

# Aplicações Práticas Simuladas do Ensaio de Correntes Parasitas

ROCarneval 2021

# Aplicações Práticas Simuladas do Ensaio de Correntes Parasitas

- Ensaaios com Sondas Superficiais (TEDDY 1.2)
  - CP-N1-S
  - CP-N2-S
  - CP-N2-TI

# Ensaaios com Sondas Superficiais

- Programa de Simulação TEDDY 1.2
  - Medição de Condutividade
  - Medição de Espessura
    - Da Peça
    - Do Revestimento
  - Separação da Influência de Variáveis

# TEDDY 1.2

- Pegar programa em:  
<https://www.dropbox.com/s/28b2fjlpeay4kzn/Teddy.zip?dl=0>
- Descompactar arquivo no diretório TEDDY
  - Diretório
    - Teddy
      - TEDDY V1.8 (Portugues).pdf
      - Teddy.exe
      - Teddy.pdf
- Ler completa e detalhadamente o manual
  - TEDDY V1.8 (Portugues).pdf
- Executar o programa Teddy.exe

# TEDDY V1.2

Dr. Theodoros P. Theodoulidis  
Departamento de Engenharia e Gerenciamento de Recursos Naturais  
Universidade da Macedonia Oeste  
Kastorias & Fleming  
50100 Kozani  
Greece

Email: [theodoul@ieee.org](mailto:theodoul@ieee.org)

TEDDY 1.2  
Página 1

## INTRODUÇÃO

O aplicativo TEDDY V1.2 foi projetado para simular alguns tipos de ensaio por correntes parasitas pela simulação da impedância elétrica de uma bobina (sonda superficial) sobre estruturas planas (chapas e placas) com camada de revestimento ou internamente e externamente a estruturas cilíndricas (tubos) e esféricas (sondas internas e envoltentes) com camada de revestimento. É permitido o uso desse "software" a comunidade de forma gratuita sob a condição que seu uso para a publicação de resultados seja referenciado. Por favor, enviar comentários e sugestões para [theodoul@ieee.org](mailto:theodoul@ieee.org).

# TEDDY 1.2

## Página 2

## COMO FUNCIONA O APLICATIVO TEDDY?

O usuário introduz os parâmetros da geometria sob estudo. Os parâmetros fixos necessitam apenas do valor inicial ("From"). O parâmetro a obter a curva no gráfico (variável) precisa introduzir o valor inicial ("From"), o valor final ("To") e o passo ("Step") de variação. O traçado da curva é obtida pelo acionamento do botão "Compute". O plano de impedância pode ser visualizado pela seleção do plano de impedância ("Impedance Plane") nas abas a direita do aplicativo, parte gráfica do "software".

## INTRODUÇÃO DOS PARÂMETROS

- Enquanto o parâmetro escolhido como variável para o traçado da curva de variação tem seus valores escolhidos entre o início ("From") e fim ("To"), os demais parâmetros (não variáveis) da ENTRADA DE DADOS DO ENSAIO ("TEST INPUT") assumirão apenas o valor escrito em De ("From").
- O parâmetro variável deve ter a faixa de variação crescente e o passo de variação ("Step" deve ser positivo. Se esse passo for zero ("Step"=0) ao invés de uma curva apenas um ponto no plano de impedância é traçado.
- Poucas verificações quanto a validade dos parâmetros introduzidos são executadas pelo aplicativo. Por exemplo, se o passo ("Step") é negativo ou se o valor de ("From" é menor que o valor para ("To"). Em ambos os casos, os cálculos não são executados.
- Nenhuma verificação é feita quanto a consistência física dos dados de entrada, atento quanto a validade dos parâmetros introduzidos. Por exemplo, TEDDY não verifica no caso de sonda envolvente (OD, bobina externa a um cilindro) se o raio interno da bobina é maior que o raio do cilindro. Erros na entrada de dados podem causar resultados inconsistentes no plano de impedâncias.
- O ponto (".") é empregado como separador decimal. Se você receber a mensagem de erro "Invalid Floating Point Values" e os numeros estão corretos é porque o ponto decimal está ajustado para vírgula (",") no WINDOWS. Modifique os ajustes regionais "Regional Settings" no painel de controle do WINDOWS.

## COMPUTAÇÃO (CÁLCULOS)

- O plano de impedâncias retrata apenas a resistência ôhmica normalizada "versus" a reatância indutiva normalizada. Essa é a forma aceitável de apresentar dados do ensaio não destrutivo por correntes paraístas. O fator de normalização é a reatância indutiva da bobina no espaço livre (ar). Esse valor é também calculado e apresentado no formulário junto com a indutância da bobina.
- Se as curvas apresentam picos inesperados isso significa que uma precisão computacional melhor é necessária. Mudar de 0.1% para 0.01% deve ser adequado. Trace a curva e apague a curva antiga na opção do menu.

- Se a curva não estiver suficientemente suave você deve diminuir o valor do passo ou dividir a faixa escolhida em várias faixas menores.

- Existe uma barra de progresso, que é útil especialmente para o caso de geometrias 3-D onde o tempo de computação é muito grande devido ao grande número de pontos envolvidos nos cálculos.

Especial cuidado deve ser tomado nas computações matemáticas, que envolvem calculus de integrais infinitas, funções de Bessel e suas integrais, e funções de Legendre. Os seguintes pacotes publicos disponíveis foram empregados por causa da grande velocidade de computação e dos algoritmos mais universais utilizados:

**QUADPACK:** Computação automatic de integrais infinitas (sem a necessidade de citar os limites de truncamento)

**AMOSPACK:** Computação das funções de Bessel e de suas integrais (com precisão de máquina).

## VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

- Você pode modificar os limites dos eixos do plano de impedâncias de forma a vizualizar melhor uma area nele. Há duas formas de fazer isso. A primeira é selecionar os limites dos eixos ("Axes Limits") na opção de edição ("Edit") do Menu. A segunda é clicar e arrastar ("click and drag") um retângulo no plano de impedâncias. Para remover o aumento da tela ("zoom-out") só existe a opção do menu.

- A cor de cada curva denota o parâmetro que teve faixa de variação. Tome cuidado para não se confundir pelas várias cores traçadas quando retratando resultados de várias geometrias no mesmo plano de impedância.

- Novamente, retratar resultados de várias geometrias no mesmo plano de impedância pode causar confusão, dependendo das localizações dos traçados anteriores. Esteja certo de checar esse Manual na parte do menu de Edição – Limites dos Eixos ("Edit – Axes Limits") para incluir todos os resultados na sua area de visão e então amplie ("zoom") ou seleccione os limites de eixo desejados.

- Você deve sempre iniciar uma nova sessão e limpar o plano de impedâncias pela seleção de Arquivo ("File") e Novo ("New") no menu. Mas, se você deseja apenas uma curva então voce deve selecionar Edição ("Edit") e Apagar Curvas ("Delete Curves") no menu. Dessa forma você habilita o modo de apagar ("delete") e pode apagar uma curva especifica clicando nela. Arquivar os resultados ("SAVE THE RESULTS")? Não. Você pode apenas arquivar ("save") o plano de impedância como uma imagem (arquivo \*.EMF = Enhanced MetaFile). Então você pode importer esse arquivo de imagem no seu processador de texto. Preste atenção para primeiro retirar o modo de ampliação do plano ("Zoom Out").

## PORTABILIDADE

• TEDDY pode ser executados nos sistemas Windows 98, ME, 2000 and XP.

(N.T. Embora não citado o "software" tem sido usado sem problemas no Windows 10)

# TEDDY 1.2

## Página 5

## DESCRIÇÃO DO MENU

### [File]

[New] – Limpa o plano de impedâncias.

[Save As...] - Envia o plano de impedâncias para um arquivo de imagem .EMF que pode ser importado posteriormente em um processador de textos.

[Exit...] – Fecha o programa.

### [Edit]

[Axes Limits...] – Ajusta os limites e os incrementos dos eixos horizontal e vertical do plano de impedância.

[Zoom Out] – Diminui a vista ampliada do plano de impedâncias. A ampliação ("Zoom-in") pode ser conseguida pelo clique e arraste ("clicking and dragging") do mouse no plano de impedâncias.

[Delete Curves] – Entra e sai do modo de apagar. Se está marcado ("checked") o usuário pode deletar uma curva no plano de impedâncias pela sua seleção, clicando nela.

### [2D-Geometry]

#### [Planar]

[1 layer] – Bobina circular coil sobre 1 camada de semi espaço.

[2 layers] – Bobina circular sobre 2 camadas de semi espaço. Pelo ajuste de CON2=0 o usuário pode simular uma camada condutora.

#### [Cylindrical ID]

[1 layer] – Bobina circular sobre uma camada de semi espaço.

[2 layers] – Bobina circular sobre 2 camadas de semi espaço. Ajustando CON2=0 o usuário pode simular uma camada condutora.

#### [Cylindrical OD]

[1 layer] – Bobina circular sobre 1 camada de semi espaço.

[2 layers] – Bobina circular sobre 2 camadas de semi espaço. Pelo ajuste de CON2=0 o usuário pode simular uma camada condutora.

#### [Spherical] (Disabled)

### [3D-Geometry]

#### [Planar]

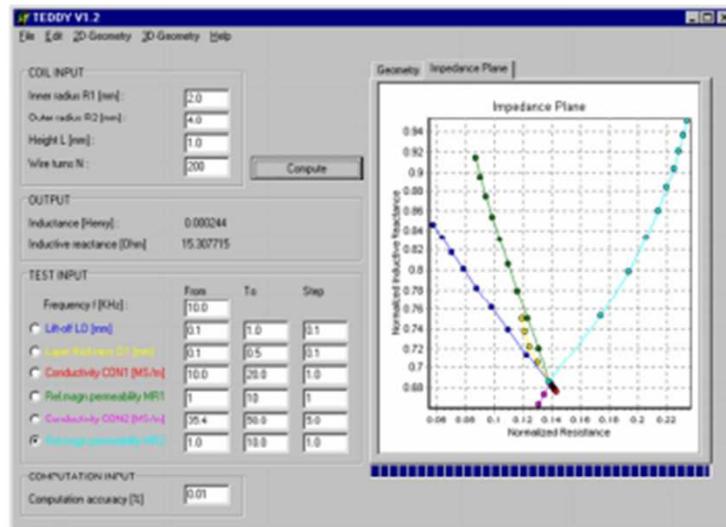
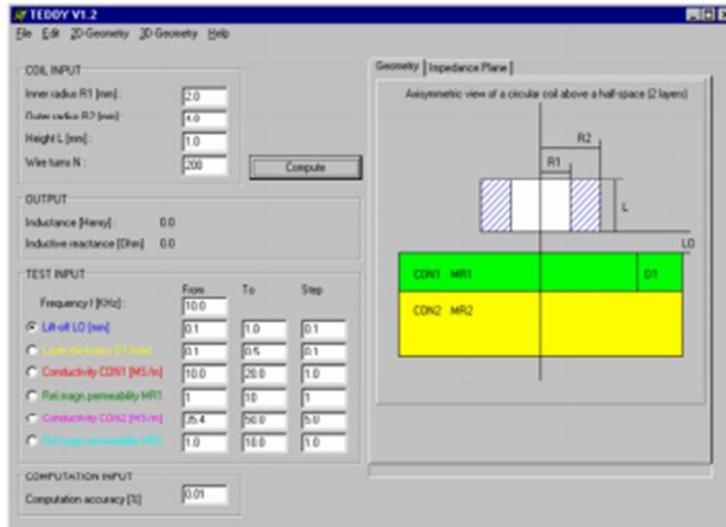
[1 layer] – Bobina circular perpendicular a 1 camada de semi espaço.

[2 layers] - (Disabled)  
[Cylindrical ID] - (Disabled)  
[Cylindrical OD] - (Disabled)  
[Spherical] - (Disabled)  
[Help]  
[About]

# TEDDY 1.2

## Página 7

## EXEMPLOS DE TELAS COPIADAS



## REFERÊNCIAS

Resultados dos seguintes trabalhos publicados foram usados no TEDDY V1.2:

- [1] Cheng C.C., Dodd C.V. and Deeds W.E., "General analysis of probe coils near stratified conductors", *International Journal of Nondestructive Testing*, Vol.3, pp.109-130.
- [2] Dodd C.V., Cheng C.C. and Deeds W.E., "Induction coils with an arbitrary number of cylindrical conductors", *Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.2, pp.638-647.
- [3] Burke S.K., "Impedance of a coil above a conducting half-space", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.19, pp.1159-1173.
- [4] Theodoulidis T.P., Kotouzas M.K., "Eddy current testing simulation on a personal computer", *Roma 2000 NDT World Conference*.
- [5] Theodoulidis T.P., Kriezis E.E., "Coil impedance due to a sphere of arbitrary radial conductivity and permeability profiles", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.38, No.3, pp.1452-1460, 2002.
- [6] Theodoulidis T.P., Kriezis E.E., "Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media", *NDT & E International*, Vol.35, pp.407- 414, 2002.
- [7] Theodoulidis T.P., "Analytical modeling of wobble in eddy current tube testing with bobbin coils", *Research in NDE*, Vol.14, pp.111-126, 2002.
- [8] Theodoulidis T.P., "Model of ferrite-cored probes for eddy current nondestructive evaluation", *Journal of Applied Physics*, Vol.93, No.5, pp.3071-3078, 2003.
- [9] Burke S.K., Theodoulidis T.P., "Impedance of a horizontal coil in a borehole: a model for eddy-current bolthole probes", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.37, No.3, pp.485-494, 2004.

