

## Referências Bibliográficas

- [1] Vicente, J.; Sánchez P.; Madrona J.A., - **Calibration of Laser Interferometers as Variable Length Standards** – Congres International de Metrologie, 1993.
- [2] Cruz, D., **Óptica**. 1. ed. São Paulo: Ática, 2001. 37 p.
- [3] [www.comciencia.br/reportagens/fisica/fisica13.htm](http://www.comciencia.br/reportagens/fisica/fisica13.htm) - Elza Vasconcellos
- [4] Halliday, D., Resnick, R.; **Física II** . 2 ed. – Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 551 p.
- [5] **Laser Measurement System 5526A** – User’s Guide - Hewlett Packard, 1980.
- [6] **Laser and Optics 5501A**, - Application Note 197-2 - 1980.
- [7] Hoffer, T. M., **Calibration of a Machine Tool**, Hewlett Packard, 1980.
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10791-4** – Part 4: Test Conditions for Machining Centres – Accuracy and Repeatability of Positioning of Linear and Rotary Axes. Genève, 1998.
- [9] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 2617-** Parts 1-5: Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Dusseldorf –Germany, 1986
- [10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360** – Parts 1-6: Coordinate Metrology. Genève , 2001.
- [11] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI BERICHTE 749**: Laser Interferometrie in der Industriellen Messtechnik. Germany. 1989.
- [12] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI Berichte 750**: Dokumentation Genauigkeit von Laserinterferometer-Systemen. Compiled and published by VDE-GMA Committee 7.4 “Grundlagen der Längen- und Winkelmessung”. Abril 1989.

- [13] Dutschke W.; Richers H.; Jaklin H.; Linhart C.: **Vorrichtung zum Einmessen (Kalibrieren) von Laser-interferometern**. Patent specification G 01 B 9/02 DE 2722887 B1 dated 20.05.1979.
- [14] Stone, J., Schroeck, M. e Stocker, M. – **Testing Displacement-Measuring Interferometer Systems**, Nist Special Publication, 2001.
- [15] Schüssler, H.-H.: **Anordnung zum gleichzeitigen und unmittelbaren Vergleich der Messgenauigkeit zweier verschiedener Laserinterometer**. Patent specification G 01 B 9/92 DE 3338981 C1 of 27.10.1983
- [16] Schellekens P.H.J.; Koning J.; Veenstra P.C.: **Accuracy of Commercially Available Laser Measurement Systems**. CIRP Annals 31, 1 (1982), 427-429.
- [17] Sparrer, G.: **Anordnung zum direkten Vergleich und zur Kalibrierung von Laserinterferometern**. Patent specification G 01 B 9/02 DE 4208189 A of 08.04.1993.
- [18] Sparrer, G.: **Kalibrierung von Kompletten Laserinterferometern für Längermessungen proceedings der Tagung messComb-Wiesbaden,1993**.
- [19] Edlén, B. – **The Refractive Index of Air**. Revista Metrologia, 1965, 71-80
- [20] Birch, K. P. and Downs, M. J. - **An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air**. Revista Metrologia, 1993, **30** 155-162.
- [21] Bönsch, G., Potulski, M. **Measurement of Refractive Index of Air and Comparison with Modified Edlén Formulae**. Revista Metrologia, 1996, **35**, 133-139.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1: Standard Reference Temperature for Industrial Length Measurements**, 1975.

- [23] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM**, Rio de Janeiro, 1995.
- [24] Spiegel, R. M. **Estatística**. 2 ed. 1985 ed. São Paulo: McGraw Hill, 2001. 207-212 p.
- [25] Couto, P.R.G., Valente, J.C.O. **Estimativa de Incerteza na Análise Química**. Inmetro/Ufrj - Escola de Química. Rio de Janeiro, 2001.
- [26] Eurachem/Citac - **Quantifying Uncertainty In Analytical Measurement**. 2 ed.- Abril 2000.
- [27] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição – 2 ed.** Rio de Janeiro,1998.
- [28] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02**. 1 ed. Rio de Janeiro, 1999.

## **7 Apêndices**

## APÊNDICE 1

### Erros Máximos Admissíveis de Posicionamento para Máquinas-Ferramenta

A tabela abaixo foi extraída da norma ISO 10791-4.

**Tabela 1.1 – Erros Máximos Admissíveis para comprimentos até 2000 mm**

Parâmetros do erro de posicionamento	Comprimento do eixo deslocado (mm)			
	≤ 500	> 500 ≤ 800	> 800 ≤ 1250	> 1250 ≤ 2000
Exatidão bidirecional	0,022	0,025	0,032	0,042
Exatidão em uma direção	0,016	0,020	0,025	0,030
Repetitividade bidirecional	0,012	0,015	0,018	0,020
Repetitividade em uma direção	0,006	0,008	0,010	0,013
Valor de reversão	0,010	0,010	0,012	0,012
Valor médio de reversão	0,006	0,006	0,008	0,008
Erro sistemático bidirecional	0,015	0,018	0,023	0,030
Erro sistemático em uma direção	0,010	0,012	0,015	0,018
Erro médio bidirecional da faixa	0,010	0,012	0,015	0,020

## APÊNDICE 2

### PADRÕES DE REFERÊNCIA

Este Apêndice contém a relação de padrões de referência utilizados no presente trabalho e as principais informações contidas em seus certificados. Todos certificados foram emitidos por laboratórios do Inmetro.

#### 1. Higrômetro e Termômetro (Termohigrômetro) referência para o sensor da temperatura do ar.

Certificado do Laboratório de Higrometria - Lahig

Fabricante: Vaisala

Resolução: umidade (0,1%) e termômetro (0,10°C)

Data de Calibração: 18/04/1998

**Tabela A2.1 - Resultados do higrômetro e a incerteza em %**

Umidade relativa padrão	Indicação do instrumento	Correção	$U$
77,1	79,4	-2,3	1,0
58,1	59,4	-1,3	0,8
38,7	38,9	-0,2	0,6

*Umidade Relativa = indicação do instrumento + correção*

**Tabela A2.2 - Resultados do termômetro (1) e a incerteza em °C**

Temperatura Padrão	Indicação do Instrumento	Correção	$U$
20,5	20,6	-0,1	0,1
30,8	30,8	-0,1	0,1

*Temperatura = Indicação do Instrumento + Correção*

Com fator de abrangência  $k=2$  e com um nível de confiança de aproximadamente 95% para os dois instrumentos.

