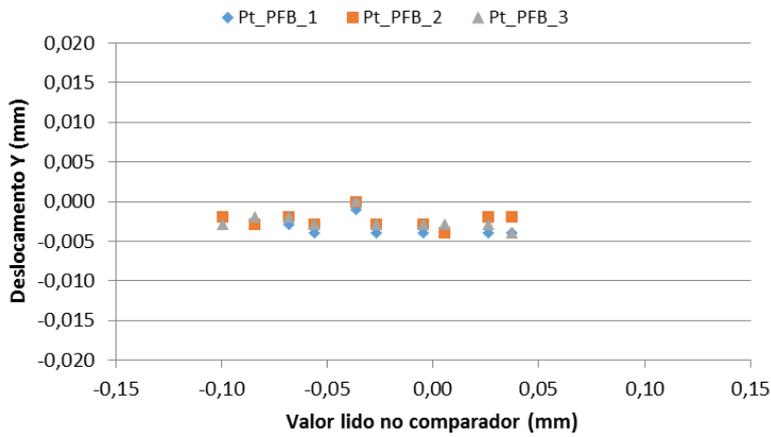


Figura 4.86 – Direção Y – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio

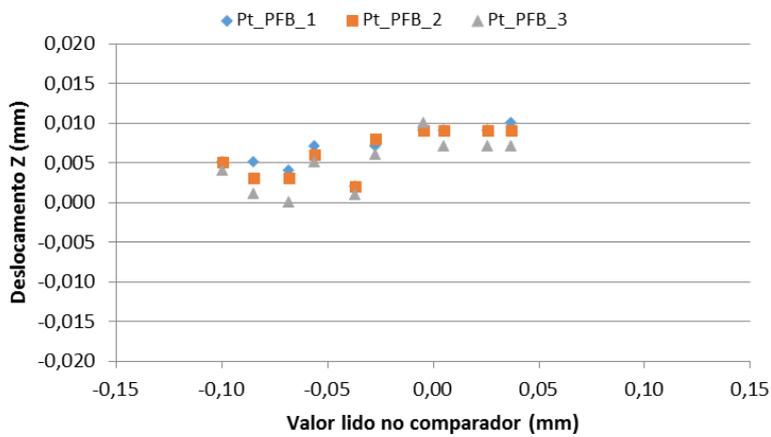


Figura 4.87 – Direção Z – Deslocamento dos pontos no plano fixo B – 3º ensaio

## 5 | Conclusões e considerações finais

O estudo metrológico do calibrador descrito neste relatório permite elaborar as seguintes conclusões, tendo em conta os resultados conhecidos antes e depois da sua adaptação para a calibração de extensómetros de corda vibrante:

- (i) o comparador que integra o calibrador manteve as suas características metrológicas;
- (ii) o limite positivo do intervalo de medição na aplicação do esforço de tração ao extensómetro a calibrar está agora limitado a 0,05 mm (anteriormente este limite correspondia a 0,10 mm);
- (iii) o desvio máximo absoluto da calibração passou de 0,005 mm para 0,015 mm;
- (iv) a reversibilidade aumentou cerca de 0,005 mm entre ciclos ascendente e descendente;
- (v) na perspetiva geométrica, a melhoria mais significativa ocorreu ao nível da perpendicularidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio; pelo contrário, o paralelismo entre o eixo do comparador e o eixo do extensómetro sofreu uma degradação metrológica significativa, mostrando que a montagem atual favorece o desalinhamento axial entre o comparador e o extensómetro a calibrar.

As alterações observadas no comportamento metrológico do calibrador são, em parte, resultantes da aplicação de forças com maior magnitude na calibração de extensómetros de corda vibrante, quando comparado com a calibração de extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson. De facto, a adaptação do calibrador ensaiado centrou-se na garantia de compatibilidade dimensional e geométrica, não abrangendo a vertente do comportamento mecânico diferenciado entre tipos de extensómetros.