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

Planar > 1 Layer  
Cylindrical ID > 2 Layers  
Cylindrical OD >  
Spherical >

COIL INPUT  
Inner radius  
Outer radius  
Height L [mm]: 1.0  
Wire turns N: 200

Compute

OUTPUT  
Inductance [Henry]: 0.0  
Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	100.0		
<input checked="" type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0.1	1.0	0.1
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	1.0	10.0	1.0
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1	10	1

COMPUTATION INPUT  
Computation accuracy [%]: 0.01

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil above a half-space (1 layer)

The diagram shows an axisymmetric view of a circular coil positioned above a half-space. The coil is represented by two concentric cylinders with radii R1 and R2, and a height L. The half-space below the coil is shaded green and labeled CON1 MR1. The lift-off distance LO is indicated as the vertical distance between the bottom of the coil and the top of the half-space.

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

- Planar > 1 Layer
- Cylindrical ID > **2 Layers**
- Cylindrical OD >
- Spherical >

COIL INPUT

Inner radius:

Outer radius:

Height L [mm]:

Wire turns N:

OUTPUT

Inductance [Henry]: 0.0

Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	<input type="text" value="10.0"/>		
<input checked="" type="radio"/> Lift-off LO [mm]	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Layer thickness D1 [mm]	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	<input type="text" value="10.0"/>	<input type="text" value="20.0"/>	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	<input type="text" value="35.4"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="10.0"/>	<input type="text" value="1.0"/>

COMPUTATION INPUT

Computation accuracy [%]:

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil above a half-space (2 layers)

CON1 MR1 D1

CON2 MR2

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

The screenshot displays the TEDDY V1.2 software interface. The main window title is "TEDDY V1.2". The menu bar includes "File", "Edit", "2D-Geometry", "3D-Geometry", and "Help". The "2D-Geometry" menu is open, showing options: "Planar", "Cylindrical ID", "Cylindrical OD", and "Spherical". The "Cylindrical ID" option is selected, and a sub-menu is open showing "1 Layer" and "2 Layers".

The "COIL INPUT" section contains the following fields:

- Inner radius: [ ]
- Outer radius: [ ]
- Height L [mm]: [ 1.0 ]
- Wire turns N: [ 200 ]

A "Compute" button is located below the input fields.

The "OUTPUT" section shows:

- Inductance [Henry]: 0.0
- Inductive reactance [Ohm]: 0.0

The "TEST INPUT" section has a table with columns "From", "To", and "Step":

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	[ 10.0 ]		
<input checked="" type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	[ 10.0 ]	[ 11.0 ]	[ 0.1 ]
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	[ 10.0 ]	[ 20.0 ]	[ 1.0 ]
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	[ 1 ]	[ 10 ]	[ 1 ]

The "COMPUTATION INPUT" section has a field for "Computation accuracy [%]" with the value [ 0.01 ].

The right side of the interface shows a diagram titled "Axisymmetric view of a circular coil inside a cylinder (1 layer)". The diagram illustrates a cross-section of a cylinder with a coil inside. The cylinder's outer radius is labeled R2, and the coil's radius is labeled B1. The coil's height is labeled L. The coil is shown as a blue hatched area. The cylinder is shown as a white area. The diagram is labeled "CON1" and "MR1".

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

▲ TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

Planar >  
 Cylindrical ID > 1 Layer  
 Cylindrical OD > 2 Layers  
 Spherical >

COIL INPUT  
 Inner radius:  1.0  
 Outer radius:  200  
 Height L [mm]:  1.0  
 Wire turns N:  200

OUTPUT  
 Inductance [Henry]: 0.0  
 Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	<input type="text"/> 10.0		
<input checked="" type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	<input type="text"/> 10.0	<input type="text"/> 11.0	<input type="text"/> 0.2
<input type="radio"/> Layer radius B2 [mm]	<input type="text"/> 12.0	<input type="text"/> 14.0	<input type="text"/> 0.5
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	<input type="text"/> 10	<input type="text"/> 20	<input type="text"/> 5
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	<input type="text"/> 1	<input type="text"/> 100	<input type="text"/> 10
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	<input type="text"/> 35.4	<input type="text"/> 50.0	<input type="text"/> 5.0
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	<input type="text"/> 1.0	<input type="text"/> 10.0	<input type="text"/> 1.0

COMPUTATION INPUT  
 Computation accuracy [%]:  0.01

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil inside a cylinder (2 layers)

The diagram illustrates the geometry of a circular coil inside a cylinder with two layers. The coil is represented by two vertical bars, one yellow (CON2 MR2) and one green (CON1 MR1). The cylinder is shown as a cross-section with radii R1 and R2, and length L. The layers are labeled B1 and B2.

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

COIL INPUT

Inner radius: Cylindrical ID > Cylindrical OD > 1 Layer

Outer radius: Spherical > 2 Layers

Height L [mm]: 1.0

Wire turns N: 200

Compute

OUTPUT

Inductance [Henry]: 0.0

Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	100.0		
<input checked="" type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	9	9.8	0.1
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	1.0	2.0	0.1
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1	50	5

COMPUTATION INPUT

Computation accuracy [%]: 0.01

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil outside a cylinder (1 layer)

CON1  
MR1

B1

R1

R2

L

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

▲ TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

Planar >  
 Cylindrical ID >  
 Cylindrical OD > 1 Layer  
 Spherical > 2 Layers

COIL INPUT  
 Inner radius:    
 Outer radius:    
 Height L [mm]:    
 Wire turns N:

OUTPUT  
 Inductance [Henry]: 0.0  
 Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	<input type="text" value="100.0"/>		
<input checked="" type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="10.5"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Layer radius B2 [mm]	<input type="text" value="9"/>	<input type="text" value="9.5"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	<input type="text" value="35.4"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="10.0"/>	<input type="text" value="1.0"/>

COMPUTATION INPUT  
 Computation accuracy [%]:

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil outside a cylinder (2 layers)

# TEDDY 1.2

## Opções Geométricas

TEDDY V1.2

File Edit **2D-Geometry** 3D-Geometry Help

Planar >  
Cylindrical ID >  
**Cylindrical OD >**  
Spherical >

Inner radius:   
Outer radius:   
Height L [mm]:   
Wire turns N:

1 Layer  
2 Layers

OUTPUT

Inductance [Henry]: 0.0  
Inductive reactance [Ohm]: 0.0

TEST INPUT

	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	<input type="text" value="100.0"/>		
<input checked="" type="radio"/> Layer radius B1 [mm]	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="10.5"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Layer radius B2 [mm]	<input type="text" value="9"/>	<input type="text" value="9.5"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	<input type="text" value="35.4"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="10.0"/>	<input type="text" value="1.0"/>

COMPUTATION INPUT

Computation accuracy [%]:

Geometry | Impedance Plane

Axisymmetric view of a circular coil outside a cylinder (2 layers)

CON1 MR1  
CON2 MR2  
B1  
B2  
R1  
R2  
L

# TEDDY 1.2 - Condutividade

Material	Condutividade (IACS)	Condutividade (MS/m)
Alumínio	61	35,38
Cobre	100	58
Grafite	0,22	0,1276
Molibdênio	33	19,14
Monel	3,60	2,08
Chumbo	8,4	4,87
Cobalto	27,6	16,01
Ouro	70	40,60
Prata	108,4	60,90
Tungstênio	31,4	18,21
Zinco	28,0	16,24

# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Na aula prática de correntes parasitas é básico o traçado da curva de condutividade. Usando como exemplo o padrão da prática (figura) e o programa TEDDY 1.2 contruir o “locus” de condutividade para as seguintes condições de ensaio:
  - Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
    - Raio interno 8 mm, Raio externo 10 mm, Altura 5 mm, Número de voltas 300
  - Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
  - Considerar uma aproximação da sonda de 10 mm de afastamento até a sonda encostar na superfície das amostras com passos de 1 mm

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Amostra de materiais com diferentes condutividades e permeabilidades



Material	Condutividade MS/m (IACS%)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670 / 2,88	750
AÇO	9,21 / 15,88	100
AUSTENITA	1,324 / 2,28	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591 / 4,47	1
BRONZE	6,33 / 10,91	1
LATÃO	13,82 / 23,83	1
ALUMÍNIO	35,38 / 61,00	1
COBRE	57,58 / 99,28	1



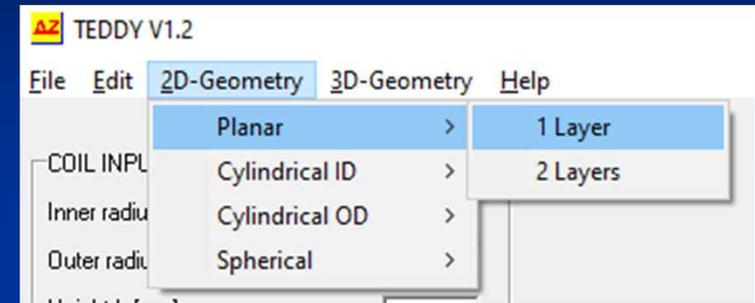
# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

### ■ Frequência de 10 kHz

- Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
  - Raio interno 8 mm, Raio externo 10 mm, Altura 5 mm, Número de voltas 300
- Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
- Considerar uma aproximação da sonda de 10 mm de afastamento até a sonda encostar na superfície da amostra com passos de 1 mm

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
<b>AÇO 1.4104</b>	<b>1,670</b>	<b>750</b>
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1



**COIL INPUT**

Inner radius R1 [mm]:

Outer radius R2 [mm]:

Height L [mm]:

Wire turns N:

---

**OUTPUT**

Inductance [Henry]: 0.001893

Inductive reactance [Ohm]: 118.938043

---

**TEST INPUT**

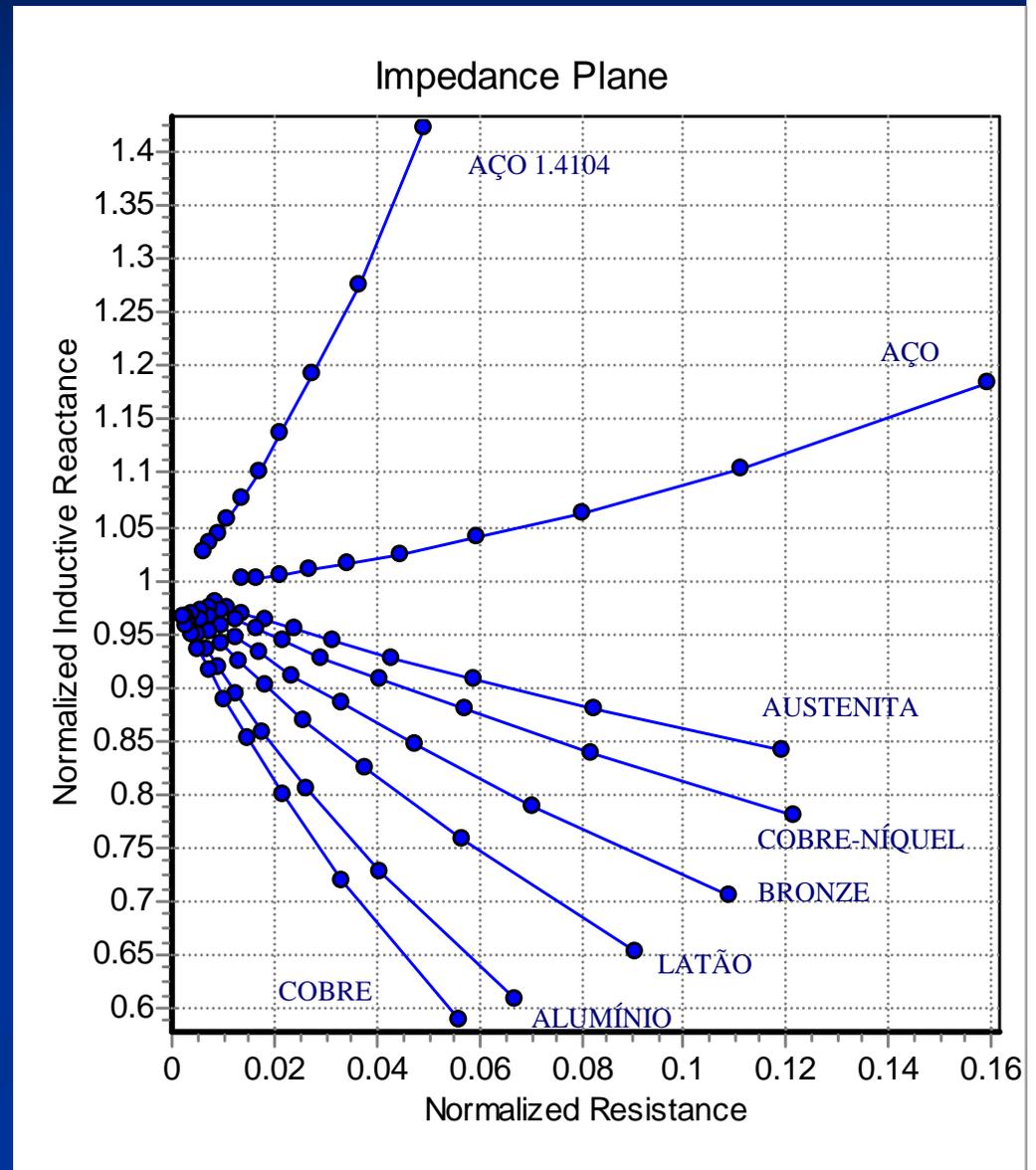
	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	<input type="text" value="10"/>		
<input checked="" type="radio"/> Lift-off LO [mm]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	<input type="text" value="1,670"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	<input type="text" value="750"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Frequência de 10 kHz