## 2. Termômetro digital referência (2) para o sensor da temperatura do objeto a calibrar

Certificado do Laboratório de Temperatura - Later

Fabricante: Anton Paar

Data da Calibração: 20/06/2001

Resolução do Termômetro: 0,001 °C

Faixa de Calibração: 15 °C a 80 °C (Incluindo o ponto 0 °C)

Tipo: pt-100

**Tabela A2.3 - Resultados do termômetro (2) e a incerteza em °C**

Temperatura	Correção	$U$
20,000	-0,005	0,007
25,000	-0,005	0,007

Com fator de abrangência  $k=2$  e com um nível de confiança de aproximadamente 95%.

## 3. Barômetro Digital

Certificado do Laboratório de Pressão - Lapre

Fabricante: Druck incorporated

Resolução: 0,001 mmHg (0,13 kPa)

Faixa de Indicação: 600 a 862 mmHg (80 a 115 kPa)

Data de Calibração: 24/08/1998

**Tabela A2.4 - Resultados do barômetro e a incerteza em mmHg**

Pressão de Referência	Pressão Indicada	Erro	$U$
753,8833	753,735	-0,148	0,060
760,4439	760,295	-0,149	0,060
767,0036	766,863	-0,141	0,060

Com fator de abrangência  $k=2$  e com um nível de confiança de aproximadamente 95%.

#### 4. Comprimento de Onda do Laser de Referência

Certificado do Laboratório de Interferometria - Laint

Instrumento de Medição: Laser Estabilizado.

Fabricante : Hewlett-Packard.

Data de Calibração: 20/10/1999

Resolução: 0,00001 mm

#### Resultados e Declarações de Incerteza.

O valor da média do batimento de frequência obtido é -23,0 MHz, conseqüentemente, o valor da frequência do laser é  $f = 473612191,7$  MHz.

Em comprimento de onda no vácuo, o resultado é:  $\lambda = 0,632991429$ .

A incerteza de medição com fator de abrangência  $k=2$  com um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Em frequência,  $U(f) = 5$  MHz

Em comprimento de onda,  $U(\lambda) = 0,000000007$   $\mu\text{m}$ .

## APÊNDICE 3

### Radiações Recomendadas de Lasers Estabilizados para Realização do Metro

É apresentado aqui um resumo da lista das radiações recomendadas para realização do metro aprovada pelo CIPM (Comitê Internacional de Pesos e Medidas) em 1997, contendo as frequências e comprimentos de onda no vácuo.

**Tabela 3.1 – Tipos de lasers estabilizados**

Tipo de elemento absorvente	Comprimento de onda (fm)	Incerteza relativa
$^1\text{H}$	243 134 624,6260	$8,5 \times 10^{-13}$
$^{127}\text{I}_2$	514 673 466,4	$2,5 \times 10^{-10}$
$^{127}\text{I}_2$	532245036,14	$7 \times 10^{-11}$
$^{127}\text{I}_2$	543516333,1	$2,5 \times 10^{-10}$
$^{127}\text{I}_2$	611 970 770,0	$3 \times 10^{-10}$
$^{127}\text{I}_2$	632 991 398,22	$2,5 \times 10^{-11}$
$^{127}\text{I}_2$	640 283 468, 7	$4,5 \times 10^{-10}$
$^{40}\text{Ca}$	657 459 439,2917	$6 \times 10^{-13}$
$^{88}\text{Sr}^+$	674 025 590,95	$1,3 \times 10^{-10}$
$^{85}\text{Rb}$	778 105 421,22	$1,3 \times 10^{-11}$
$\text{CH}_4$	3 392 231 397,327	$3 \times 10^{-12}$
$\text{CH}_4$	3 392 231 397,31	$2,3 \times 10^{-11}$
$\text{OsO}_4$	10 303 465 254,27	$6 \times 10^{-12}$

#### 1 Átomo absorvente $^1\text{H}$ , transição 15-25 a dois fótons

Os valores  $f = 1\,233\,030\,706\,593,7$  kHz e  $\lambda = 243\,134\,624,6260$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $8,5 \times 10^{-13}$ , se aplicam a uma radiação estabilizada numa transição a dois fótons numa faísca de hidrogênio frio. Pode-se também utilizar outras transições absorventes no hidrogênio; essas transições são dadas no anexo M3 do relatório do CCDM (1997).

#### 2 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2'$ transição 43-0, P(13), componente $\text{A}_3$ (OU S).

Os valores  $f = 582\,490\,603,37$  MHz e  $\lambda = 514\,673\,466,4$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-10}$ , se aplicam a radiação emitida por um laser Ar<sup>+</sup> estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $-(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

### **3 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2$ , transição 32-0, R(56), componente A<sub>10</sub>**

Os valores  $f = 563\,260\,223,48$  MHz e  $\lambda = 532245036,14$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $7 \times 10^{-11}$ , se aplicam a radiação emitida por um laser Nd: YAC à frequência dupla absorvida com a ajuda de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio a uma temperatura situada entre  $-10^\circ\text{C}$  e  $20^\circ\text{C}$ .

### **4 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2$ transição 26-0, R(12), componente A<sub>9</sub>**

Os valores  $f = 551\,579\,482,96$  MHz e  $\lambda = 543516333,1$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-10}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(0 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

### **5 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2$ , transição 9-2, R(47), componente A<sub>7</sub> (ou O)**

Os valores  $f = 489\,880\,354,9$  MHz e  $\lambda = 611\,970\,770,0$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $3 \times 10^{-10}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior ou no exterior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

### **6 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2$ , transição 11-5, R(127), componente A<sub>13</sub> (ou i)**

Os valores  $f = 473\,612\,214\,705$  kHz e  $\lambda = 632\,991\,398,22$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,5 \times 10^{-11}$ , que resulta da radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado pela técnica do terceiro harmônico com o auxílio de uma célula de iodo.

### **7 Molécula absorvente $^{127}\text{I}_2$ , transição 8-5, P(10), componente A<sub>9</sub> (ou G)**

Os valores  $f = 468\,218\,332,4$  MHz e  $\lambda = 640\,283\,468,7$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $4,5 \times 10^{-10}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio de uma célula de iodo, situada no interior do laser, tendo um ponto frio à temperatura de  $(16 \pm 1)$  °C, com uma amplitude de modulação de frequência, da crista à cavidade, de  $(6 \pm 1)$  MHz.

### **8 Átomo absorvente $^{40}\text{Ca}$ , transição $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ ; $\Delta M_j = 0$**

Os valores  $f = 455\,986\,240\,494,15$  kHz e  $\lambda = 657\,459\,439,2917$  fm ,

Com uma incerteza global relativa de  $6 \times 10^{-13}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado com o auxílio de átomo de Ca.

