

# **ELECTROTECNIA TEÓRICA**

**MEEC**

**IST**

2º Semestre 2017/18

**5º TRABALHO LABORATORIAL**

## **PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS**

**Linha Bifilar e Linha Coaxial**

**Prof. V. Maló Machado**

**Prof. M. Guerreiro das Neves**

**Prof.<sup>a</sup> M<sup>a</sup> Eduarda Pedro**

## **ELECTROTECNIA TEÓRICA**

### **NOTA INTRODUTÓRIA**

Este trabalho de laboratório, relativo ao estudo de estruturas de parâmetros distribuídos, é composto por duas partes:

**Parte I** – Na primeira parte analisa-se o regime impulsivo (domínio do tempo), medindo-se o tempo de atraso e a velocidade de propagação de impulsos num cabo coaxial.

**Parte II** – Na segunda parte obtém-se, por medida, o diagrama de onda estacionária numa linha bifilar aérea, em curto-circuito, a funcionar em regime forçado alternado sinusoidal de alta frequência.

Nota: Cada parte do trabalho terá a duração de trinta minutos, devendo os grupos circular nas respectivas bancadas. Cada parte tem um dimensionamento próprio.

*O dimensionamento deve ser entregue na aula de laboratório, antes da realização do trabalho, sem o que o mesmo não poderá ser realizado!*

## - Parte I -

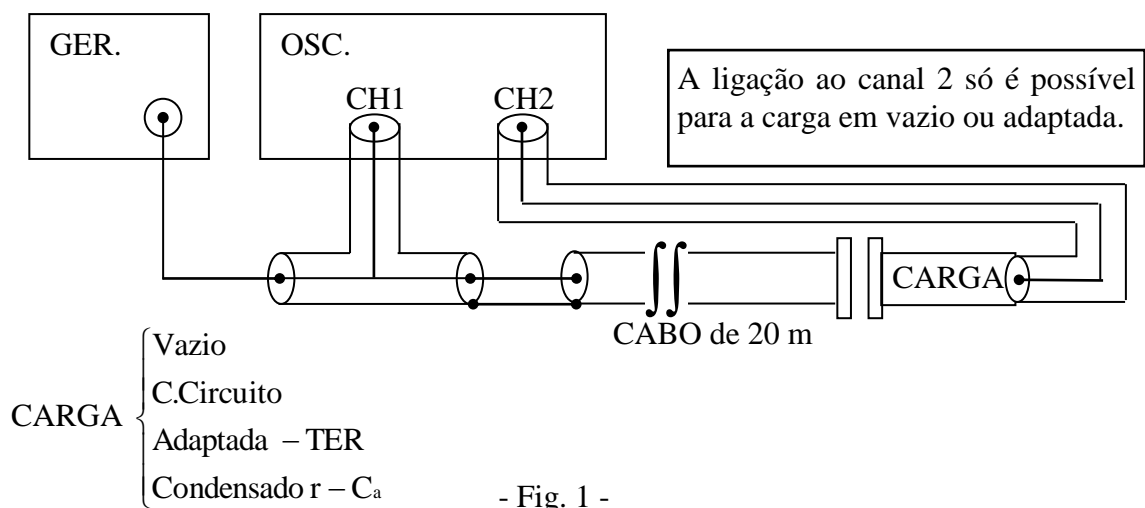
### PROPAGAÇÃO DE IMPULSOS NUM CABO COAXIAL

#### 1. OBJECTIVO

- Medição da velocidade de propagação de impulsos num cabo coaxial.
- Observação da reflexão de impulsos num cabo coaxial terminado em vazio e em curto-circuito. Absorção de impulsos numa carga adaptada.