As deformações locais observadas no calibrador confirmam a degradação metrológica resultante da aplicação de forças com magnitude mais elevada, nomeadamente, no que respeita à ocorrência de:

- (i) deslizamentos nas direções longitudinal ( $X$ ) e transversal ( $Y$ );
- (ii) deslocamentos indesejáveis
  - a. na direção fora do plano de trabalho do calibrador ( $Z$ ), sobretudo, na aplicação do esforço de tração ao extensómetro;
  - b. na direção  $X$  em regiões do calibrador teoricamente estáticas, sobretudo, na aplicação de esforço de compressão ao extensómetro.

A magnitude das deformações locais observadas apresenta uma ordem de grandeza similar à dos desvios dimensionais obtidos na calibração do calibrador, os quais são mais acentuados nos sentidos crescente de aplicação do esforço de compressão e decrescente de aplicação do esforço de tração.

Lisboa, LNEC, junho de 2021

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica



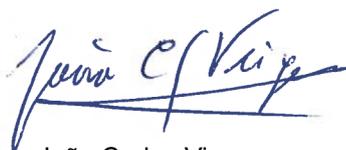
Álvaro Silva Ribeiro

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins  
Investigador Auxiliar

O Diretor do Centro de Instrumentação Científica



João Carlos Viegas



Alexandre Vieira Pinheiro  
Técnico Superior

## Referências bibliográficas

- Boletim de ensaio n.º 0513/2019-UMA – Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC – Ensaios e Metrologia, 11 de julho de 2019.
- Certificado de calibração n.º 0514/2019-UMA – Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC – Ensaios e Metrologia, 11 de julho de 2019.
- EA-4/02 M: 2013 – **Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration**. EA – European Accreditation, 2013.
- EA-4/16 G: 2013 – **EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing**. EA – European Accreditation, 2003.
- JCGM 100: 2008 – **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)**. JCGM – Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- JCGM 200: 2012 – **International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms**. JCGM – Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
- RIBEIRO, Álvaro Silva; MARTINS, Luís Filipe Lages, 2013 – **Caraterização metrológica e calibração de uma prensa de calibração de extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson**. LNEC - Proc.0904/11/17804. Relatório 236/2013 – CIC/NQM.
- RIBEIRO, Álvaro Silva; MARTINS, Luís Filipe Lages – **Ensaio de componentes**. UMA – Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC. Procedimento interno UMA/MEC.PRC.1301, versão 0 (adaptado), 2014.
- RIBEIRO, Álvaro Silva; MARTINS, Luís Filipe Lages – **Calibração de comparadores**. UMA – Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC. Procedimento interno UMA/MEC.PRC.0201, versão 3, 2017.



## ANEXOS

---



**ANEXO I**  
**Certificado de calibração do comparador digital**





**LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL**

**LNEC-EM** Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0030/2021-UMA  
 Pág. 1/2  
 Processo n.º 0904/3211/CALBIN  
 Pedido n.º 0403/0121/20709

# CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

## Cliente / Customer

Designação (Name) LNEC / DBB / NO  
 Endereço (Address) Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

## Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação (Name) Comparador digital (Digital gauge)  
 Marca e modelo (Brand and model) Mitutoyo / ID-H0560  
 Identificação (Identification) 11144525  
 Divisão e alcance (Division and range) 0,0005 mm ; 50 mm

## Equipamento padrão de referência / Reference standard equipment

Designações (Names) Transd. de deslocamento e indicador digital; transd. de força e indicador digital (Displacement transducer and digital Indicator; force transducer and digital Indicator)  
 Identificação (Identification) 692.01; 33.08  
 Rastreabilidade (Traceability) Os resultados apresentados no certificado estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI (The results presented in the certificate are traceable to national or international standards according to SI)

## Dados complementares / Complementary data

Data de calibração (Calibration date) 2021-02-05 (aaaa-mm-dd) (yyyy-mm-dd)  
 Local de calibração (Calibration place) Instalações laboratoriais da UMA / LNEC-EM (UMA / LNEC-EM laboratorial facilities)  
 Condições ambientais (Environmental conditions) Temperatura: 20 °C ± 1 °C; humidade relativa: ≤ 65 % (Temperature and relative humidity)  
 Procedimento / Norma (Procedure / Standard) Procedimento interno MA/MEC.PRC.0201, versão 3 (Internal procedure MAMEC.PRC.0201, version 3)

## Observações / Remarks

Inspeção visual (Visual inspection) Nada a assinalar (Nothing to record)  
 Observações gerais (General remarks) Nada a assinalar (Nothing to record)

**LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA** Núcleo de Qualidade Metrológica  
 Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt [www.lnecc.pt](http://www.lnecc.pt)

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.