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1



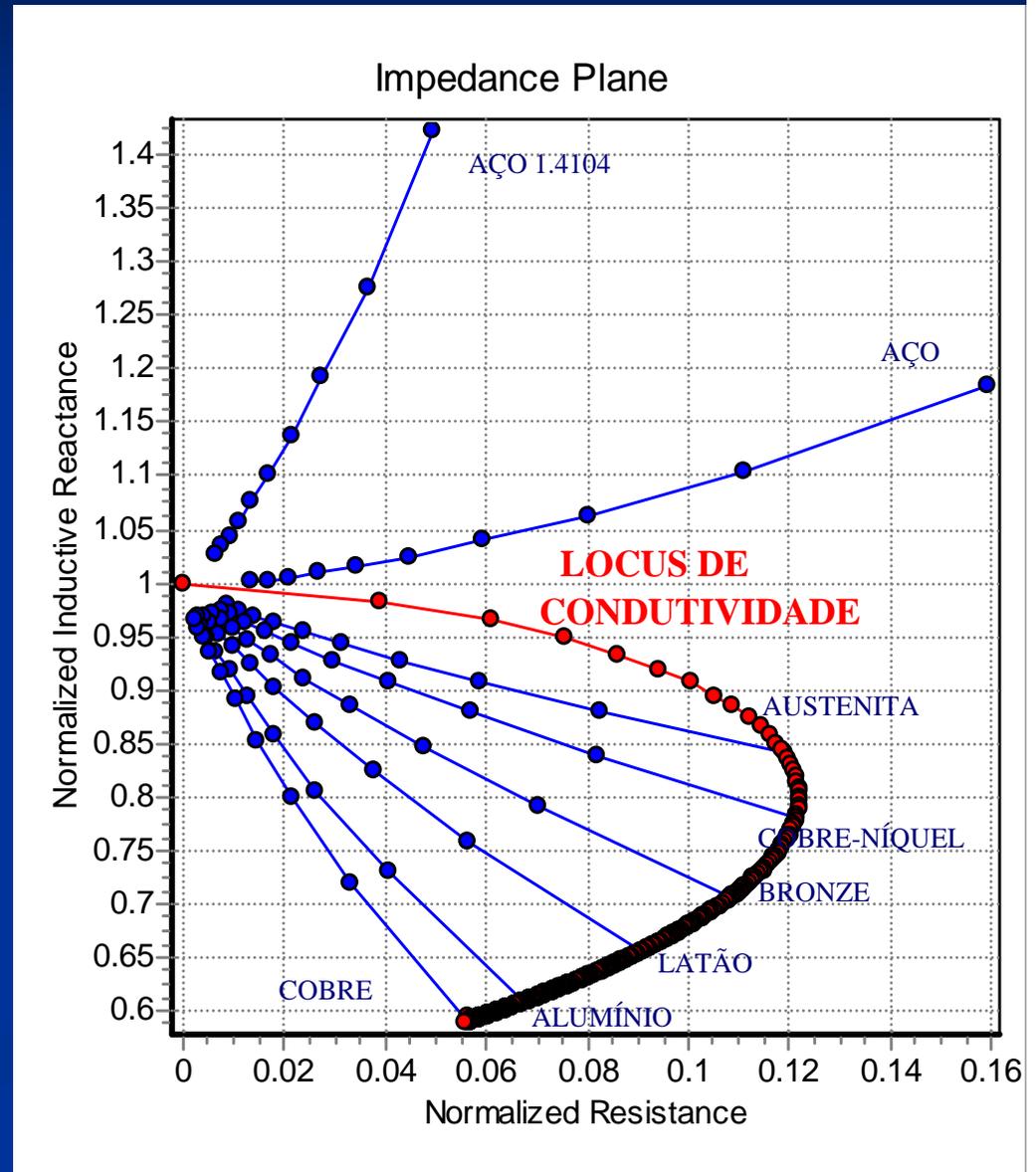
# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Frequência de 10 kHz

COIL INPUT			
Inner radius R1 [mm] :	8		
Outer radius R2 [mm] :	10		
Height L [mm] :	5		
Wire turns N :	300		
OUTPUT			
Inductance [Henry] :	0.001893		
Inductive reactance [Ohm]	118.938043		
TEST INPUT			
Frequency f [KHz] :	From	To	Step
	10		
<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0		
<input checked="" type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	0	58	0.1
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1		