#### 2. ESQUEMA DE LIGAÇÕES E LISTA DE MATERIAL

##### 2.1 Esquema de ligações



##### 2.2 Lista de Material

- GER – Gerador de funções / Gerador de impulsos (impedância interna  $50 \Omega$ )
- OSC – Osciloscópio Digital, com impressora.
- CABO – Cabo coaxial ( $R_w = 50 \Omega$ ) de 20 m de comprimento.
- TER – Terminação para adaptação de cabo de  $R_w = 50 \Omega$ .
- $C_a$  – Condensador de 10 nF

**Observação:** A Lista de Material acima descrita poderá não ser comum a todas as bancadas. Anote, no seu relatório, a lista de material efectivamente disponível na sua bancada.

### 3. MÉTODO DE MEDIDA

O gerador produz impulsos de tensão, que são visualizados no osciloscópio (CH1). Os impulsos propagam-se ao longo do cabo coaxial, reflectem-se na extremidade do mesmo (carga desadaptada) e propagam-se de volta à entrada onde poderão ser visualizados no osciloscópio. É assim possível determinar a velocidade de propagação  $v$  no cabo através de

$$v = \frac{2\ell}{\Delta t}$$

em que  $\ell$  é o comprimento do cabo e  $\Delta t$  é o atraso temporal entre a emissão do impulso (onda incidente) e a recepção do impulso (onda reflectida), ambos visualizados no osciloscópio (CH1).

### 4. DIMENSIONAMENTO

Considere que o dieléctrico do cabo coaxial tem uma constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r = 2,35$ .

4.1 Determine e registe na tabela **R I 4.1** os valores das seguintes grandezas:

- Velocidade de propagação dos impulsos no cabo coaxial.
- Tempo de propagação  $\Delta t$  correspondente a um percurso de ida e volta  $2\ell = 40$  m.
- O período de repetição de impulsos e a respectiva largura (supondo que o gerador produz periodicamente impulsos) com o seguinte critério:

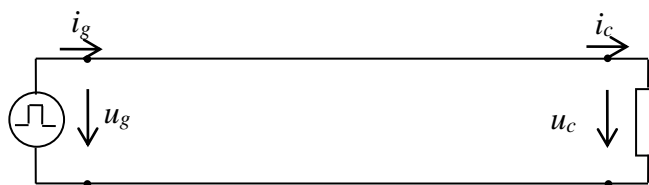
$$T_W - \text{Largura do impulso} = 3\Delta t/20.$$

$$T_R - \text{Período de repetição dos impulsos} = 5\Delta t.$$

4.2 Considere agora o gerador adaptado (resistência de saída igual à resistência característica da linha) com a linha terminada por um condensador de capacidade  $C_a = 10$  nF. Considere ainda que a largura dos impulsos  $T_W$  é bastante maior que o tempo de propagação na linha e bastante maior que a constante de tempo  $\tau$  de carga do condensador, de maneira que, para cada impulso, a tensão do gerador possa ser tratada como um escalão. Obtenha a expressão da tensão no condensador. Determine a constante de tempo de carga do condensador e o valor final da mesma e registe estes valores na tabela **R I 4.2**.

4.3 Mostre por aplicação das leis fundamentais que, sendo a linha sem perdas e sendo  $u_g$ ,  $u_c$ ,  $i_g$  e  $i_c$  (Fig. 2) limitadas no tempo, se verifica:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_g(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} u_c(t)dt$$



- Fig. 2 -

## 5. CONDUÇÃO DO TRABALHO

Selecione o modo de geração de impulsos de 2 V de amplitude, um período de repetição de 1  $\mu$ s e uma largura de impulsos de 30 ns,

OPERATING MODE – PULSE

OUTPUT – RECTANGULAR

FUNCTION – AMPL – 2V

PULSE – PER – 1  $\mu$ s

PULSE – WIDTH – 30 ns

5.1 Mantendo o cabo coaxial **em vazio** registre na tabela **R I 5** os seguintes valores: o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre o instante de saída do impulso incidente e o instante de chegada do eco produzido pela reflexão na carga; o intervalo de tempo  $\Delta t'$  entre o instante de saída do impulso incidente e o instante da sua chegada à carga; os valores máximos das tensões no gerador ( $U_{g_{max}}$ ) e na carga ( $U_{c_{max}}$ ). Obtenha cópia em papel das figuras visualizadas no osciloscópio, referentes às tensões quer à entrada do cabo (CH1) quer no fim do mesmo (CH2).