### **9 Ion absorvente $^{88}\text{Sr}^+$ , transição $5^2\text{S}_{1/2} - 4^2\text{D}_{5/2}$**

Os valores  $f = 444\,779\,044,04$  MHz e  $\lambda = 674\,025\,590,95$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $1,3 \times 10^{-10}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado na transição que se observa com o auxílio de um ion de Sr capturado e resfriado..

### **10 Átomo absorvente $^{85}\text{Rb}$ , transição $^5\text{S}_{1/2} (F=3) - ^5\text{D}_{5/2} (F=5)$ a dois fótons**

Os valores  $f = 385\,285\,142\,378$  kHz e  $\lambda = 778\,105\,421,22$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $1,3 \times 10^{-11}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser estabilizado no centro da transição a dois fótons. Os valores se aplicam a uma célula de Rb, à uma temperatura inferior a 100 °C.

### **11 Molécula absorvente $\text{CH}_4$ , transição $\text{V}_3 (\text{P7})$ , componente $\text{F}_2^{(2)}$**

**11.1 Os valores :**  $f = 88376181\,600,18$  kHz e  $\lambda = 3\,392\,231\,397,327$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $3 \times 10^{-12}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado com o auxílio da componente central [transição (7-6)] do triplet de estrutura hiperfina resolvida.

**11.2 Os valores :**  $f = 88376181600,5$  kHz e  $\lambda = 3\,392\,231\,397,31$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $2,3 \times 10^{-11}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser He-Ne estabilizado no centro da estrutura hiperfina não resolvida, com o auxílio de uma célula de metano.

**12 Molécula absorvente OsO<sub>4</sub> , transição em coincidência com o raio laser <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> ,R (12)<sup>4</sup>**

Os valores  $f = 29\,096\,274\,952,34$  kHz e  $\lambda = 10\,303\,465\,254,27$  fm

Com uma incerteza global relativa de  $6 \times 10^{-12}$ , se aplicam à radiação emitida por um laser CO<sub>2</sub> estabilizado numa célula de OsO<sub>4</sub>, à pressão inferior a 0,2Pa, situada no exterior do laser. Pode-se utilizar outras transições; estas são indicadas no anexo M3 do relatório do CCDM (1997).

## APÊNDICE 4

### Revisão da Equação de Edlén realizada por Bönsch

A última revisão realizada por Bönsch [21], alterou as constantes a partir de novas condições padronizadas tais como temperatura  $T=20$  °C, pressão atmosférica  $p = 100000$  Pa e com volume de  $\text{CO}_2$  no ar de 0,04%. São apresentadas a seguir as modificações nas equações:

a) Equação de dispersão;

$$\eta_s = C_1 + C_2 + \left(\chi - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2\right)^{-1} + C_3 \left(\varepsilon - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2\right)^{-1} + 1$$

sendo que;

$$C_1 = 8091,37 \times 10^{-8};$$

$$C_2 = 2333983 \times 10^{-8};$$

$$C_3 = 15518 \times 10^{-8};$$

$$\chi = 130;$$

$$\varepsilon = 38,9;$$

b) Equação da refatividade com volume 0,04 % de  $\text{CO}_2$ ;

$$\eta_x - 1 = [1 + 0,5327(x - 0,0004)](\eta_s - 1);$$

c) Equação de Edlén para o índice de refração no ar;

$$\eta = \left[ p \times \frac{(\eta_s - 1)}{K_1} \right] \times \frac{(1 + 10^{-8} \times (K_2 + K_3 T) \times p)}{(1 + K_4 T)} - f \times \left[ K_5 + K_6 \times \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2 \right] \times 10^{-10} + 1$$

Sendo que:

$$K_1 = 96095,43; K_2 = 0,601; K_3 = -0,00972; K_4 = 0,003661; K_5 = 3,7345; K_6 = 0,00401.$$

## APÊNDICE

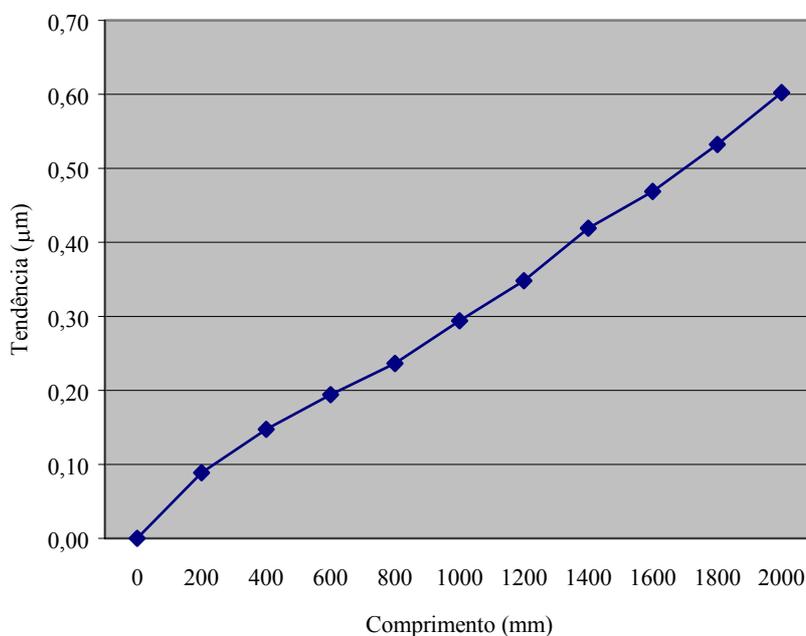
### 5

#### Tendência das Séries de Medição

Neste apêndice são apresentadas as tendências das quatro séries de três medições, que foram realizadas a cada 200 mm, em dias diferentes. São apresentados também os gráficos de tendência correspondentes.