LNEC-2041



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0030/2021-UMA

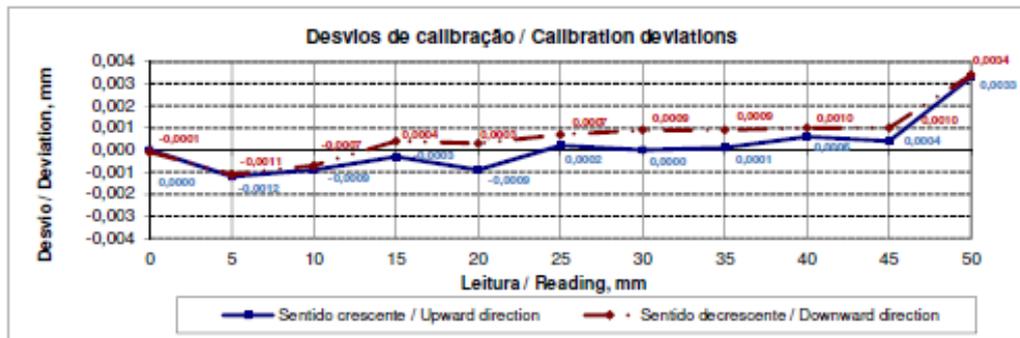
Pág. 2/2

Processo n.º 0904/3211/CALBIN

Pedido n.º 0403/0121/20709

# CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

## Resultados / Results



|  |               |  |           |
|--|---------------|--|-----------|
| Força máxima de contacto:<br>(Maximum contact force)   | (196 ± 20) cN | Erro máximo em ambas as direções:<br>(Maximum error in both directions)                        | 0,0046 mm |
| Máx. diferença de força:<br>(Maximum force difference) | (67 ± 20) cN  | Erro máximo no sentido crescente:<br>(Maximum error in the upward direction)                   | 0,0033 mm |
| Reversibilidade:<br>(Reversibility)                    | 0,0012 mm     | Erro máximo no sentido decrescente:<br>(Maximum error in the downward direction)               | 0,0034 mm |
| Repetibilidade:<br>(Repeatability)                     | 0,0002 mm     | Incerteza expandida de medição (95%)* = 0,0016 mm<br>(95% expanded uncertainty of measurement) |           |

\* Os valores indicados representam a semi-amplitude do intervalo de incerteza expandida de medição, conforme definido no ISO-GUM  
 \*(The values shown represent the half-width of the measurement expanded uncertainty interval, as defined in ISO-GUM)

Local e data de emissão: Lisboa, 08 de fevereiro de 2021  
 (Place and date of issue)

## Assinaturas / Signatures

| Calibrado por<br>(Calibrated by) | Validado por<br>(Validated by)                             | Autorizado por<br>(Authorized by) |   |
|----------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| João A. Fernandes                | Luís L. Martins  | João Carlos Viegas                | Assinado por: João Carlos Godinho Viegas<br>Num. de identificação: B106402904<br>Data: 2021.02.24 09:35:47+00'00' |
| Técnico<br>(Technician)          | Coordenador da UMA<br>(Head of the calibration laboratory) | Director do CIC<br>(CIC director) |   |

### Notas / Notes:

The Portuguese Institute of Accreditation (IPAC) is one of the signatories of the International Laboratory Accreditation Co-operation (ILAC) arrangement for the mutual recognition of Calibration Certificates. IPAC is also one of the signatories of the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for the mutual recognition of Calibration Certificates issued by accredited laboratories.