5.2 Visualize no osciloscópio a forma do impulso reflectido quando o cabo está **em curto-circuito**. Registe na tabela **R I 5** os seguintes valores: o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre o instante de saída do impulso incidente e o instante de chegada do eco produzido pela reflexão na carga; os valores, máximo e mínimo, da tensão no gerador. Obtenha cópia em papel da figura visualizada no osciloscópio, referente à evolução temporal da tensão observada à entrada do cabo (CH1).

5.3 Com o **cabo adaptado** registre na tabela **R I 5** os seguintes valores: o tempo  $\Delta t'$  entre o instante de saída do impulso incidente e o instante da sua chegada à carga; os valores máximos da tensão no gerador e na carga. Obtenha cópia em papel das figuras visualizadas no osciloscópio, referentes às tensões à entrada do cabo e na carga.

5.4 Regule o gerador de modo a ter:

PULSE – PER –  $20\ \mu\text{s}$

PULSE – WIDTH –  $10\ \mu\text{s}$

Com o **cabo terminado pelo condensador  $C_a$**  visualize as tensões à saída do gerador e na carga. Com o auxílio dos cursores de tensão determine as amplitudes, inicial e final, da tensão no gerador ( $u_{gi}$  e  $u_{gf}$ ) e a amplitude final da tensão na carga ( $u_{cf}$ ). Com o auxílio dos cursores de tempo determine a constante de tempo da tensão na carga. Registe estes valores na tabela **R I 5**. Obtenha cópia em papel das figuras visualizadas no osciloscópio, referentes às tensões à entrada do cabo e na carga.

## 6. RESULTADOS

- 6.1 Para cada uma das terminações usadas complete o preenchimento da tabela **R I 6** com os valores teóricos esperados. Comente os resultados obtidos, justificando, em particular, as formas dos impulsos observados no osciloscópio, nos casos das terminações em vazio, curto-circuito e com carga capacitiva. No último caso compare as tensões obtidas experimentalmente com as obtidas no ponto **4.2** do dimensionamento.
- 6.2 Determine a velocidade de propagação dos impulsos no cabo e registe o seu valor na tabela **R I 6**.
- 6.3 Determine a constante dielétrica relativa do material do cabo e registe o seu valor na tabela **R I 6**.

## - Parte II -

### LINHA DE TRANSMISSÃO – ONDAS ESTACIONÁRIAS

#### 1. OBJECTIVO

É objectivo deste trabalho laboratorial o estudo duma linha de transmissão em regime forçado alternado sinusoidal de alta-frequência. Em particular, pretende-se obter o diagrama de onda estacionária duma linha em curto-circuito.