**Tabela A5.1 – Registro da Medição 1**

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
0	0,000	0,000
200	0,089	0,038
400	0,147	0,032
600	0,194	0,011
800	0,236	0,022
1000	0,294	0,034
1200	0,348	0,044
1400	0,419	0,040
1600	0,469	0,068
1800	0,532	0,077
2000	0,603	0,090



**Figura A5.1 - Gráfico da Tendência da Medição 1**

Tabela A5.2 – Registro da Medição 2

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
0	0,000	0,000
200	0,033	0,034
400	0,110	0,022
600	0,187	0,028
800	0,242	0,013
1000	0,267	0,059
1200	0,363	0,015
1400	0,402	0,034
1600	0,486	0,023
1800	0,603	0,053
2000	0,665	0,062

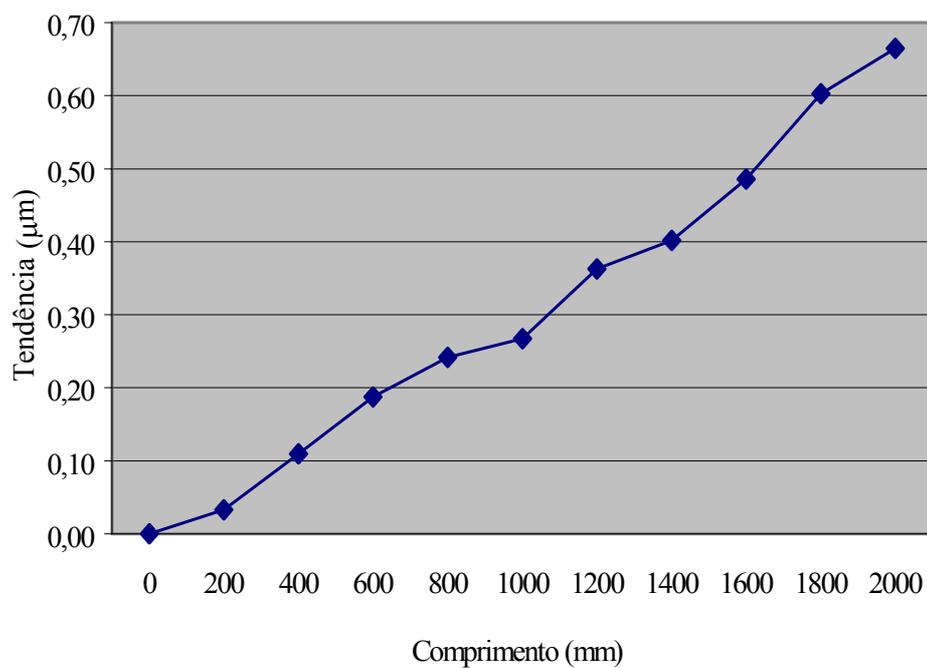


Figura A5.2 – Gráfico da Tendência da Medição 2

Tabela A5.3 – Registro da Medição 3

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
0	0,000	0,000
200	0,027	0,010
400	0,140	0,031
600	0,192	0,010
800	0,245	0,016
1000	0,316	0,031
1200	0,364	0,021
1400	0,365	0,064
1600	0,514	0,022
1800	0,553	0,084
2000	0,656	0,058

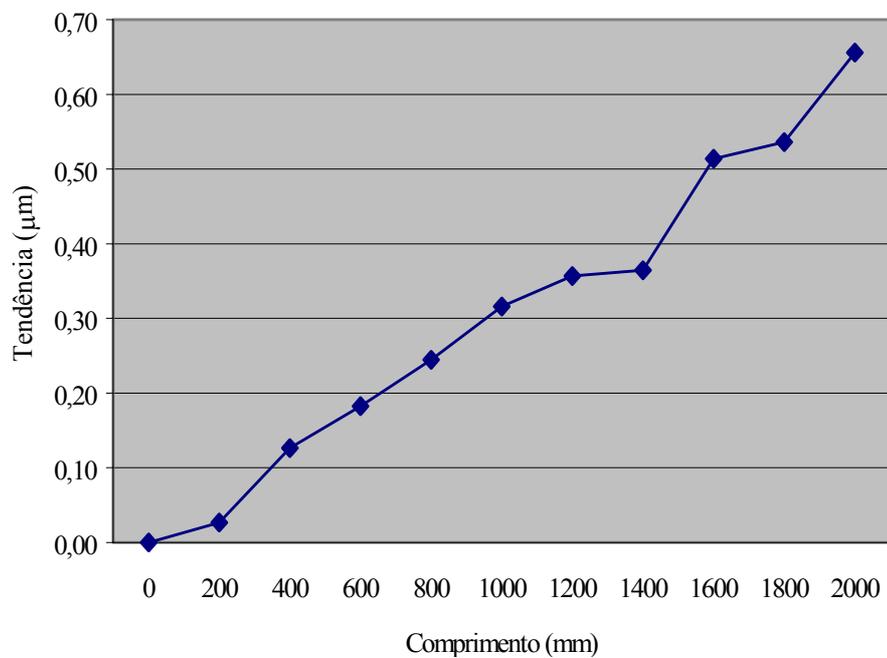


Figura A5.3 - Gráfico da Tendência da Medição 3

Tabela A5.4 – Registro da Medição 4

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
0	0,000	0,000
200	0,044	0,028
400	0,147	0,018
600	0,203	0,017
800	0,275	0,009
1000	0,319	0,014
1200	0,388	0,021
1400	0,482	0,029
1600	0,553	0,012
1800	0,563	0,098
2000	0,690	0,049

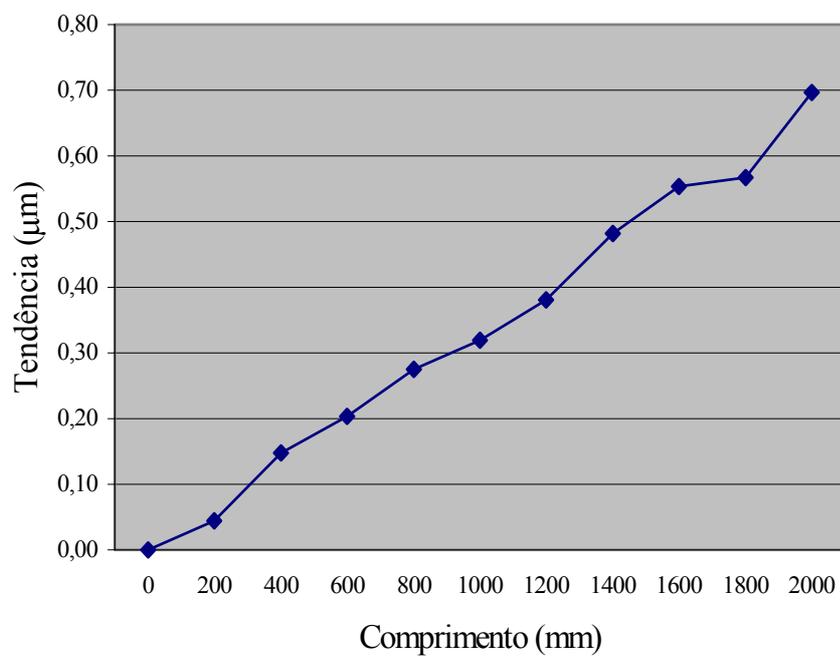


Figura A5.4 - Gráfico da Tendência da Medição 4

## APÊNDICE 6

### Análise Estatística

#### 6.1 – Teste da Diferença das Variâncias

São apresentados as comparações entre as variâncias de todas as medições, calculando-se o  $F$  a cada duas medições, para cada comprimento nominal.