A incerteza expandida de medição, calculada de acordo com o documento EA-4/02, está expressa pela incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de expansão  $k=2,01$  calculado segundo uma distribuição t-Student com 195 graus de liberdade para de uma probabilidade expandida de 95%.

(The expanded uncertainty of measurement, evaluated according with the guide EA-4/02, is expressed by the product of the standard uncertainty by the coverage factor  $k=2,01$  evaluated using a t-Student distribution with 195 degrees of freedom, in order to achieve an expanded probability of 95%.)

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de notações apostas enviadas, não sendo por isso de responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.

LNEC-2041

## ANEXO II

### Boletim de ensaio dimensional e geométrico do calibrador





LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

**LNEC-EM** Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0029/2021-UMA

Pág. 14

Processo n.º 0904/3211/CALBIN

Pedido n.º 0403/0121/20709

# BOLETIM DE ENSAIO

## Cliente / Customer

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Designação<br>(Name)  | LNEC / DBB / NO                         |
| Endereço<br>(Address) | Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa |

## Componente ensaiado / Tested component

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Designação<br>(Name)                | Calibrador portátil de extensómetros de corda vibrante<br>(Portable calibrator for vibrating wire strain gauges) |
| Marca e modelo<br>(Brand and model) | --- / ---  |
| Identificação<br>(Identification)   | 1  |

## Equipamento padrão de referência / Reference standard equipment

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Designação<br>(Name)              | Máquina de medição de coordenadas 3D<br>(3D coordinate measuring machine)  |
| Identificação<br>(Identification) | 203.01   |
| Rastreabilidade<br>(Traceability) | Os resultados apresentados no boletim de ensaio estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI<br>(The results presented in the test report are traceable to national or international standards according to SI) |

## Dados complementares / Complementary data

|  |  |
|--|--|
| Data de ensaio<br>(Test date)                      | 2021-02-16<br>(aaaa-mm-dd)<br>(yyyy-mm-dd)   |
| Local de ensaio<br>(Test place)                    | Instalações laboratoriais da UMA / LNEC-EM<br>(LNEC-EM Applied Metrology Laboratory facilities)                      |
| Condições ambientais<br>(Environmental conditions) | Temperatura: 20 °C ± 1 °C; humidade relativa: ≤ 65 %<br>(Temperature and relative humidity)                          |
| Procedimento / Norma<br>(Procedure / Standard)     | Procedimento interno MA/MEC.PRC.1301, versão 0, adaptado<br>(Internal procedure MA/MEC.PRC.1301, version 0, adapted) |

## Observações / Remarks

|   |   |
|---|---|
| Inspeção visual<br>(Visual inspection)  | Nada a assinalar<br>(Nothing to report)   |
| Observações gerais<br>(General remarks) | Os ensaios dimensionais e geométricos realizados incluíram a montagem de um extensómetro de corda vibrante GEOKON / 4210 (id. 1) no calibrador; patamares de ensaio definidos pelo cliente.<br><br>(The performed dimensional and geometrical tests included the assembly of a vibrating wire strain gauge GEOKON / 4210 - id. 1- in the calibrator; testing steps defined by the customer) |

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica  
Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt [www.lnecc.pt](http://www.lnecc.pt)