#### 2. ESQUEMA DE LIGAÇÕES E LISTA DE MATERIAL

##### 2.1 Esquema de Ligações (Fig. 1)

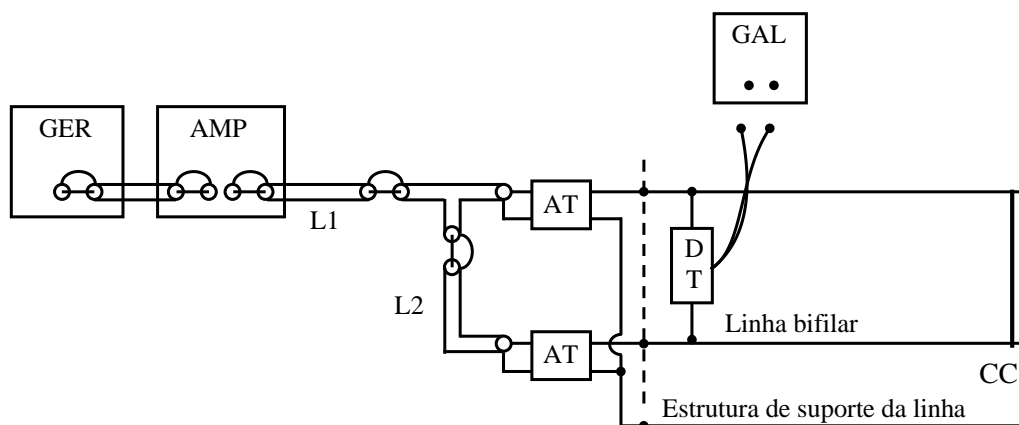


Fig. 1

##### 2.2 Lista de Material

GER - Gerador Sintetizador TTI - Modelo TGR1040 - impedância de saída  $50\Omega$ .  
Frequência de operação a seleccionar:  $f_0 = 185 \text{ MHz}$ .

AMP - Amplificador MINI-CIRCUITS - Modelo ZHL-1-2W - impedância de entrada e de saída  $50\Omega$  (necessita de fonte de alimentação de 24V).

GAL - Galvanómetro Ferrari e caixa de resistências shunt (usar a sensibilidade de  $2 \mu\text{A/div}$ ).

DT - Detector de tensão (sonda móvel).

L<sub>1</sub> - Cabo coaxial (c/ etiqueta azul) de resistência característica  $50\Omega$ , de comprimento igual a  $3\lambda/2$  à frequência  $f_0$ .

- L<sub>2</sub> - Cabo coaxial (c/ etiqueta azul) de resistência característica  $50 \Omega$ , de comprimento igual a  $\lambda/2$  à frequência  $f_0$ .
- CC - Chapa metálica para definição do curto-circuito terminal da linha.
- AT - Atenuador de 6 dB, resistência característica,  $R_{at} = 50 \Omega$ .

**Observação:** A Lista de Material acima descrita poderá não ser comum a todas as bancadas.

### 3. MÉTODO DE MEDIDA

#### 3.1 Alimentação da Linha

A linha utilizada não se encontra isolada no espaço. Está ligada a uma estrutura de ferro, portanto condutora, simetricamente localizada em relação aos condutores da linha bifilar. É assim importante que a alimentação seja feita simetricamente em relação a essa estrutura.

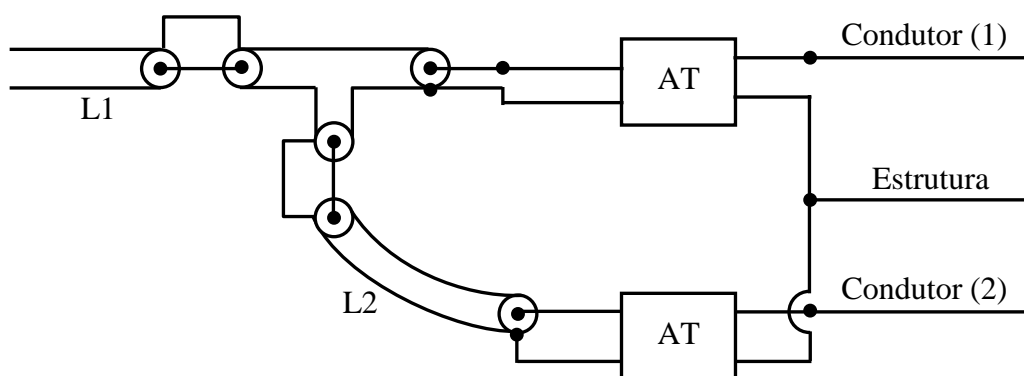


Fig. 2

Como não se dispõe de um gerador com saídas equilibradas, utiliza-se o esquema da Fig. 2. A tensão do gerador é aplicada entre um dos condutores da linha e a estrutura de suporte. Essa mesma tensão, mas desfasada de meio período pelo cabo de meio comprimento de onda (L<sub>2</sub> da Fig. 1), é aplicada entre o outro condutor e a mesma estrutura. Os dois condutores são assim alimentados com tensões simétricas em relação à estrutura. Caso este cuidado não fosse tomado o sistema comportar-se-ia como uma linha de três condutores com tensões diferentes (e desconhecidas) entre dois deles e o terceiro, sendo necessário considerar a sobreposição de dois modos de propagação independentes. A resolução do problema tornar-se-ia mais complexa.