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1

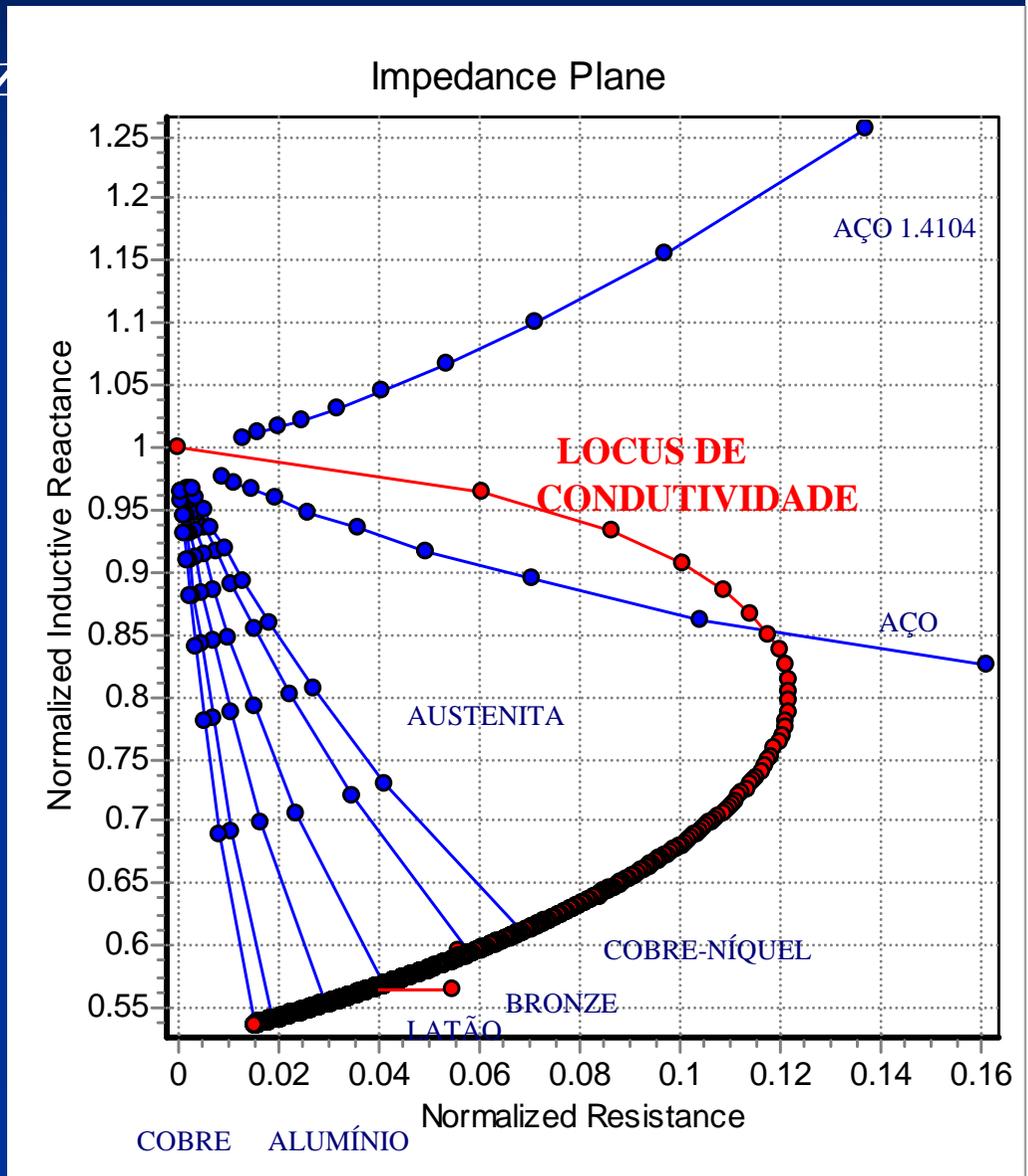


# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Frequência de 200 kHz

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1

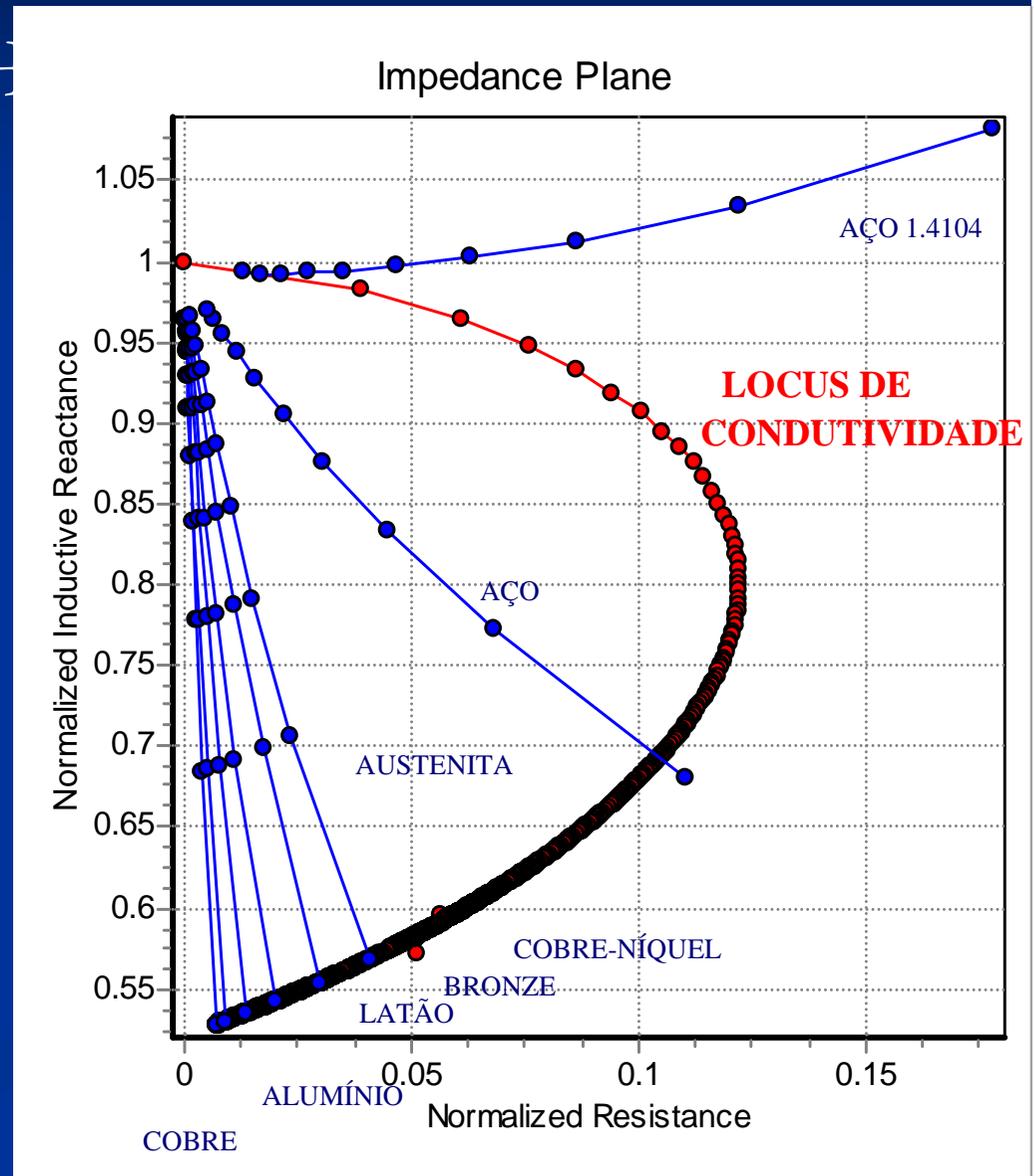


# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Frequência de 1000 kHz

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1

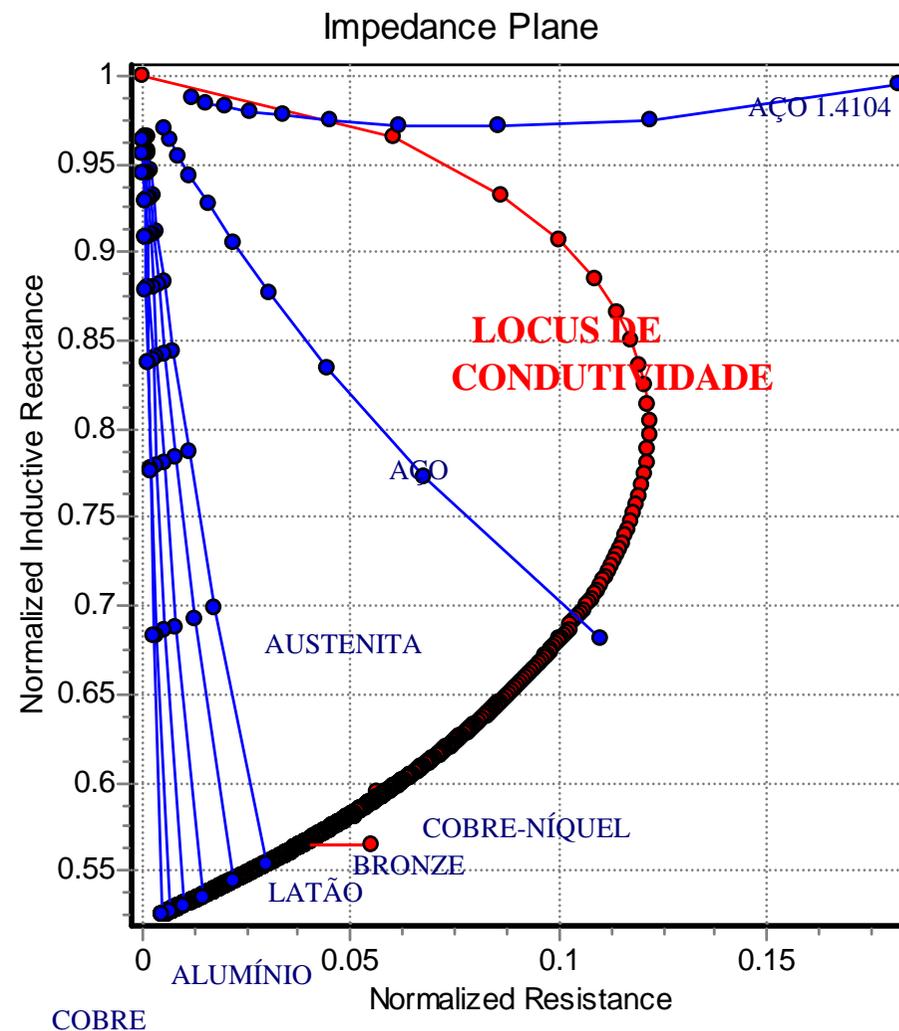


# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Frequência de 2000 kHz

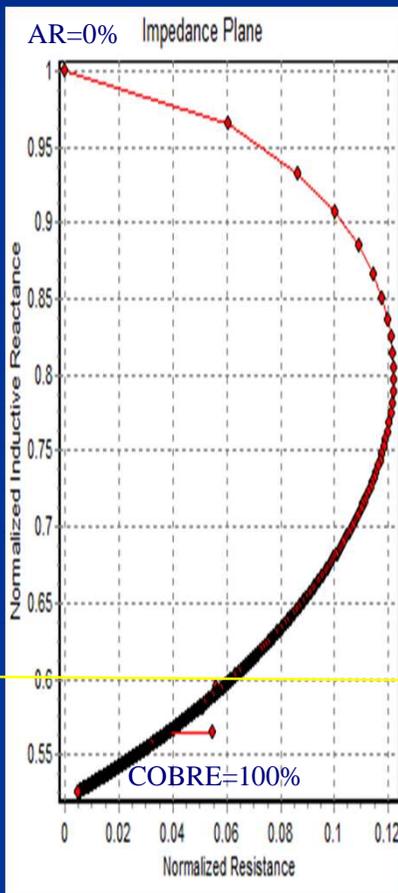
Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1



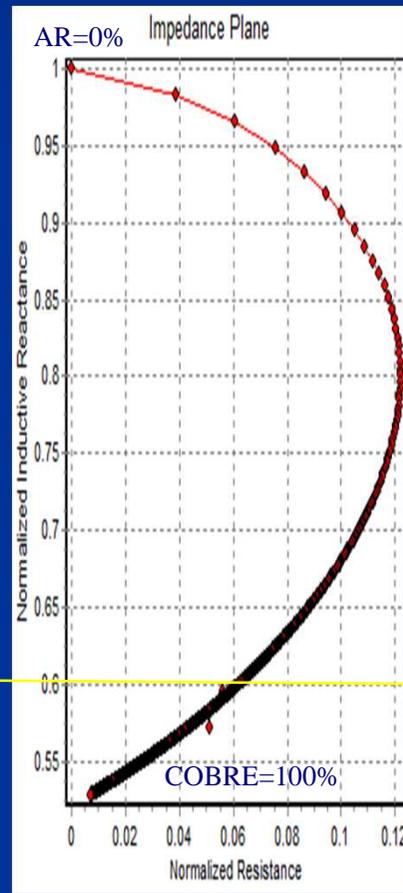
# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

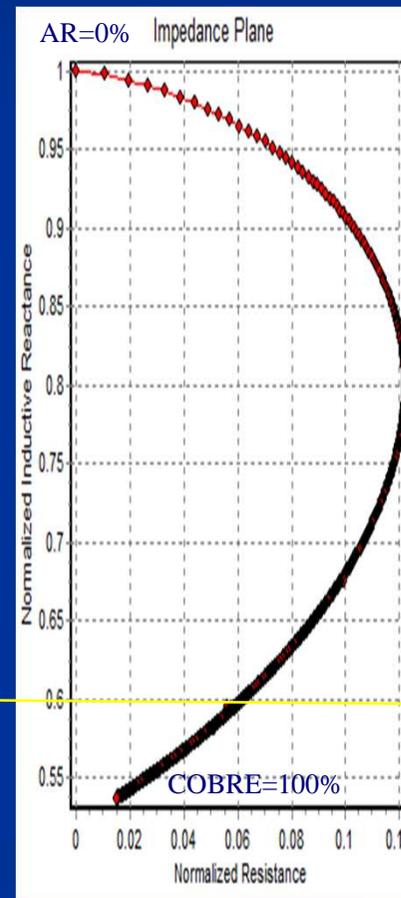
- Influência da Frequência no “locus” de condutividade



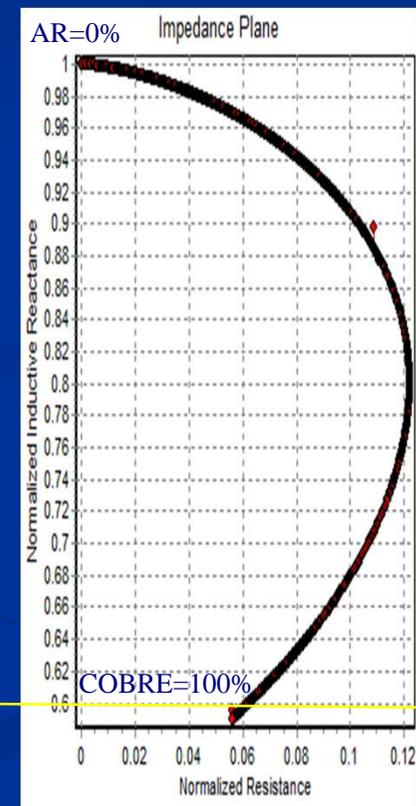
2000 kHz



1000 kHz



200 kHz



10 kHz

30

# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

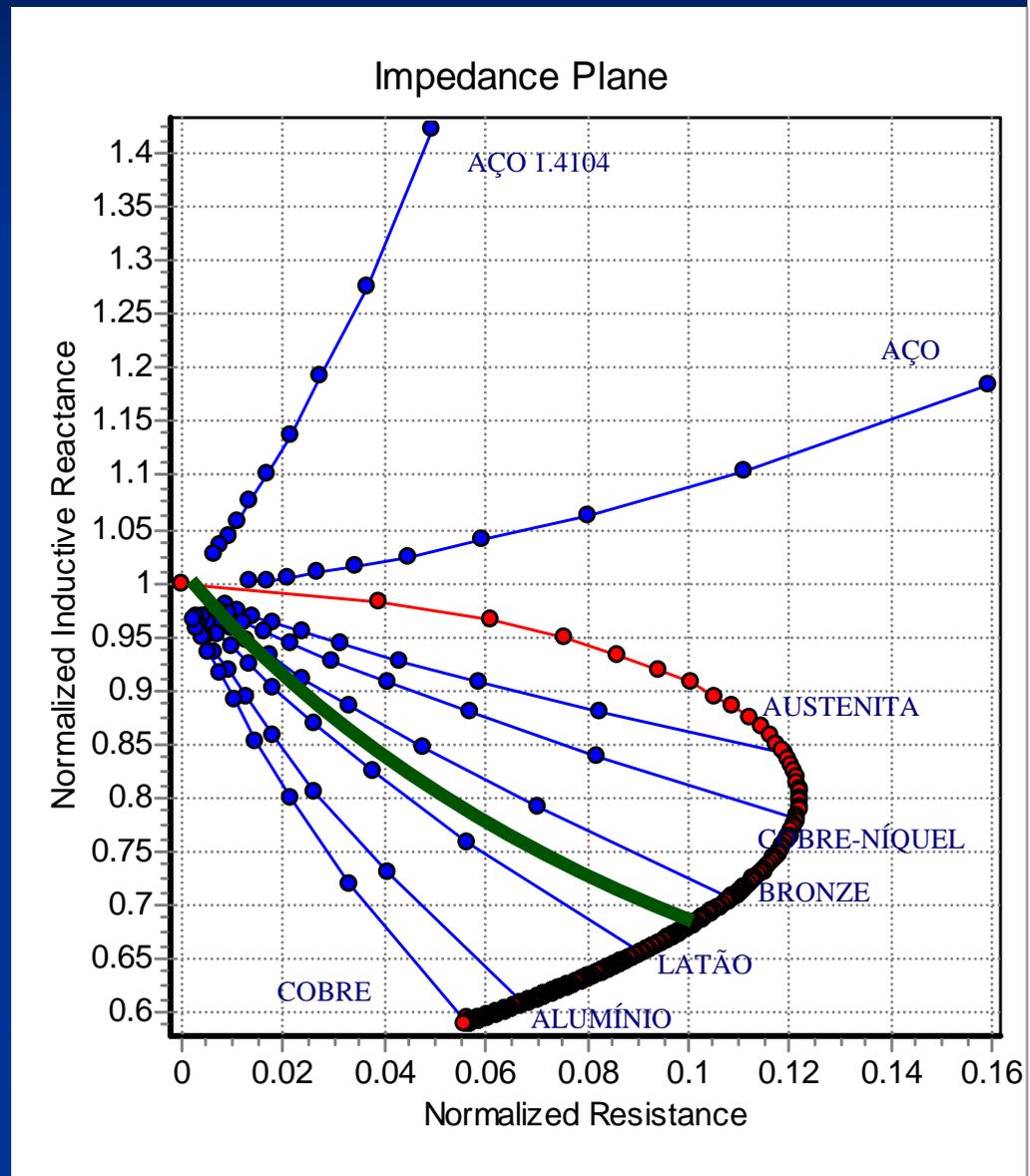
- Perguntas da prática simulada a serem respondidas:
  - O plano de impedâncias é um bom recurso para caracterizar magneticamente os materiais?
  - Por que o aço 1.4104 e o aço comum não fizeram parte do traçado da curva (“locus”) de condutividade?
  - Para separar materiais com baixa condutividade são recomendadas frequências altas ou baixas?
  - Qual o inconveniente de trabalhar com frequências baixas para separar materiais com alta condutividade?
  - O uso de maiores frequências de ensaio consegue minimizar o efeito da variável permeabilidade sobre a variável condutividade no ensaio de correntes parasitas?
  - Considerando a mesma variação de condutividade, a experiência comprovou que quanto maior a frequência, maior a resposta do ensaio?
  - Medição de condutividade (próximo slide).

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Condutividade

- Qual condutividade você estimaria para o material com locus de lift-off representado pela curva verde?

Material	Condutividade (MS/m)	Permeabilidade Relativa
AÇO 1.4104	1,670	750
AÇO	9,21	100
AUSTENITA	1,324	1,02
COBRE-NÍQUEL	2,591	1
BRONZE	6,33	1
LATÃO	13,82	1
ALUMÍNIO	35,38	1
COBRE	57,58	1



# Ensaaios com Sondas Superficiais

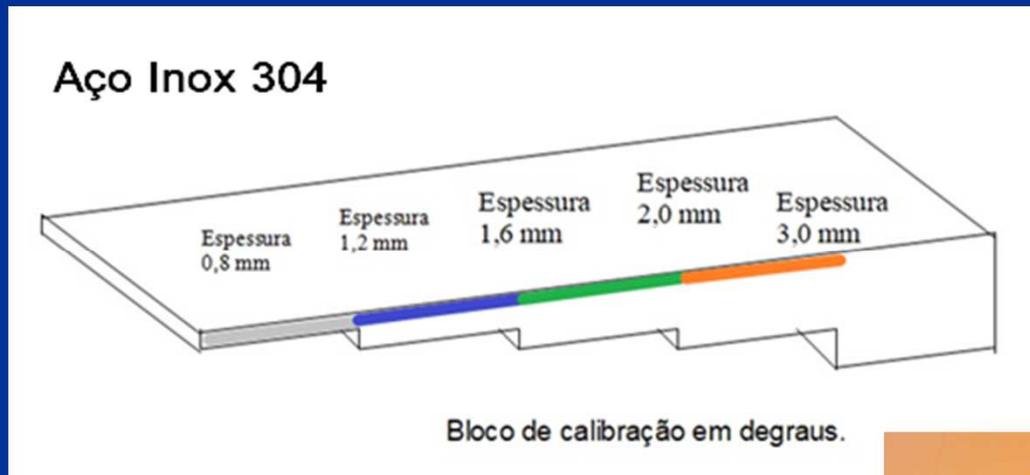
## Medição de Espessura da Peça

- O ensaio de correntes parasitas é também muito empregado para medição de espessura de chapas finas. Usando como exemplo o padrão da prática (figura) e o programa TEDDY 1.2 construir o “locus” de espessura para as seguintes condições de ensaio:
  - Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
    - Raio interno 12 mm, Raio externo 15 mm, Altura 7 mm, Número de voltas 1000
  - Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
  - Considerar uma aproximação da sonda de 10 mm de afastamento até a sonda encostar na superfície de cada espessura do padrão com passos de 1 mm

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura

- Amostra com diferentes espessuras

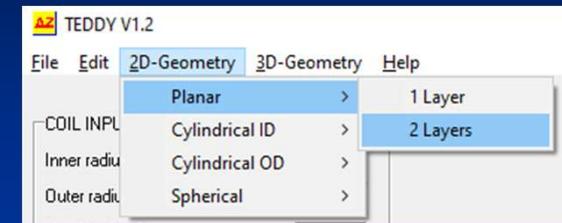


# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura

### ■ Frequência de 10 kHz

- Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
  - Raio interno 12 mm, Raio externo 15 mm, Altura 7 mm, Número de voltas 1000
- Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
- Considerar uma aproximação da sonda de 10 mm de afastamento até a sonda encostar na superfície de cada espessura do padrão com passos de 1 mm