**Tabela A.6.1 – Registro da medição 1**

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	$s_1$
0	0,000	0,000
200	0,082	0,027
400	0,147	0,032
600	0,194	0,011
800	0,236	0,022
1000	0,294	0,034
1200	0,348	0,044
1400	0,419	0,040
1600	0,469	0,068
1800	0,532	0,077
2000	0,603	0,090

**Tabela A.6.2 – Comparação das Variâncias 1 e 2**

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	$s_2$
0	0,000	0,000
200	0,033	0,034
400	0,110	0,022
600	0,187	0,028
800	0,242	0,013
1000	0,267	0,059
1200	0,363	0,015
1400	0,402	0,034
1600	0,486	0,023
1800	0,603	0,053
2000	0,665	0,062

$S_{c(1,2)}$	$F_{\text{cal}}$	$F_{\text{tab}}$
0,000		
0,031	1,647	19,00
0,027	2,043	19,00
0,021	5,872	19,00
0,018	3,058	19,00
0,048	3,031	19,00
0,033	9,398	19,00
0,037	1,388	19,00
0,050	8,786	19,00
0,066	2,064	19,00
0,077	2,096	19,00

**Tabela A.6.3 – Comparação das Variâncias 1, 2 e 3**

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	$S_3$
0	0,000	0,000
200	0,027	0,010
400	0,140	0,031
600	0,192	0,010
800	0,245	0,016
1000	0,316	0,031
1200	0,364	0,021
1400	0,365	0,064
1600	0,514	0,022
1800	0,553	0,084
2000	0,656	0,058

$S_{c_{(1,2)e3}}$	$F_{\text{cal}}$	$F_{\text{tab}}$
0,027	8,743	19,25
0,028	1,273	19,25
0,019	4,807	19,25
0,018	1,263	19,25
0,044	2,393	19,25
0,030	2,374	19,25
0,046	3,034	19,25
0,044	5,114	19,25
0,071	1,601	19,25
0,072	1,785	19,25

**Tabela A.6.4 - Comparação das Variâncias 1, 2, 3 e 4**

Comprimento (mm)	Tendência ( $\mu\text{m}$ )	$S_4$
0	0,000	0,000
200	0,044	0,028
400	0,147	0,018
600	0,203	0,017
800	0,275	0,009
1000	0,319	0,014
1200	0,388	0,021
1400	0,482	0,029
1600	0,553	0,020
1800	0,563	0,098
2000	0,690	0,049

$S_{c_{(1,2,3)e4}}$	$F_{\text{cal}}$	$F_{\text{tab}}$
0,027	1,111	19,37
0,027	2,412	19,37
0,018	1,188	19,37
0,016	4,034	19,37
0,040	9,828	19,37
0,029	1,978	19,37
0,044	2,492	19,37
0,041	4,903	19,37
0,078	1,888	19,37
0,068	2,177	19,37

### 6.3 – Comparação entre as Médias

São apresentados as comparações entre todas as médias como exposto em 5.5.2. Como os graus de liberdade são iguais, para todas as medições, tem-se que o  $t$  da tabela de *student* é 2,92.

**Tabela A.6.5 - Comparação das médias 1 e 2**

L	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 $	$S_{c_{1,2}}$	$\sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}} \times S_{c_{1,2}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_2  - t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}} \times S_{c_{1,2}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_2  + t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}} \times S_{c_{1,2}}$
200	0,049	0,031	0,025	-0,024	0,122
400	0,038	0,027	0,022	-0,027	0,103
600	0,007	0,021	0,017	-0,044	0,057
800	0,005	0,018	0,015	-0,038	0,049
1000	0,027	0,048	0,040	-0,089	0,142
1200	0,015	0,033	0,027	-0,064	0,094
1400	0,017	0,037	0,030	-0,071	0,105
1600	0,017	0,050	0,041	-0,104	0,137
1800	0,070	0,066	0,054	-0,087	0,227
2000	0,062	0,077	0,063	-0,122	0,246

**Tabela A.6.6 - Comparação das médias 1 e 3**

L	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_3 $	$S_{c_{1,3}}$	$\sqrt{\frac{n_1 + n_3}{n_1 * n_3}} \times S_{c_{1,3}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_3  - t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_3}{n_1 * n_3}} \times S_{c_{1,3}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_3  + t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_3}{n_1 * n_3}} \times S_{c_{1,3}}$
200	0,055	0,020	0,116	-0,284	0,395
400	0,008	0,031	0,144	-0,413	0,428
600	0,002	0,011	0,084	-0,243	0,247
800	0,008	0,019	0,114	-0,324	0,341
1000	0,022	0,033	0,148	-0,410	0,453
1200	0,015	0,035	0,153	-0,430	0,461
1400	0,054	0,053	0,189	-0,497	0,606
1600	0,045	0,050	0,183	-0,490	0,580
1800	0,020	0,080	0,231	-0,655	0,695
2000	0,053	0,076	0,224	-0,602	0,709

**Tabela A.6.7 - Comparação das médias 1 e 4**

L	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_4 $	$S_{c_{1,4}}$	$\sqrt{\frac{n_1 + n_4}{n_1 * n_4}} \times S_{c_{1,4}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_4  - t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_4}{n_1 * n_4}} \times S_{c_{1,4}}$	$ \bar{x}_1 - \bar{x}_4  + t \times \sqrt{\frac{n_1 + n_4}{n_1 * n_4}} \times S_{c_{1,4}}$
200	0,038	0,027	0,135	-0,357	0,432
400	0,000	0,026	0,131	-0,383	0,383
600	0,009	0,014	0,098	-0,278	0,296
800	0,038	0,017	0,106	-0,271	0,348
1000	0,025	0,026	0,132	-0,361	0,410
1200	0,039	0,035	0,153	-0,406	0,485
1400	0,063	0,035	0,153	-0,383	0,509
1600	0,084	0,050	0,182	-0,448	0,616
1800	0,031	0,088	0,242	-0,677	0,738
2000	0,088	0,072	0,220	-0,553	0,729

**Tabela A.6.8 - Comparação das médias 2 e 3**

L	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_3 $	$S_{c_{2,3}}$	$\sqrt{\frac{n_2 + n_3}{n_2 * n_3}} \times S_{c_{2,3}}$	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_3  - t \times \sqrt{\frac{n_2 + n_3}{n_2 * n_3}} \times S_{c_{2,3}}$	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_3  + t \times \sqrt{\frac{n_2 + n_3}{n_2 * n_3}} \times S_{c_{2,3}}$
200	0,006	0,025	0,130	-0,354	0,367
400	0,030	0,027	0,134	-0,341	0,401
600	0,005	0,021	0,117	-0,321	0,331
800	0,003	0,015	0,098	-0,270	0,276
1000	0,049	0,047	0,178	-0,445	0,543
1200	0,001	0,018	0,111	-0,306	0,307
1400	0,037	0,051	0,185	-0,476	0,551
1600	0,028	0,023	0,123	-0,312	0,369
1800	0,050	0,070	0,216	-0,550	0,650
2000	0,009	0,060	0,200	-0,546	0,564