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

LNEC-2040



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

**LNEC-EM** Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0029/2021-UMA

Pág. 2/4

Processo n.º 0904/3211/CALBIN

Pedido n.º 0403/0121/20709

# BOLETIM DE ENSAIO

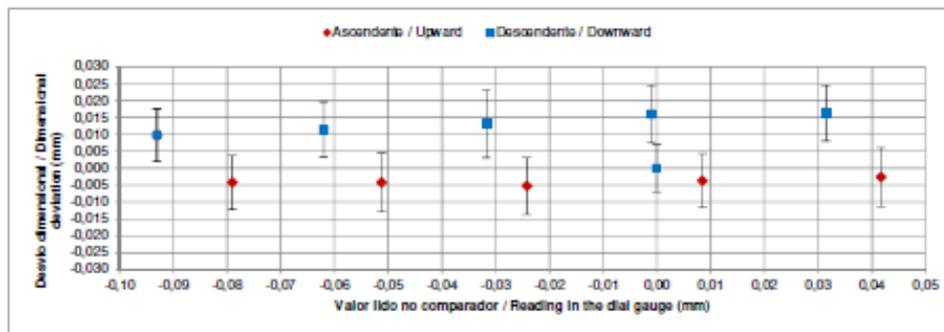
## Resultados / Results

### 1. Ensaio dimensionais / Dimensional testing

#### 1.1. Avaliação da exatidão da medição do deslocamento do plano móvel

(1.1. Accuracy evaluation of the mobile plane displacement measurement)

| Valor lido no comparador<br>(Dial gauge reading) | Valor médio de referência<br>(Average reference value) | Incerteza expandida (95%)<br>(95% expanded uncertainty) | Desvio dimensional<br>(Dimensional deviation) |
|--|--|---|---|
| / mm   | / mm   | / mm  | / mm  |
| 0,0000   | 0,0000   | 0,0070  | 0,0000  |
| -0,0317  | -0,0448  | 0,010   | 0,013   |
| -0,0620  | -0,0735  | 0,0082  | 0,0115  |
| -0,0930  | -0,1028  | 0,0078  | 0,0098  |
| -0,0790  | -0,0748  | 0,0080  | -0,0042                                       |
| -0,0512  | -0,0470  | 0,0087  | -0,0042                                       |
| -0,0242  | -0,0190  | 0,0084  | -0,0052                                       |
| 0,0085   | 0,0122   | 0,0080  | -0,0037                                       |
| 0,0417   | 0,0443   | 0,0087  | -0,0026                                       |
| 0,0315   | 0,0152   | 0,0082  | 0,0163  |
| -0,0010  | -0,0170  | 0,0085  | 0,0160  |



LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrologia  
 Av. do Brasil 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL - tel: (+351) 21 844 30 00 - fax: (+351) 21 844 30 20 - lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apontadas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

LNEC-2940

# BOLETIM DE ENSAIO

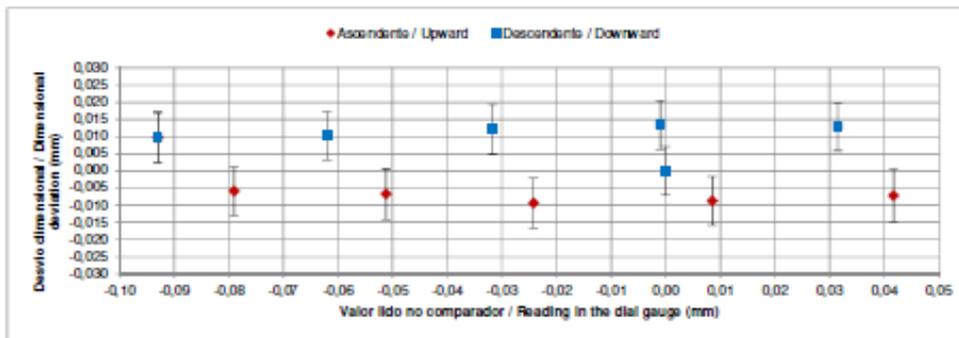
## Resultados / Results

### 1. Ensaio dimensionais / Dimensional testing

#### 1.2. Medição da distância entre os planos móvel e fixo

(1.2. Measurement of the distance between fixed and mobile planes)

| Valor lido no comparador<br>(Dial gauge reading)<br>/ mm | Valor médio do referência<br>(Average reference value)<br>/ mm | Incerteza expandida (95%)<br>(95% expanded uncertainty)<br>/ mm | Desvio dimensional<br>(Dimensional deviation)<br>/ mm |
|--|--|---|---|
| 0,0000   | 0,0000   | 0,0070  | 0,0000  |
| -0,0317  | -0,0438  | 0,0073  | 0,0121  |
| -0,0620  | -0,0722  | 0,0070  | 0,0102  |
| -0,0930  | -0,1027  | 0,0073  | 0,0097  |
| -0,0790  | -0,0731  | 0,0071  | -0,0059   |
| -0,0512  | -0,0445  | 0,0074  | -0,0067   |
| -0,0242  | -0,0148  | 0,0073  | -0,0094   |
| 0,0085   | 0,0172   | 0,0071  | -0,0087   |
| 0,0417   | 0,0489   | 0,0077  | -0,0072   |
| 0,0315   | 0,0186   | 0,0070  | 0,0129  |
| -0,0010  | -0,0144  | 0,0071  | 0,0134  |