COIL INPUT	
Inner radius R1 [mm] :	12
Outer radius R2 [mm] :	15
Height L [mm] :	7
Wire turns N :	1000

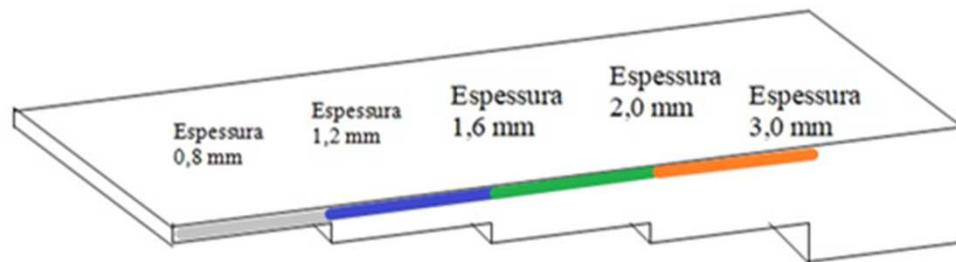
  

OUTPUT	
Inductance [Henry] :	0.032318
Inductive reactance [Ohm]	2030.570690

TEST INPUT			
	From	To	Step
Frequency f [KHz] :	10		
<input checked="" type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0	10	1
<input type="radio"/> Layer thickness D1 [mm]	0.8		
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	1.324		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1.02		
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	0		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	1		

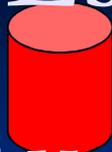
Aço Inox 304



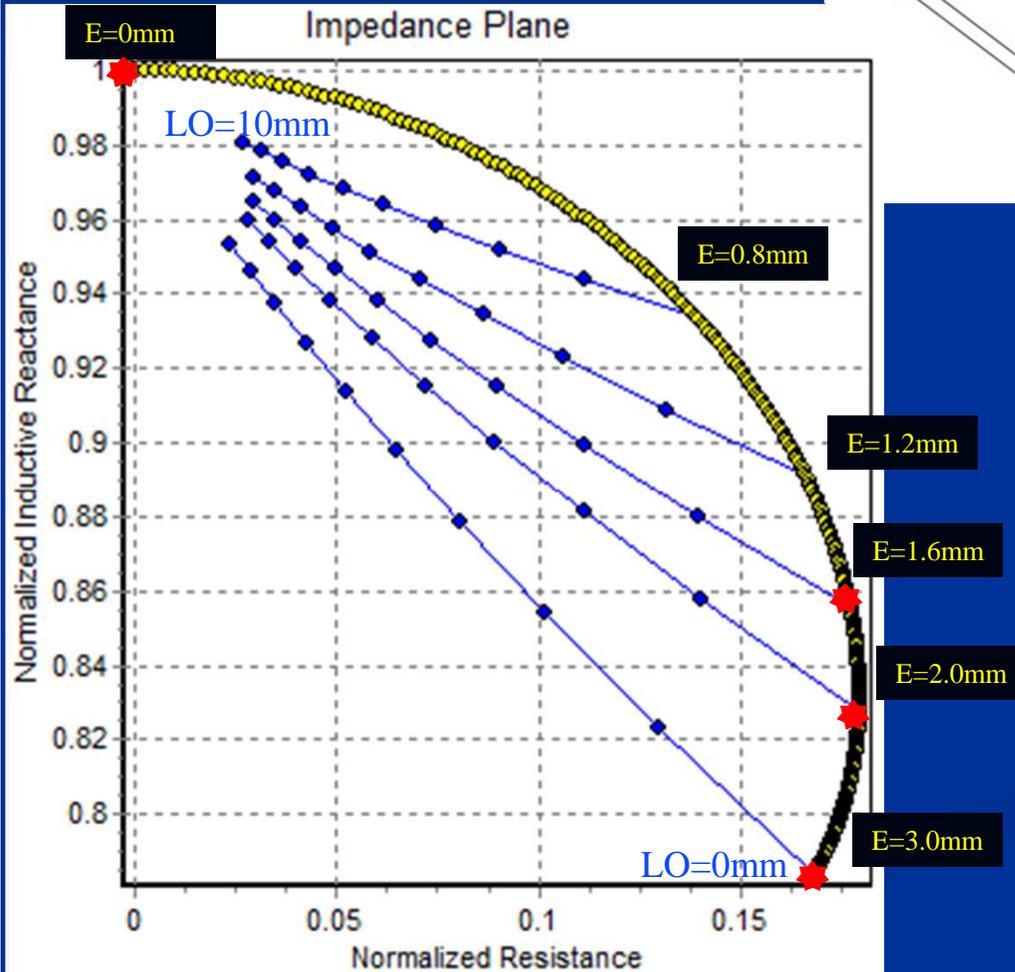
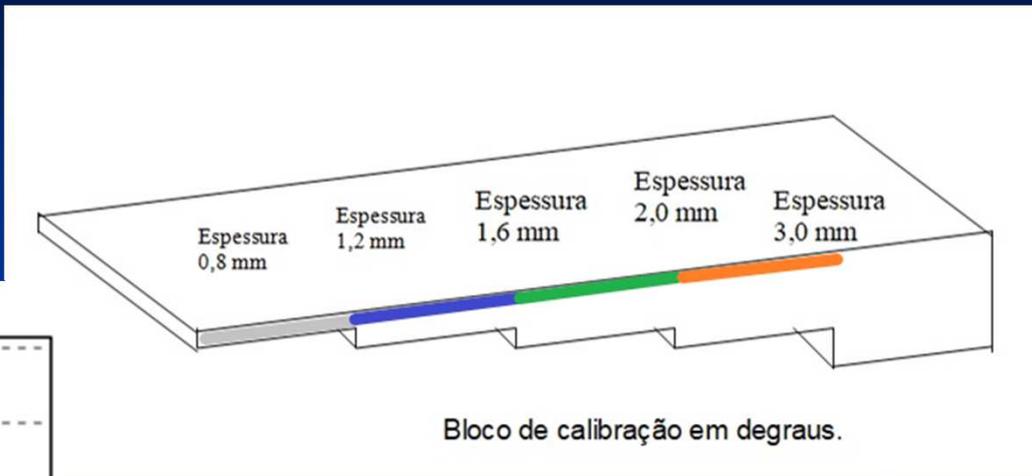
Bloco de calibração em degraus.

Tabela Condutividade

# Medição de Espessura

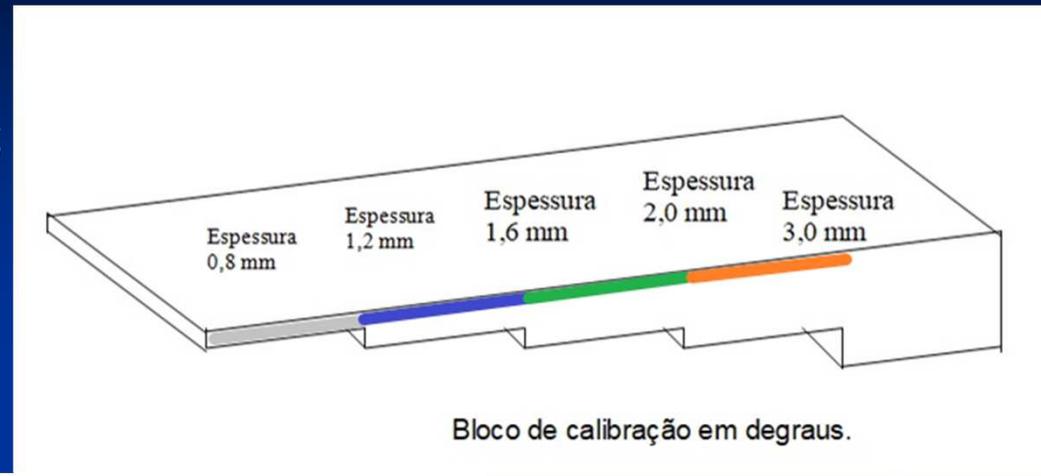


- Frequência de 10 kHz

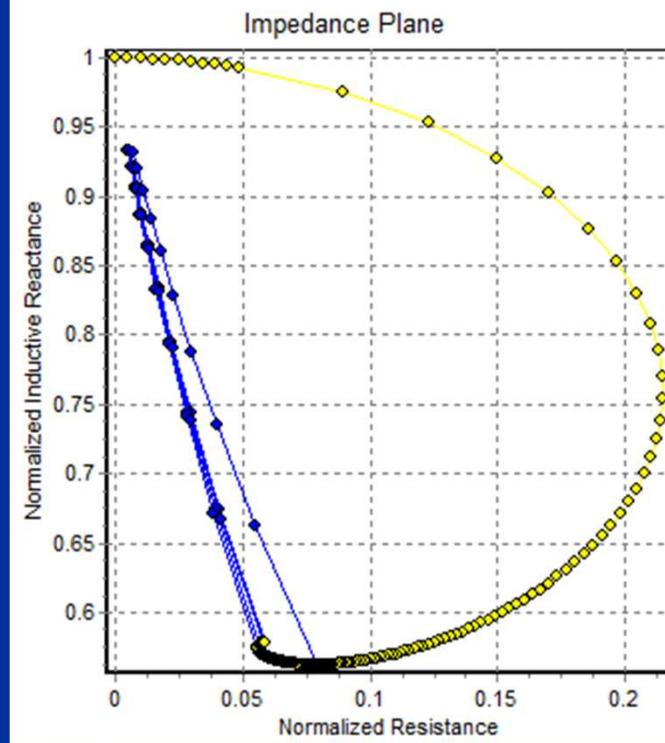


# Medição de Espessura

- Frequência de 200 kHz



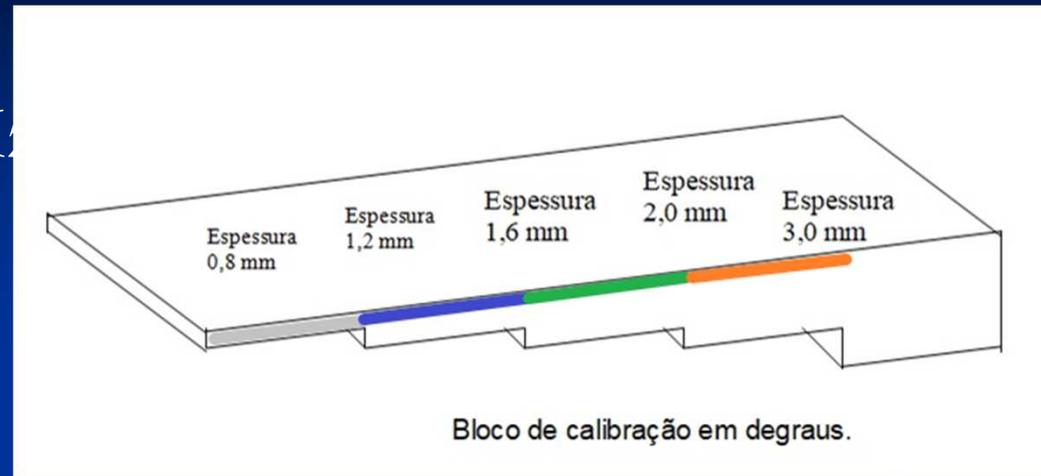
Faça sua própria



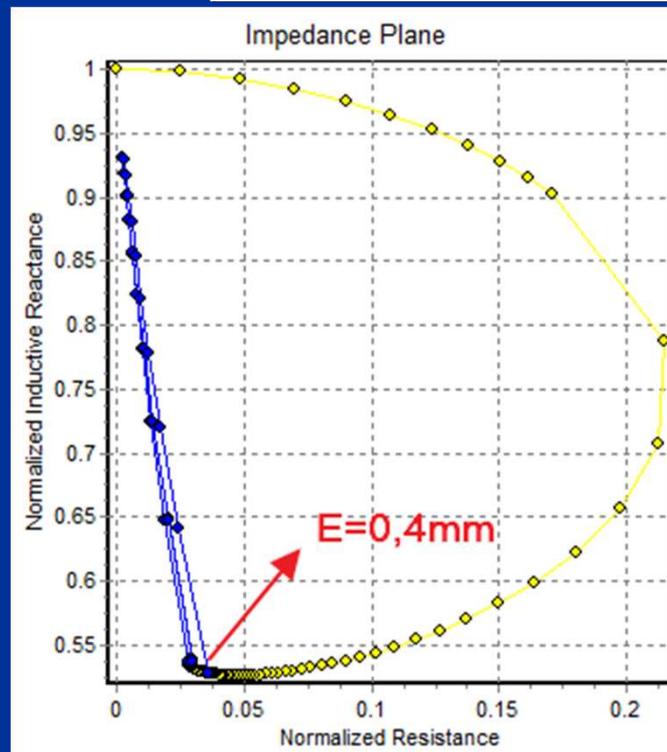
” Teddy 1.2 !!!!!