**Tabela A.6.9 - Comparação das médias 2 e 4**

L	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_4 $	$S_{c_{2,4}}$	$\sqrt{\frac{n_2 + n_4}{n_2 * n_4}} \times S_{c_{2,4}}$	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_4  - t \times \sqrt{\frac{n_2 + n_4}{n_2 * n_4}} \times S_{c_{2,4}}$	$ \bar{x}_2 - \bar{x}_4  + t \times \sqrt{\frac{n_2 + n_4}{n_2 * n_4}} \times S_{c_{2,4}}$
200	0,012	0,031	0,144	-0,410	0,433
400	0,038	0,020	0,116	-0,301	0,377
600	0,016	0,023	0,124	-0,345	0,377
800	0,033	0,011	0,085	-0,216	0,282
1000	0,052	0,043	0,170	-0,444	0,547
1200	0,024	0,018	0,111	-0,298	0,347
1400	0,080	0,032	0,145	-0,345	0,504
1600	0,067	0,021	0,120	-0,282	0,417
1800	0,039	0,079	0,229	-0,631	0,709
2000	0,026	0,056	0,193	-0,538	0,589

**Tabela A.6.10 - Comparação das médias 3 e 4**

L	$ \bar{x}_3 - \bar{x}_4 $	$S_{c_{3,4}}$	$\sqrt{\frac{n_3 + n_4}{n_3 * n_4}} \times S_{c_{3,4}}$	$ \bar{x}_3 - \bar{x}_4  - t \times \sqrt{\frac{n_3 + n_4}{n_3 * n_4}} \times S_{c_{3,4}}$	$ \bar{x}_3 - \bar{x}_4  + t \times \sqrt{\frac{n_3 + n_4}{n_3 * n_4}} \times S_{c_{3,4}}$
200	0,018	0,021	0,119	-0,328	0,364
400	0,008	0,025	0,130	-0,371	0,387
600	0,011	0,014	0,096	-0,270	0,291
800	0,030	0,013	0,093	-0,241	0,301
1000	0,003	0,024	0,127	-0,369	0,374
1200	0,024	0,021	0,120	-0,326	0,373
1400	0,117	0,050	0,183	-0,416	0,650
1600	0,039	0,021	0,119	-0,308	0,386
1800	0,010	0,091	0,246	-0,709	0,730
2000	0,034	0,054	0,189	-0,517	0,586

## APÊNDICE 7

### Comparação dos Erros dos Sensores do Sistema-Objeto

Neste apêndice é mostrado a relação dos erros de indicação dos sensores de condições ambientais e o sensor de temperatura do material em relação aos seus respectivos padrões de referência. O objetivo desta comparação é avaliar a variabilidade das indicações dos sensores do sistema-objeto em relação aos sensores do laser de referência, podendo-se assim estimar qual é a origem do erro de indicação dos comprimentos nominais. Se houver uma discrepância muito grande entre estas indicações, deve-se então, dependendo da exatidão requerida, calibrar os sensores pelo método convencional, ou seja, separadamente.

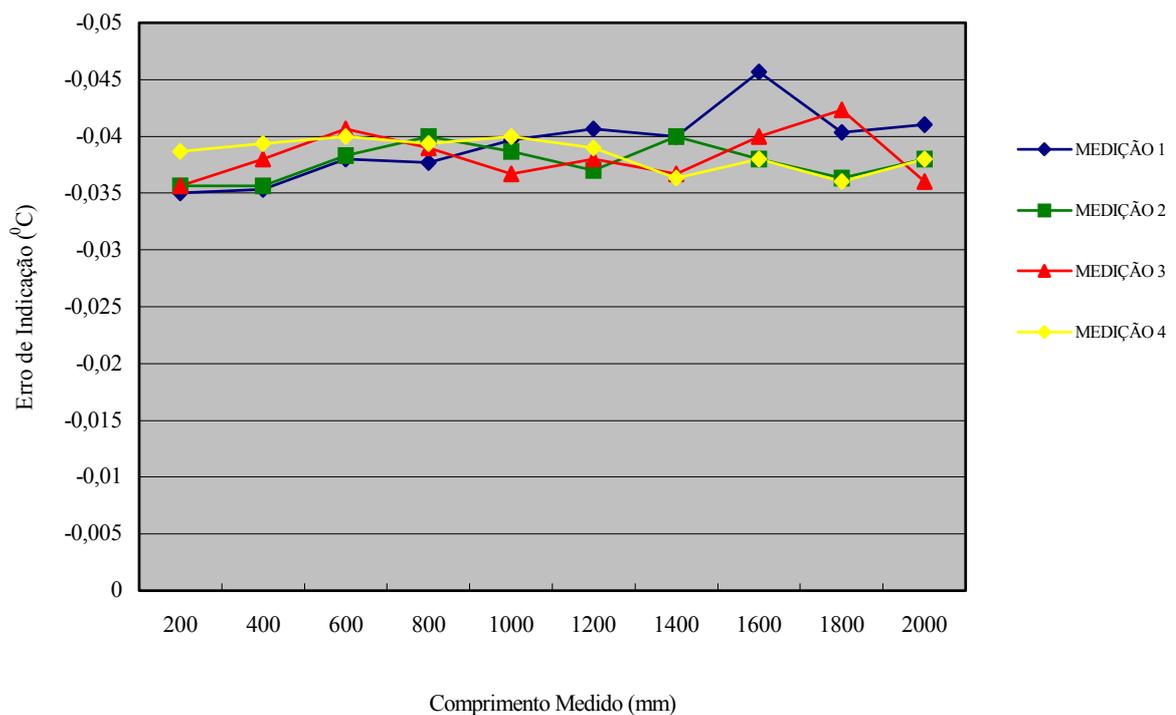


Figura A.7.1 – Gráfico dos erros do sensor de temperatura do material .