### 3.2 Sonda de Detecção de Tensão

Este dispositivo, quando utilizado com um galvanómetro aos seus terminais, permite avaliar o valor eficaz da tensão entre os condutores da linha, em vários locais ao longo da co-ordenada longitudinal da linha.

A sonda tem a constituição indicada na Fig. 3. Aos terminais do galvanómetro aparece somente a componente contínua da tensão rectificada pelo diódo D. O comportamento quadrático dos detectores, consequente da não-linearidade da característica tensão-corrente do diódo, implicará que se deva proceder à correcção das tensões medidas no galvanómetro.

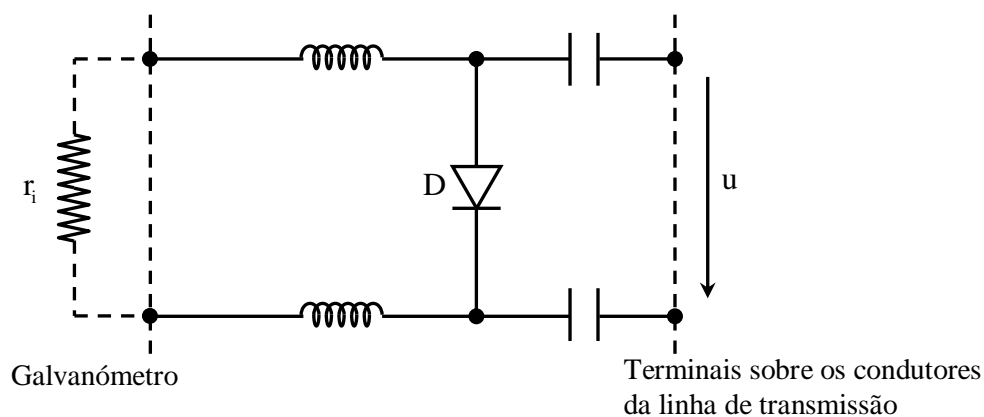


Fig. 3

## 4. DIMENSIONAMENTO

4.1 Considere que o oscilador está a trabalhar à frequência  $f_0$ . Determine o comprimento de onda  $\lambda$  para essa frequência, considerando a velocidade de fase igual a  $c_0$  (velocidade da luz no vazio). Determine também o valor da constante de fase  $\beta$ .

4.2 Sabendo que a linha tem as seguintes dimensões físicas:

$$r = 1,9 \text{ mm (raio dos condutores)}$$

$$d = 4,9 \text{ cm (distância entre os eixos dos condutores)}$$

$$\ell = 1,82 \text{ m (comprimento da linha),}$$

Calcule:

- O coeficiente de auto-indução e a capacidade da linha por unidade de comprimento.
- A resistência característica de onda.