LNec CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica  
 Av. do Brasil 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL - tel. (+351) 21 844 30 00 - fax: (+351) 21 844 30 20 - lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LNec, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNec. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

LNec-2940



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

**LNEC-EM** Ensaios e Metrologia  
UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0028/2021-UMA  
Pág. 44  
Processo n.º 0904/3211/CALBIN  
Pedido n.º 0403/0121/20709

# BOLETIM DE ENSAIO

## Resultados / Results

### 2. Ensaio geométricos / Geometrical testing

#### 2.1. Ortogonalidade entre o eixo do comparador e o seu plano de apoio (2.1. Orthogonality between the dial gauge axis and the support plane)

| Identificação do ângulo<br>(Angle identification) | Valor médio da referência<br>(Average reference value) | Incerteza expandida (95%)<br>(95% expanded uncertainty) | Desvio de ortogonalidade<br>(Orthogonality deviation) |
|---|--|---|---|
|   | /º   | /º  | /º  |
| 3D (XYZ)  | 89,852   | 0,021   | 0,148   |
| 2D (XY)   | 89,976   | 0,024   | 0,024   |
| 2D (XZ)   | 89,855   | 0,023   | 0,145   |

#### 2.2. Paralelismo (2.2. Parallelism)

| Elementos geométricos medidos na prensa de calibração<br>(Geometrical elements measured in the calibration testing machine) | Desvio de paralelismo<br>(Parallelism deviation) | Incerteza expandida (95%)<br>(95% expanded uncertainty) |
|---|--|---|
|   | / mm   | / mm  |
| Plano móvel // plano fixo<br>(Mobile plane // fixed plane)  | 0,065  | 0,017   |
| Eixo do comparador // eixo do extensómetro<br>(Dial gauge axis // Strain meter axis)  | 1,802  | 0,056   |
| Plano do comparador // plano externo móvel<br>(Dial gauge plane // mobile external plane)                                   | 0,216  | 0,023   |
| Plano do comparador // plano móvel<br>(Dial gauge plane // mobile plane)  | 0,161  | 0,015   |
| Eixo da guia esquerda // eixo da guia direita<br>(Left guide axis // Right guide axis)                                      | 0,055  | 0,011   |

Local e data de emissão: Lisboa, 18 de fevereiro de 2021  
(Place and date of issue)

### Assinaturas / Signatures

| Ensaio por<br>(Tested by) | Validado por<br>(Validated by)                         | Autorizado por<br>(Authorized by) |   |
|---------------------------|--|-----------------------------------|---|
| Alexandre V. Pinheiro     | Luís L. Martins  | João Carlos Viegas                | <b>Assinado por: João Carlos Godinho Viegas</b>                       |
| Técnico<br>(Technician)   | Coordenador da UMA<br>(Head of the testing laboratory) | Diretor do CIC<br>(CIC director)  | Num. de Identificação: B106402904<br>Data: 2021.02.24 09:31:00+00'00' |

#### Notas / Notes:

A incerteza expandida de medição, calculada de acordo com o documento EA-4/16, está expressa pela incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de expansão 2,05 calculado segundo uma distribuição t-Student com 50 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida 95%  
(The expanded uncertainty of measurement, evaluated according with the guide EA-4/16, is expressed by the product of the standard uncertainty by the coverage factor 2,05 evaluated using a t-Student distribution with 50 degrees of freedom, in order to achieve an 95% expanded probability)

LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica  
Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

LNEC-2040