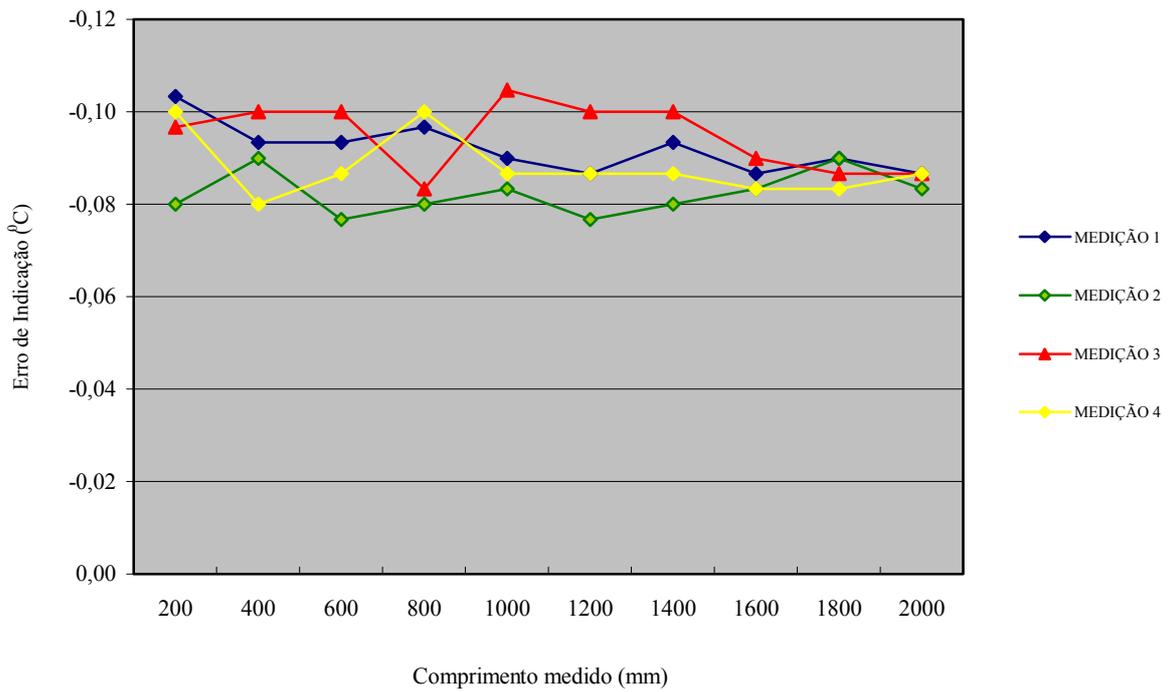


Figura A.7.2 – Gráfico dos erros do sensor de temperatura do ar.

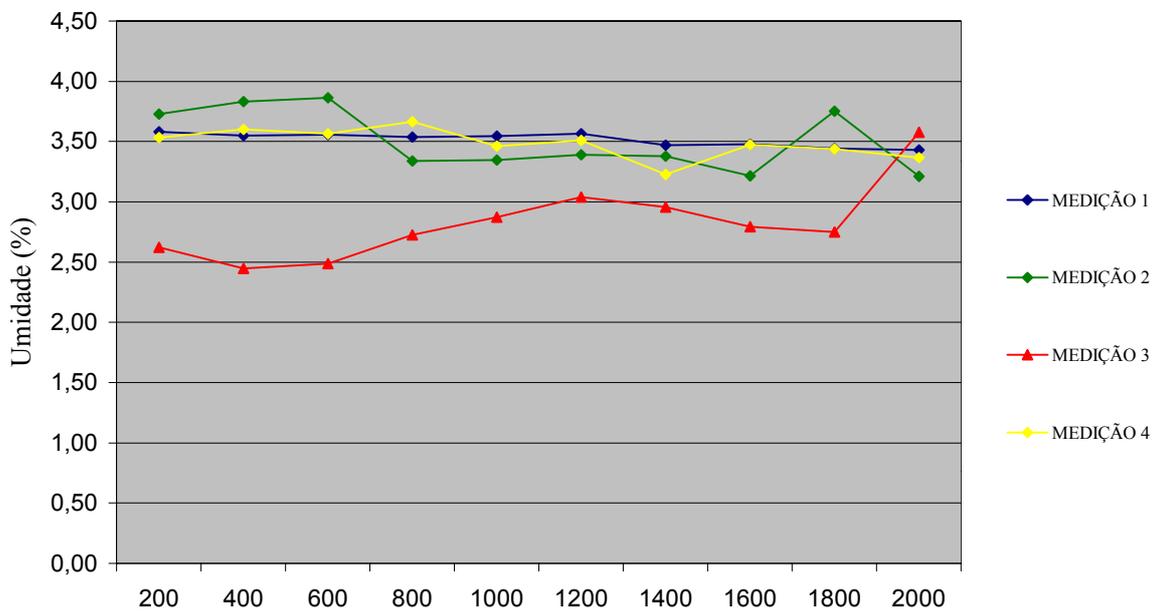


Figura A.7.3 – Gráfico dos erros do sensor de umidade.

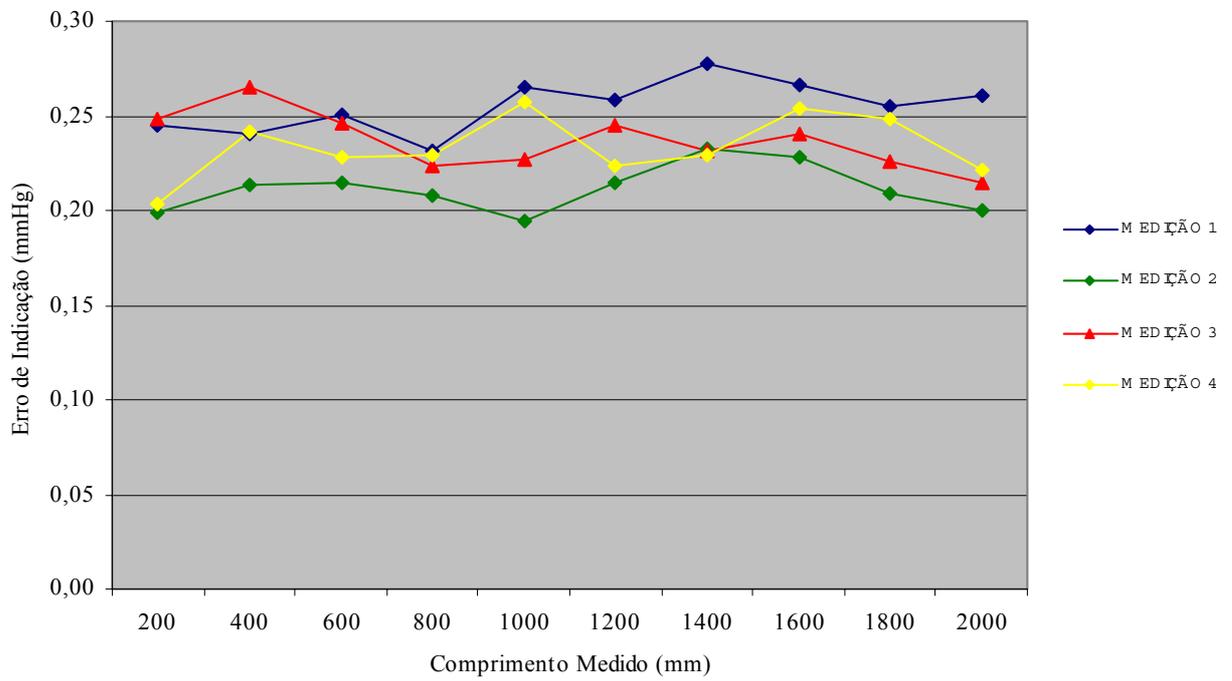


Figura A.7.4 – Gráfico dos erros de indicação do sensor de pressão.