4.3 Considere a linha bifilar (Fig. 4) terminada em curto-circuito.

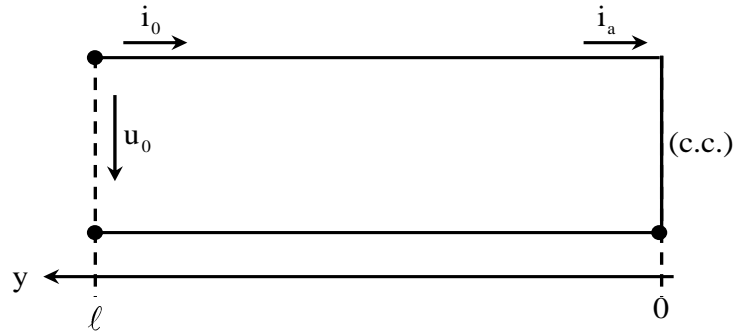


Fig. 4

- Para  $f = f_0$ , construa o diagrama de onda estacionária da tensão normalizando-o ao respectivo valor eficaz máximo. Registre os resultados na tabela **R II 4.3 a)** e faça a representação gráfica na folha quadriculada apresentada em anexo.
- Calcule a impedância de entrada da linha,  $\bar{Z}_0 = \bar{U}_0 / \bar{I}_0$ , para a frequência  $f_0$ .
- Mostre que para  $y = y_1 = \frac{1}{8} \lambda$  a linha apresenta uma impedância puramente indutiva.

Calcule o valor do coeficiente de indução correspondente, bem como o valor eficaz normalizado da tensão,  $U_N(y_1)$ . Na tabela **R II 4.3 c)** registre os valores obtidos para  $y_1$  e  $U_N(y_1)$ .

- Explique por que razão o curto-circuito terminal é efectuado usando uma chapa metálica e não um simples fio ligado entre os dois condutores.

4.4 A Fig. 5 representa o dispositivo utilizado para assegurar que os condutores aéreos (1) e (2), da Fig. 2, são excitados em modo anti-simétrico. A tensão do gerador  $\bar{U}_1$  é aplicada entre o condutor (1) e o condutor de referência (0). À frequência de trabalho, o cabo coaxial que interliga (1) com (2), no lado da alimentação, tem um comprimento  $\ell = \lambda/2$ .

Demonstre que  $\bar{U}_1 = -\bar{U}_2 = \frac{\bar{U}}{2}$ , onde  $\bar{U}$  é a tensão entre os condutores aéreos.

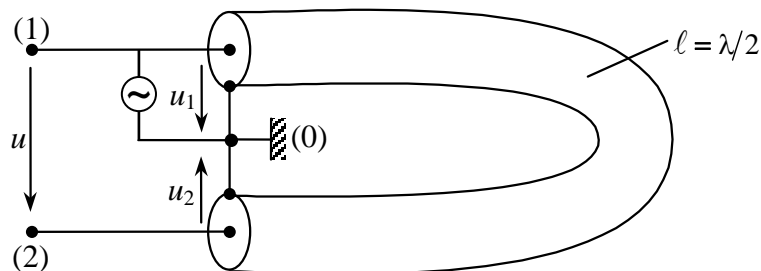


Fig. 5 Cabo com meio comprimento de onda

## 5. CONDUÇÃO DO TRABALHO (Fig. 1)

Selecione para GER a frequência  $f = f_0$  (fixando a respectiva tensão apropriadamente).

- 5.1. Desloque a sonda detectora de tensão e registre a distância à origem a que se verificam os nodos e os ventres da tensão. Registe esses valores na tabela **R II 5.1**.
- 5.2 Registe o andamento da tensão ao longo da linha de transmissão, anotando os valores lidos em GAL e respectivas distâncias ao fim da linha, a intervalos de 5 cm. Registe esses valores na tabela **R II 5.2**.
- 5.3 Determine experimentalmente a que distância do curto-circuito se verifica o valor de tensão normalizado obtido na alínea c) do dimensionamento e registre esse valor na tabela **R II 5.3**.

## 6. RELATÓRIO

- 6.1. Com base nos valores medidos na alínea **5.1**, calcule o comprimento de onda e a partir do seu valor determine ainda a constante de fase e confirme o valor da frequência de operação. Registe os resultados na tabela **R II 6.1**.
- 6.2. Com base no ensaio realizado em **5.2**, calcule e registre na tabela **R II 6.2** os valores da tensão normalizados ( $U_N$ ), corrigindo os resultados tendo em conta a característica quadrática do detector

$$U_N(y) = \sqrt{\frac{U(y)}{U_{\max}}}$$

Faça a representação normalizada do andamento da tensão ao longo da linha  $U_N(y)$  na folha quadriculada apresentada em anexo. Compare a curva experimental obtida (corrigida) com a curva do diagrama de onda estacionária de tensão determinada no dimensionamento.