# Medição de Espessura

- Frequência de 1000 kHz



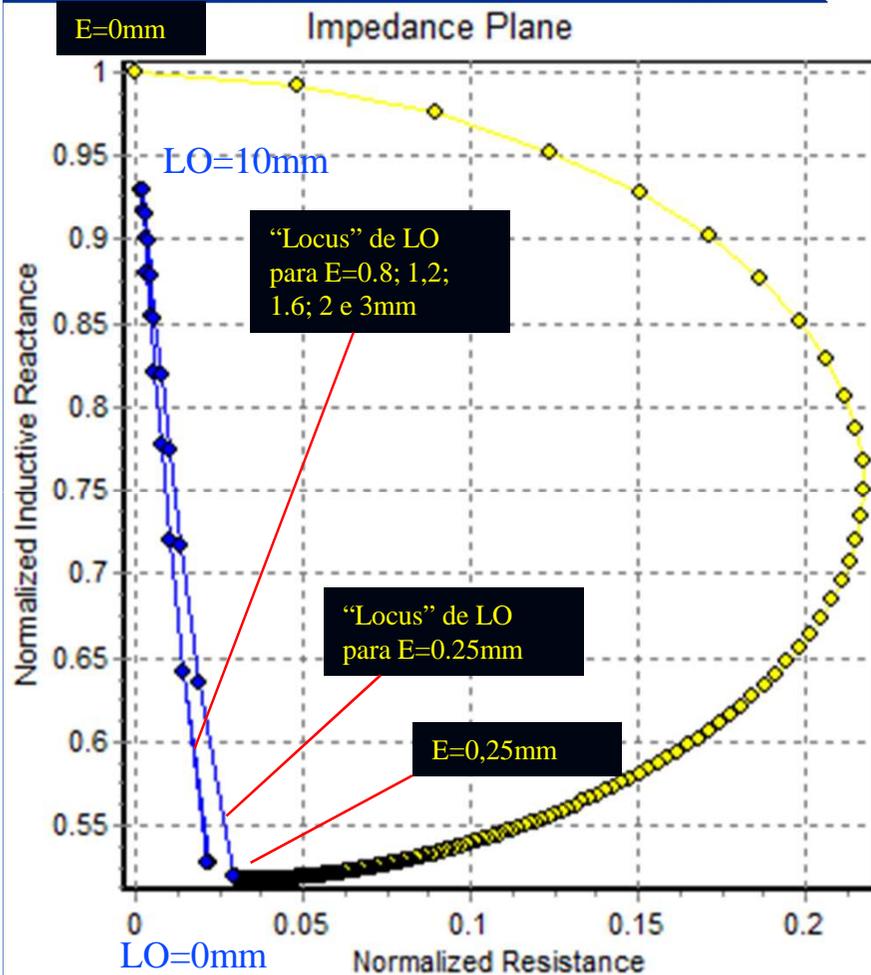
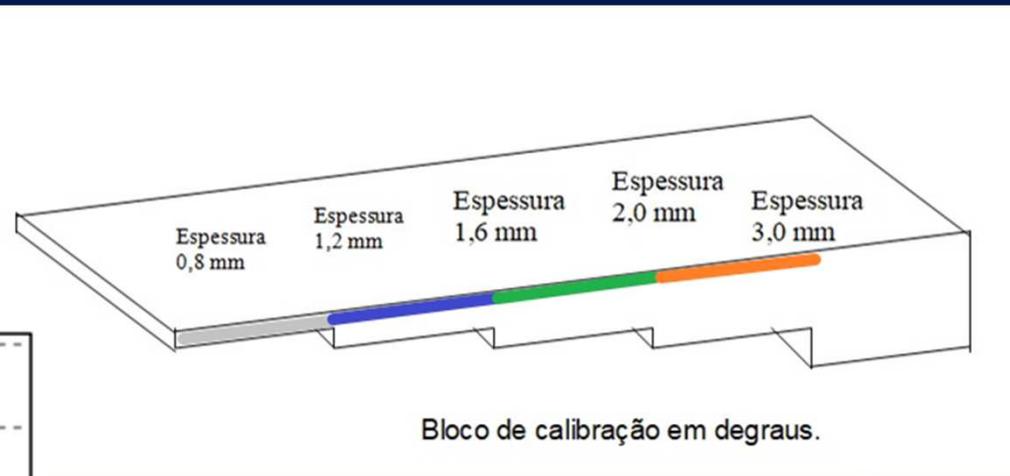
Faça sua própria



” Teddy 1.2 !!!!!

# Medição de Espessura

- Frequência de 2000 kHz

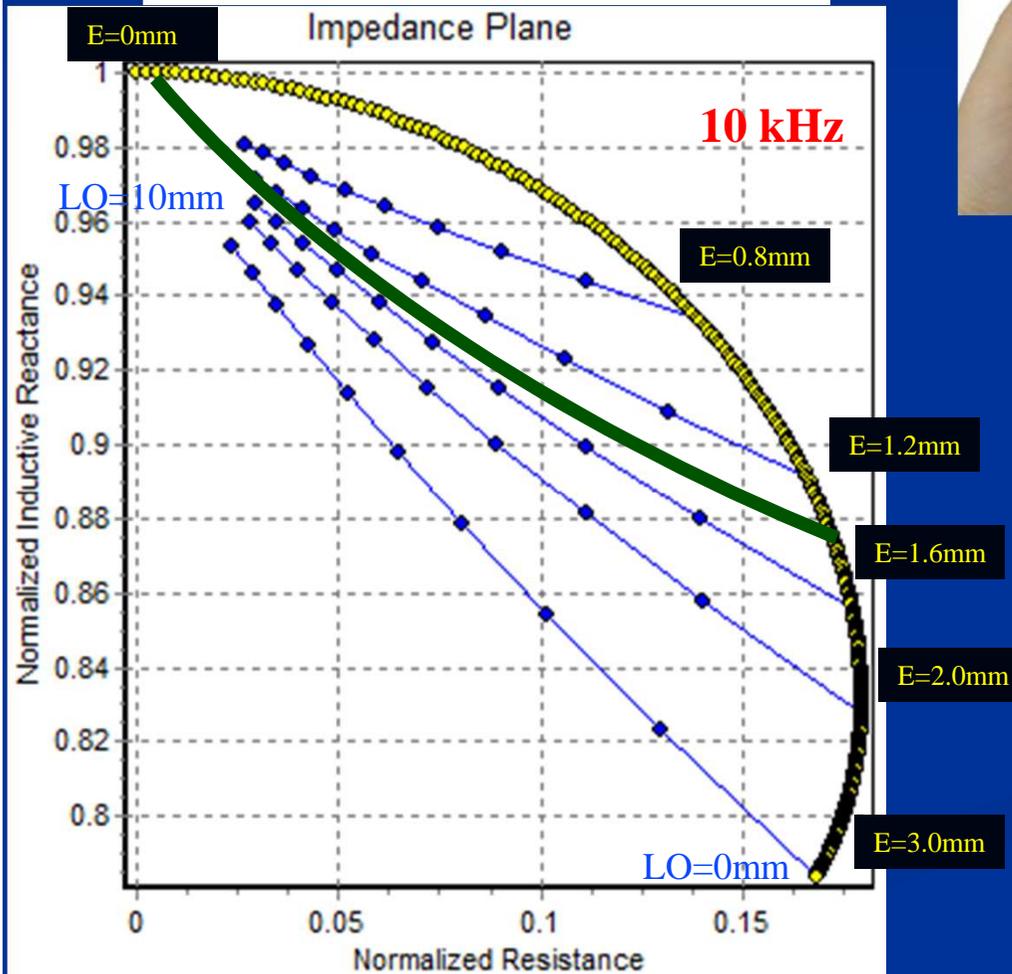
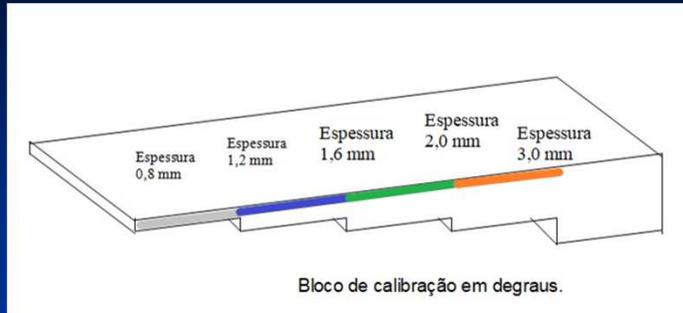


# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Chapas Finas

- Perguntas da prática simulada a serem respondidas:
  - O ensaio de correntes parasitas é um bom ensaio para medição de espessura de materiais metálicos assim como o ultrassom?
  - O uso de altas frequências mostrou que a máxima espessura possível de medição com o ensaio de correntes parasitas é cada vez \_\_\_\_\_ .
  - Você estima que o limite de medição de espessura (máxima espessura possível de medição) de materiais ferromagnéticos com o ensaio de correntes parasitas seja \_\_\_\_\_ que com materiais não magnéticos, como na nossa prática.
  - Você estima que o limite de medição de espessura (máxima espessura possível de medição) de materiais com alta condutividade com o ensaio de correntes parasitas seja \_\_\_\_\_ que com materiais de baixa condutividade, como na nossa prática.
  - Medição de espessura de chapas finas (próximo slide).

# Medição de Espessura



- Qual espessura você estimaria para o material com locus de lift-off representado pela curva verde?

# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada (substrato magnético)

- O ensaio de correntes parasitas é também muito empregado para medição de espessura de camadas de revestimentos (pintura, clad) sobre produtos metálicos. Usando como exemplo o padrão da prática (figura) e o programa TEDDY 1.2 construir o “locus” de espessura de camada para as seguintes condições de ensaio:
  - Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
    - Raio interno 4 mm, Raio externo 5 mm, Altura 1 mm, Número de voltas 100
  - Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
  - Considerar o interesse em medir espessura de camada em micrometros com faixa de variação de 0.2 a 2mm com intervalo de medição de 200 $\mu$ m

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada

- Amostra de Aço 1.404 com diferentes espessuras de camada de revestimento (plástico)

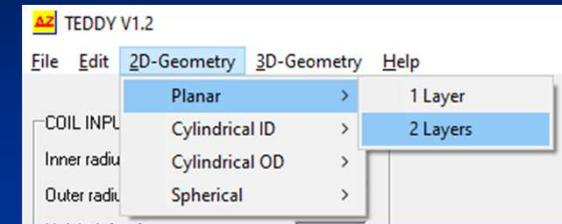


# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada

### ■ Frequência de 10 kHz

- Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
  - Raio interno 4 mm, Raio externo 5 mm, Altura 1 mm, Número de voltas 100
- Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
- Considerar o interesse em medir espessura de camada em micrometros com faixa de variação de 0.2 a 2mm com intervalo de medição de 200 $\mu$ m



COIL INPUT	
Inner radius R1 [mm]:	4
Outer radius R2 [mm]:	5
Height L [mm]:	1
Wire turns N:	100

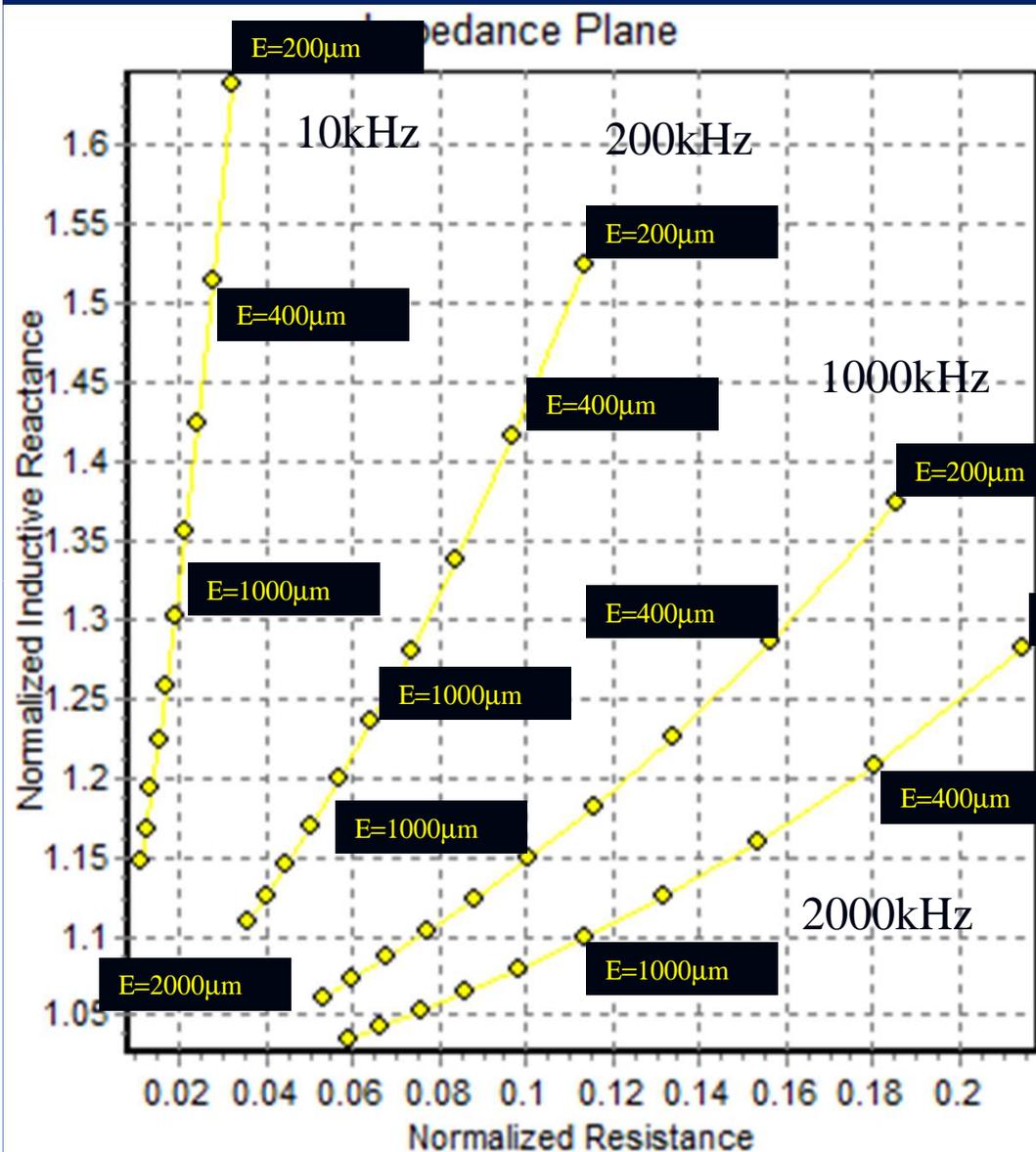
OUTPUT	
Inductance [Henry]:	0.000136
Inductive reactance [Ohm]	1703.900567