**APÊNDICE**  
**8**  
**PLANILHAS DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO**

**Tabela A.8.1 – Planilha de Incerteza para 200 mm**

Contribuições dependentes do comprimento

<b>Grandezas de Influência</b>	<b>Estimativa</b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Distribuição</b>	<b>Divisor</b>	<b>Incert. Padrão</b> $u(x_i)$ [ $\mu\text{m}$ ]	<b><math>c_i</math></b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Contrib.</b> $u_i(y)$ [ $\mu\text{m}$ ]	<b><math>u_i^2</math></b> [ $\mu\text{m}$ ] <sup>2</sup>	<b><math>\nu_i</math></b>
Repetitividade Lsr objeto	0,022	Normal	1	0,022	1	2,187E-02	4,78E-04	2
Repetitividade Lsr ref	0,022	Normal	1	0,022	1	2,187E-02	4,78E-04	2
Resolução Lsr objeto	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,33E-06	$\infty$
Resolução Lsr ref	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,33E-06	$\infty$
Instabilidade do Lsr objeto	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,33E-04	$\infty$
Instabilidade do Lsr ref	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,33E-04	$\infty$
Alinhamento do Lsr objeto	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,08E-04	$\infty$
Alinhamento do Lsr ref	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,08E-04	$\infty$
Comprimento morto	0,0529	Retangular	1,732	0,031	1	3,054E-02	9,33E-04	$\infty$
						Total =	2,590E-03	

## Contribuições dependentes do comprimento

Grandezas de Influência	Estimativa	Distribuição	Divisor	Incert. Padrão $u(x_i)$	$c_i$	Contrib. $u_i(y)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$u_i^2$ [ $\mu\text{m}$ ] <sup>2</sup>	$\nu_i$
Temperatura do Ar	[°C]			[°C]	[°C <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,1	Normal	2	0,050	1,86E-01	9,296E-03	8,642E-05	$\infty$
Pressão Atmosférica	[Pa]			[Pa]	[Pa <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	8,1	Normal	2	4,025	-5,37E-04	-2,160E-03	4,665E-06	$\infty$
Umidade do Ar	[%]			[%]	[Pa <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,8	Normal	2	0,400	1,67E-03	6,685E-04	4,470E-07	$\infty$
Temperatura do Objeto	[°C]			[°C]	[oC-1x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,007	Normal	2	0,004	-2	-8,050E-03	6,480E-05	$\infty$
Comprimento de onda	[ $\mu\text{m}$ ]			[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]			
	7,0E-09	Normal	2	3,5E-09	1	3,500E-09	1,225E-17	$\infty$
						<b>Total =</b>	<b>1,563E-04</b>	

Incerteza Combinada ( $u_c(y)$ ) =	0,052	[ $\mu\text{m}$ ]
Incerteza Expandida ( $U(y)$ ) =	0,109	[ $\mu\text{m}$ ]
$\nu$ efetivo =	33,0	(t95%) k=
		2,08

Tabela A.8.2 – Planilha de Incerteza para 2000 mm.

Contribuições independentes do comprimento.

Grandezas de Influência	Estimativa [ $\mu\text{m}$ ]	Distribuição	Divisor	Incert. Padrão $u(x_i)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Contrib. $u_i(y)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$u_i^2$ [ $\mu\text{m}$ ] <sup>2</sup>	$v_i$
Repetitividade Lsr objeto	0,052	Normal	1	0,052	1	5,185E-02	2,689E-03	2
Repetitividade Lsr ref	0,052	Normal	1	0,052	1	5,185E-02	2,689E-03	2
Resolução Lsr objeto	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,334E-06	$\infty$
Resolução Lsr ref	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,334E-06	$\infty$
Instabilidade do Lsr objeto	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,333E-04	$\infty$
Instabilidade do Lsr ref	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,333E-04	$\infty$
Alinhamento do Lsr objeto	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,083E-04	$\infty$
Alinhamento do Lsr ref	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,083E-04	$\infty$
Comprimento morto	0,0529	Retangular	1,732	0,031	1	3,054E-02	9,329E-04	$\infty$
						Total =	7,011E-03	

## Contribuições dependentes do comprimento

Grandezas de Influência	Estimativa	Distribuição	Divisor	Incert. Padrão $u(x_i)$	$c_i$	Contrib. $u_i(y)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$u_i^2$ [ $\mu\text{m}$ ] <sup>2</sup>	$v_i$
Temperatura do Ar	[°C]			[°C]	[°C <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,1	Normal	2	0,050	1,86E+00	9,296E-02	8,642E-03	$\infty$
Pressão Atmosférica	[Pa]			[Pa]	[Pa <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	8,1	Normal	2	4,025	-5,37E-03	-2,160E-02	4,665E-04	$\infty$
Umidade do Ar	[%]			[%]	[Pa <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,8	Normal	2	0,400	1,67E-02	6,685E-03	4,470E-05	$\infty$
Temperatura do Objeto	[°C]			[°C]	[°C <sup>-1</sup> x $\mu\text{m}$ ]			
Incerteza do Certificado	0,007	Normal	2	0,004	-23	-8,050E-02	6,480E-03	$\infty$
Comprimento de onda	[ $\mu\text{m}$ ]			[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]			
	7,0E-09	Normal	2	3,5E-09	1	3,500E-09	1,225E-17	$\infty$
<b>Total =</b>							<b>1,563E-02</b>	

Incerteza Combinada ( $u_c(y)$ ) =	0,150	[ $\mu\text{m}$ ]
Incerteza Expandida ( $U(y)$ ) =	0,306	[ $\mu\text{m}$ ]
$V_{\text{efetivo}} =$	70,9	(t95%) k= 2,00