- 6.3. Com base no ensaio realizado em **5.3** compare o valor da distância  $y_1$  obtido experimentalmente com o valor teórico.
- 6.4. Comente os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

J. A. Brandão Faria, '*Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*', Wiley, 2008. Cap. 9.

IST, Fevereiro 2018

**ANEXO**  
**RELATÓRIO DO 5º TRABALHO LABORATORIAL**  
**Parte I**

**R I 4.1:**

**Valores calculados em 4.1.**

$v$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	$\Delta t$ [ $\mu\text{s}$ ]	$T_R$ [ $\mu\text{s}$ ]	$T_W$ [ns]

**R I 4.2, R I 5 e R I 6:**

**Valores calculados em 4.2, valores medidos em 5 e determinados em 6.**

Carga		Valores Experimentais	Valores Teóricos	$v$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	$\epsilon_r$
<b>Vazio</b>	$U_{g_{max}}$ [V]				
	$U_{c_{max}}$ [V]				
	$\Delta t$ [ns]				
	$\Delta t'$ [ns]				
<b>Curto-Circuito</b>	$U_{g_{max}}$ [V]				
	$U_{g_{min}}$ [V]				
	$\Delta t$ [ns]				
<b>Adaptada</b>	$U_{g_{max}}$ [V]				
	$U_{c_{max}}$ [V]				
	$\Delta t'$ [ns]				
<b>Condensador</b>	$u_{g_i}$ [V]				
	$u_{g_f}$ [V]				
	$u_{c_f}$ [V]				
	$\tau$ [ns]				

**Comentários:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Parte II

**R II 5.1 e R II 6.1:**

**Valores medidos em 5.1.**

	$d$ [cm]		
Nodos			
Ventres			

**Valores calculados em 6.1.**

$\lambda$ [m]	$\beta$ [rad m <sup>-1</sup> ]	$f$ [Hz]

**R II 4.3 a), R II 5.2 e R II 6.2:**

**Valores medidos em 5.2,  $U(y)$ ; calculados em 6.2,  $U_{N_{exp}}$ ; calculados em 4.3 a),  $U_{N_{teo}}$**

$y$ [cm]	$U(y)$	$U_{N_{exp}}$	$U_{N_{teo}}$
<b>0</b>			
<b>5</b>			
<b>10</b>			
<b>15</b>			
<b>20</b>			
<b>25</b>			
<b>30</b>			
<b>35</b>			
<b>40</b>			
<b>45</b>			
<b>50</b>			
<b>55</b>			
<b>60</b>			
<b>65</b>			
<b>70</b>			

$y$ [cm]	$U(y)$	$U_{N_{exp}}$	$U_{N_{teo}}$
<b>75</b>			
<b>80</b>			
<b>85</b>			
<b>90</b>			
<b>95</b>			
<b>100</b>			
<b>105</b>			
<b>110</b>			
<b>115</b>			
<b>120</b>			
<b>125</b>			
<b>130</b>			
<b>135</b>			
<b>140</b>			
<b>145</b>			

**R II 4.3 c) e R II 5.3:****Valores  $U_N(y_1=\lambda/8)$  e  $y_{1\text{teo}}$  calculados em 4.3 c) e valor  $y_{1\text{exp}}$  medido em 5.3**

	$y_{1\text{teo}}$ [m]	$y_{1\text{exp}}$ [m]
$U_N(y_1=\lambda/8) =$		

**Comentários:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Número	Nome	Auto-Aval. [%]

**R II 4.3 a) e R II 6.2:**

**Diagrama da onda estacionária de tensão, normalizada:**