TEST INPUT			
	From	To	Step
Frequency f [KHz]:	10		
<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0		
<input checked="" type="radio"/> Layer thickness D1 [mm]	0	2	0.2
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	0		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1		
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	1.670		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	750		

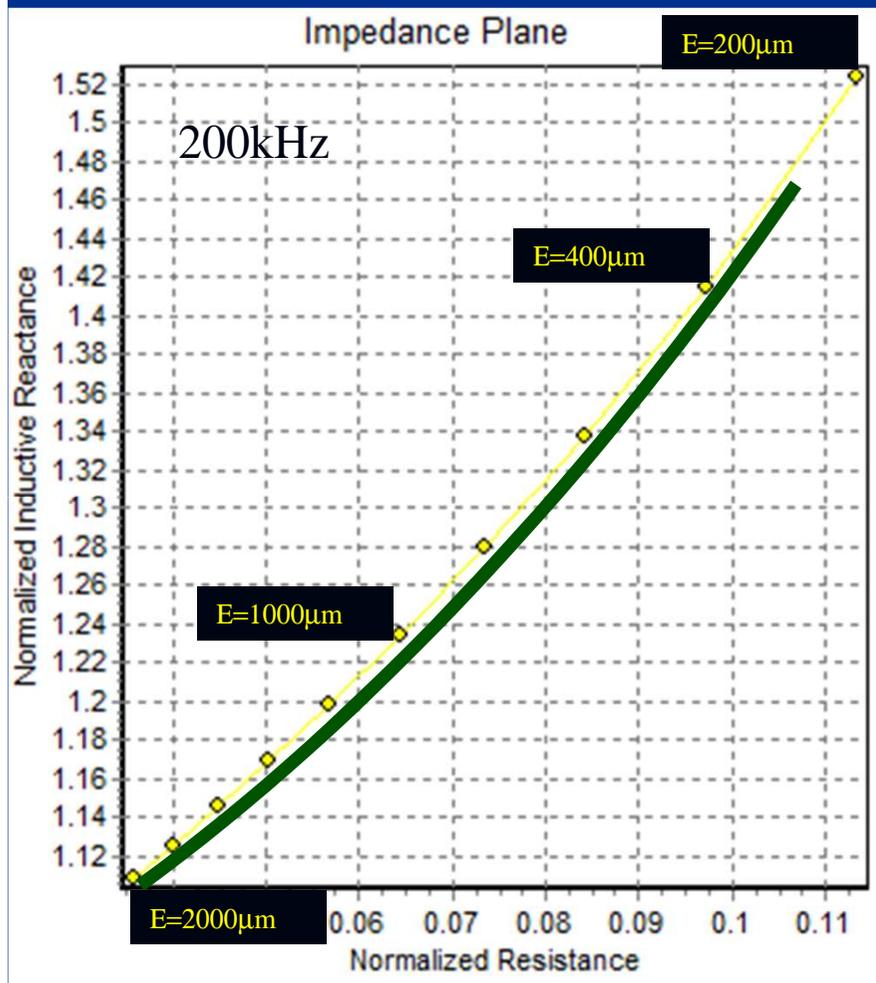
# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada



- Aço 1.404
- Camada plástica (0.2, 0.4, 1 e 2 mm)
- Frequência (10, 200, 1000 e 2000 kHz)

# Medição de Espessura de Camada



- Qual espessura de camada você estimaria para o revestimento sobre material magnético com o locus de lift-off representado pela curva verde?

# Ensaaios com Sondas Superficiais

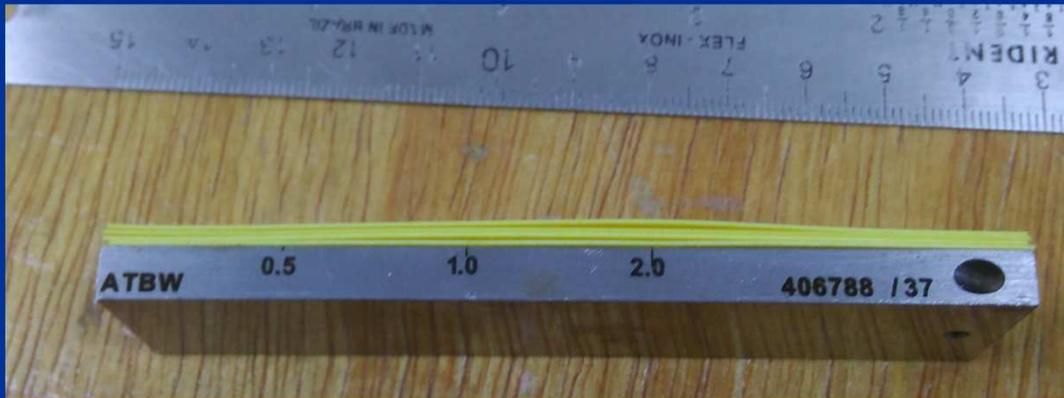
## Medição de Espessura de Camada (substrato não magnético)

- Na prática anterior a camada plástica estava sobre um substrato de material ferromagnético, vamos verificar agora o que acontece na medição de camadas em materiais não magnéticos. Considerar as mesmas condições de ensaio exceto para o padrão de calibração:
  - Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
    - Raio interno 4 mm, Raio externo 5 mm, Altura 1 mm, Número de voltas 100
  - Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
  - Considerar o interesse em medir espessura de camada em micrometros com faixa de variação de 0.5 a 2mm com intervalo de medição de 500 $\mu$ m

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada

- Amostra de Aço Inoxidável Austenítico com diferentes espessuras de camada de revestimento (plástico)

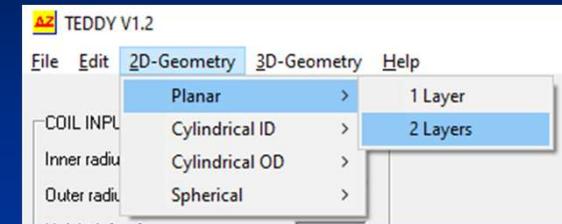


# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada

### ■ Frequência de 10 kHz

- Sonda superficial normal (eixo perpendicular a superfície)
  - Raio interno 4 mm, Raio externo 5 mm, Altura 1 mm, Número de voltas 100
- Frequências de excitação da sonda: 10, 200, 1000 e 2000 kHz
- Considerar o interesse em medir espessura de camada em micrometros com faixa de variação de 0.5 a 2mm com intervalo de medição de 500 $\mu$ m



COIL INPUT			
Inner radius R1 [mm] :		4	
Outer radius R2 [mm] :		5	
Height L [mm] :		1	
Wire turns N :		100	

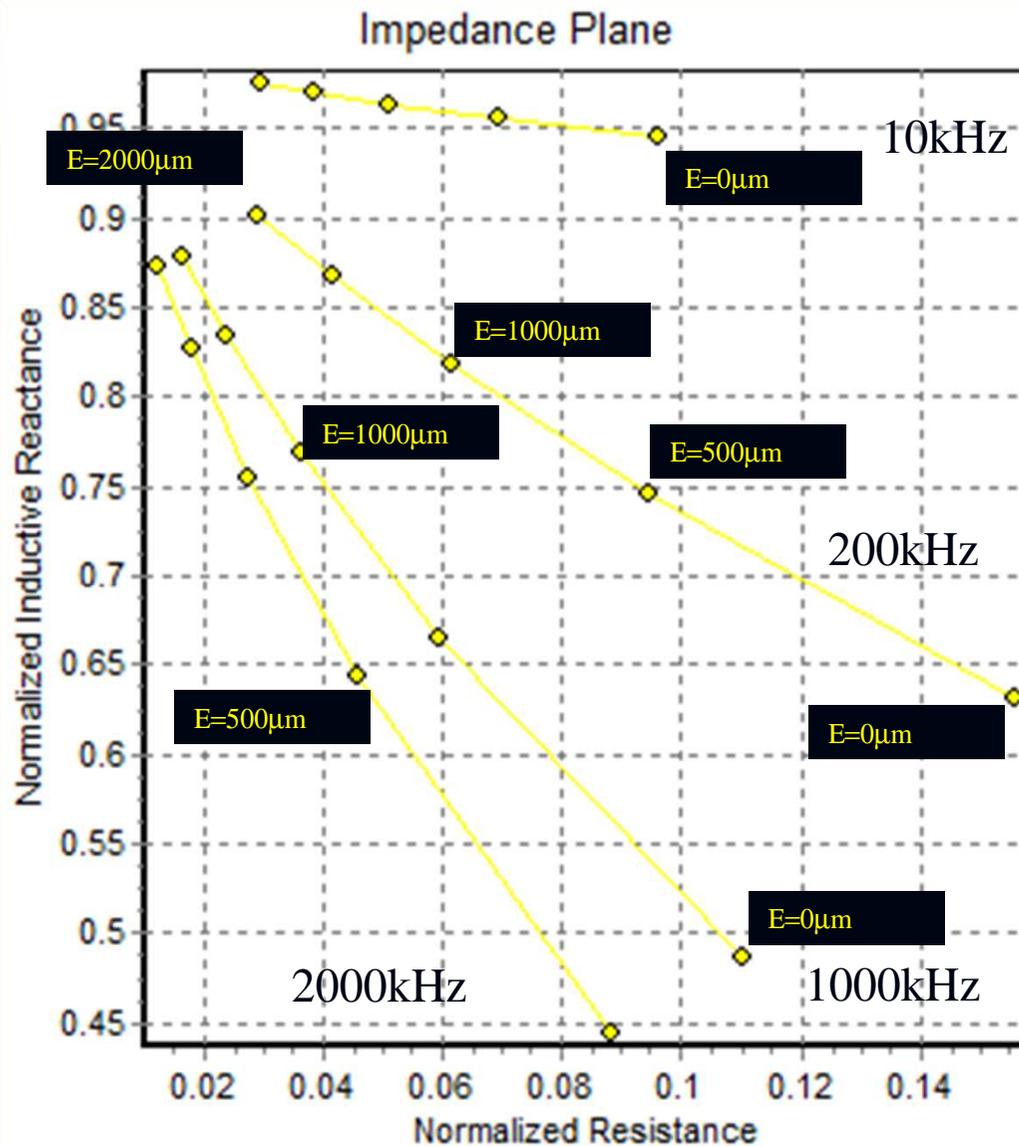
OUTPUT			
Inductance [Henry] :		0.000136	
Inductive reactance [Ohm]		1703.900567	

TEST INPUT			
	From	To	Step
Frequency f [KHz] :	10		
<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0		
<input checked="" type="radio"/> Layer thickness D1 [mm]	0	2	0.5
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	0		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1		
<input type="radio"/> Conductivity CON2 [MS/m]	1.324		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR2	1.02		

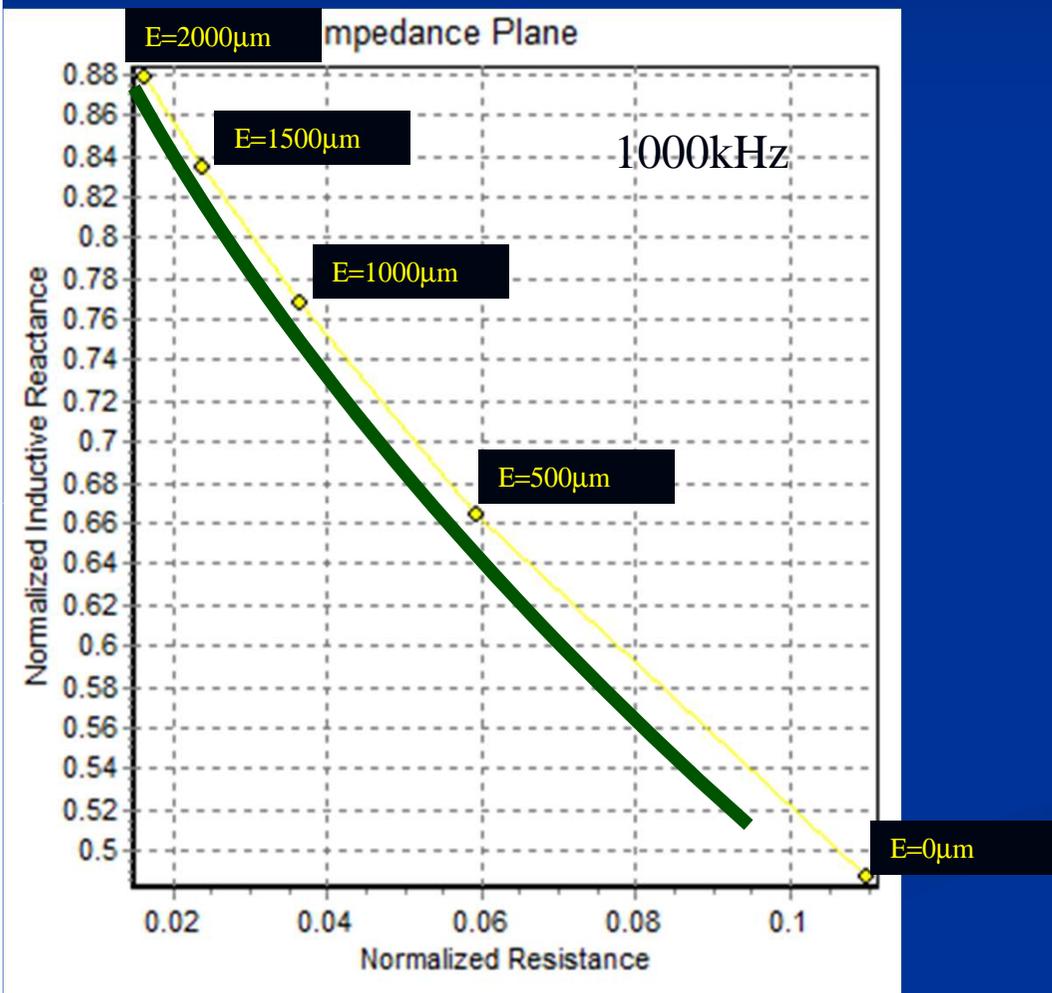
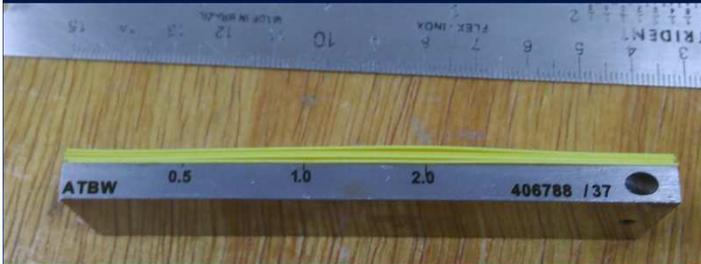
# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada



- Aço Austenítico
- Camada plástica (0, 0.5, 1, 1.5 e 2 mm)
- Frequência (10, 200, 1000 e 2000 kHz)

# Medição de Espessura de Camada



- Qual espessura de camada você estimaria para o revestimento sobre o material com locus de lift-off representado pela curva verde?

# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Detecção de Trincas Superficiais

- O ensaio de correntes parasitas é também muito empregado para detecção de trincas superficiais metálicas. Usando como exemplo o padrão da prática (figura) e o programa TEDDY 1.2 escolher qual o melhor ajuste do aparelho para a detecção e medição das trincas:
  - Sonda superficial paralela (eixo paralelo a superfície)
    - Raio interno 1 mm, Raio externo 2 mm, Altura 0,5 mm, Número de voltas 50
  - Frequências de excitação da sonda: 20, 100, 500 e 2000 kHz
  - Considerar que os entalhes existentes no padrão apresentam as profundidades e redução de condutividade relativas a seguir:  
0,5mm ( $\Delta\sigma = -10\%$ ); 1,0 mm ( $\Delta\sigma = -40\%$ ); 2,0 mm ( $\Delta\sigma = -60\%$ )

# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Detecção de Trincas Superficiais

- Amostra de Aço Inoxidável



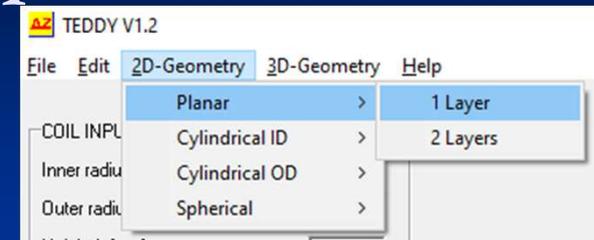
# Ensaio com Sondas Superficiais

## Detecção de Trincas Superficiais

### ■ Frequência de 10 kHz

- Sonda superficial paralela (eixo paralelo a superfície)
  - Raio interno 1 mm, Raio externo 2 mm, Altura 0,5 mm, Número de voltas 50
- Frequências de excitação da sonda: 20, 100, 500 e 2000 kHz
- Considerar que os entalhes existentes no padrão apresentam as profundidades e redução de condutividade relativas a seguir: 0,5mm ( $\Delta\sigma=-10\%$ ); 1,0 mm ( $\Delta\sigma=-40\%$ ); 2,0 mm ( $\Delta\sigma=-60\%$ )

Considerar que o entalhe de 1,0 mm de profundidade é o exigido por norma para calibração e que deve estar defasado de 90° do sinal de lift-off



COIL INPUT			
Inner radius R1 [mm] :	4		
Outer radius R2 [mm] :	5		
Height L [mm] :	1		
Wire turns N :	100		

OUTPUT			
Inductance [Henry] :	0.000136		
Inductive reactance [Ohm]	17.039006		

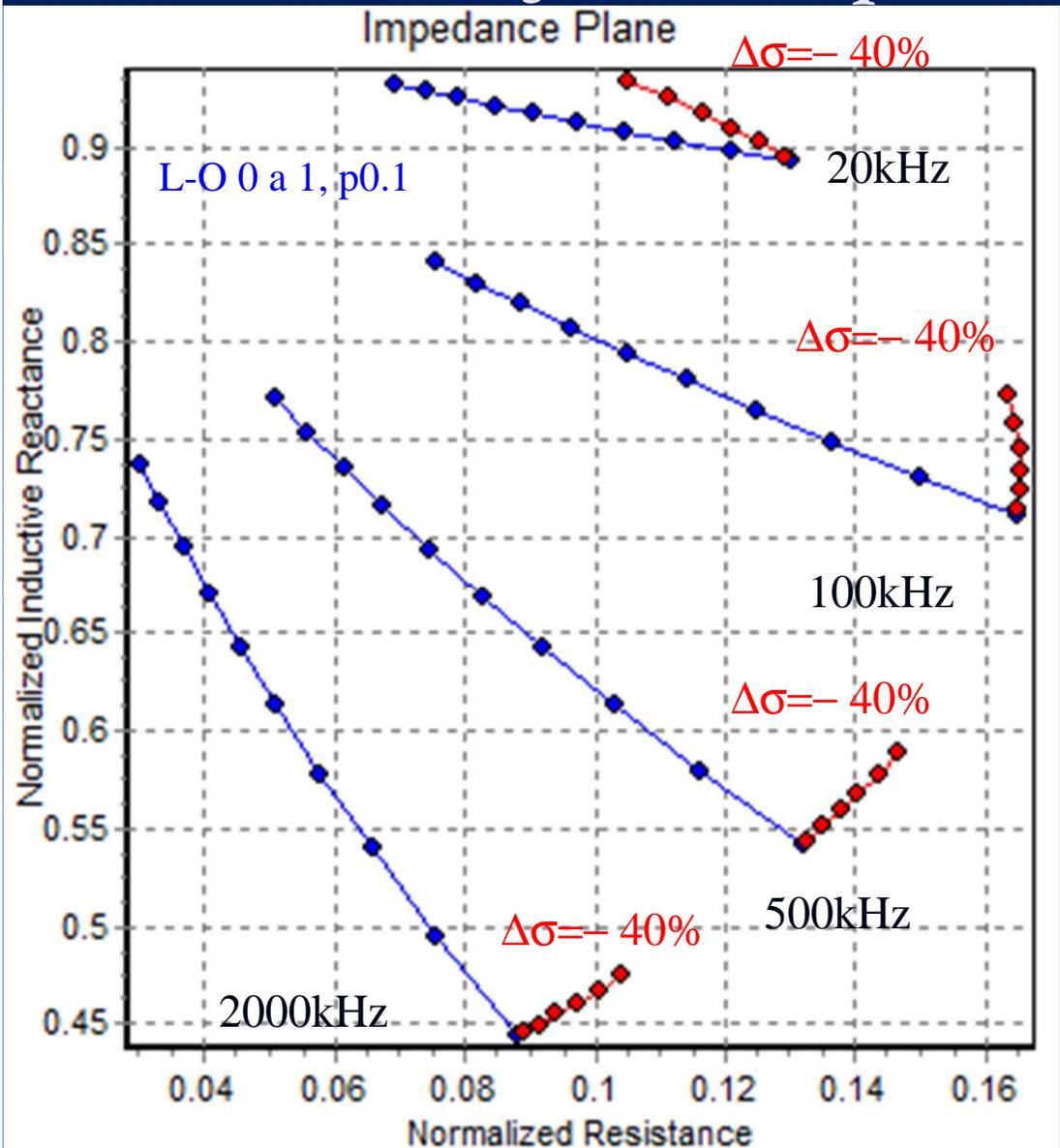
TEST INPUT			
	From	To	Step
Frequency f [KHz] :	20		
<input type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0		
<input checked="" type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	0.7944	1.324	0.1
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1.02		

TEST INPUT			
	From	To	Step
Frequency f [KHz] :	20		
<input checked="" type="radio"/> Lift-off LO [mm]	0	1	0.1
<input type="radio"/> Conductivity CON1 [MS/m]	1.324		
<input type="radio"/> Rel.magn.permeability MR1	1.02		

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Medição de Espessura de Camada



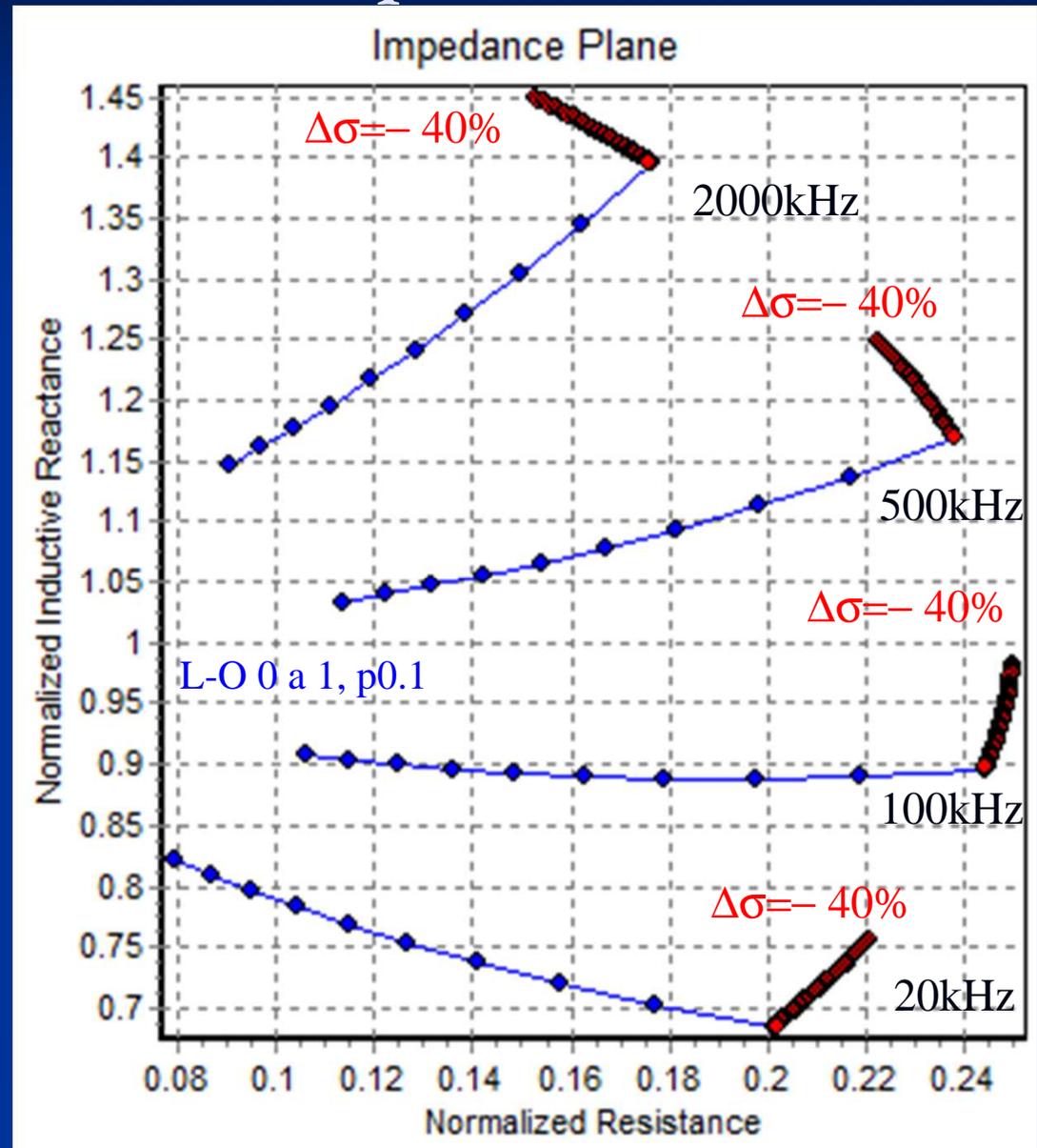
- Aço Austenítico (1,324/1,02)
- Entalhe de calibração 1,0 mm ( $\Delta\sigma = -40\%$ )
- Lift-off (0 a 1 mm, com passo 0,1 mm)
- Frequência (10, 200, 1000 e 2000 kHz)

# Ensaio com Sondas Superficiais

## Detecção de Trincas Superficiais

- Repetir a experiência com um material magnético (aço carbono) e mostrar resultados no Teddy

- Aço carbono (9,21/100)
- Entalhe de calibração 1,0 mm ( $\Delta\sigma = -40\%$ )
- Lift-off (0 a 1 mm, com passo 0,1 mm)
- Frequência (10, 200, 1000 e 2000 kHz)



# Ensaaios com Sondas Superficiais

## Detecção de Trincas Superficiais

- Perguntas da prática simulada a serem respondidas:
  - Com base nas experiências práticas simuladas para detecção de trincas em material não magnético do tipo aço austenítico, qual a frequência você recomendaria para o ensaio considerando o critério de sinal de trinca perpendicular ao sinal de lift-off?
  - Com base nas experiências práticas simuladas para detecção de trincas em material não ferromagnético do tipo aço carbono, qual a frequência você recomendaria para o ensaio considerando o critério de sinal de trinca perpendicular ao sinal de lift-off?
  - Considerando o requisito de medição da profundidades das trincas detectadas, qual critério de calibração adicional (além da separação angular LO-trinca) você recomendaria