

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**INCERTEZA NA MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS  
ACÚSTICAS DOS MATERIAIS**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PETER KLITZKE GIESBRECHT**

**Florianópolis, agosto de 2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**INCERTEZA NA MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS  
ACÚSTICAS DOS MATERIAIS**

**PETER KLITZKE GIESBRECHT**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Samir N. Y. Gerges – Orientador**

---

**Roberto Jordan – Co-orientador**

---

**Fernando Cabral - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Roberto Jordan - Presidente**

---

**Saulo Güths**

---

**Sylvio Reynaldo Bistafa**

## AGRADECIMENTOS

Á minha família e esposa cujo apoio e amor nunca faltaram.

Ao meu orientador, Pro. Samir, pelos ensinamentos e apoio desde o meu ingresso no mestrado.

Ao Prof. Jordan que, sempre que possível, me ajudou nos caminhos tortuosos do mestrado.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	iv
SÍMBOLOGIA.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS.....	4
2.2.1. Resistividade ao fluxo.....	4
2.2.1.1. Determinação experimental da resistividade ao fluxo.....	5
2.2.2. Porosidade.....	9
2.2.2.1. Determinação experimental da porosidade.....	9
2.2.3. Absorção e impedância acústica.....	12
2.2.3.1. Medição da absorção acústica em um tubo de impedância.....	13
3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	19
3.1. INTRODUÇÃO.....	19
3.2. MODELANDO A MEDIÇÃO.....	20
3.2.1. Avaliação da incerteza padrão tipo A.....	21
3.2.2. Avaliação da incerteza padrão tipo B.....	21
3.3. INCERTEZA PADRÃO COMBINADA.....	23
3.3.1. Grandezas de entrada não correlacionadas.....	23
3.3.2. Grandezas de entrada correlacionadas.....	24
3.4. INCERTEZA EXPANDIDA.....	24
4. RESISTIVIDADE AO FLUXO.....	27
4.1. INTRODUÇÃO.....	27
4.2. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE AO FLUXO.....	27
4.2.1. Bancada.....	27
4.2.2. Metodologia da medição da resistividade ao fluxo.....	29
4.2.3. Resultados da resistividade ao fluxo.....	30
4.2.4. Considerações.....	33
5. POROSIDADE.....	35
5.1. INTRODUÇÃO.....	35
5.2. MEDIÇÃO DA POROSIDADE.....	35
5.2.1. Bancada.....	38
5.2.2. Resultados.....	39
5.3. CONSIDERAÇÕES.....	40
6. MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA.....	41
6.1. INTRODUÇÃO.....	41

6.2. MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO E DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICAS .....	41
6.2.1. Bancada de medição da impedância e absorção acústica .....	43
6.2.2. Metodologia da medição da impedância e absorção acústica .....	43
6.2.3. Resultados da impedância e absorção sonora .....	44
7. INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE AO FLUXO.....	48
7.1. INTRODUÇÃO .....	48
7.2. FONTES DE INCERTEZA DA RESISTIVIDADE AO FLUXO.....	48
7.2.1. Incerteza do diâmetro ( $u_d$ ).....	51
7.2.1.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos .....	51
7.2.1.2. Quantificação dos efeitos aleatórios do diâmetro do tubo .....	51
7.2.1.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos .....	53
7.2.2. Incerteza da pressão ( $u_p$ ).....	54
7.2.2.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos .....	54
7.2.2.2. Quantificação dos efeitos aleatórios.....	55
7.2.2.3. Cálculo da correção combinada.....	56
7.2.2.4. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos:.....	56
7.2.3. Incerteza da espessura da amostra ( $u_T$ ) .....	56
7.2.3.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos .....	57
7.2.3.2. Quantificação dos efeitos aleatórios.....	57
7.2.3.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos .....	59
7.2.4. Incerteza da vazão volumétrica de ar ( $u_U$ ) .....	59
7.2.4.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos .....	60
7.2.4.2. Quantificação dos efeitos aleatórios.....	60
7.2.4.3 Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos:.....	61
7.3. CÁLCULO DA INCERTEZA EXPANDIDA TOTAL .....	62
7.4. CONCLUSÕES .....	63
8. INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA POROSIDADE .....	66
8.1. INTRODUÇÃO .....	66
8.2. FONTES DE INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA POROSIDADE .....	66
8.2.2. Incerteza da altura $a$ ( $u_a$ ).....	72
8.2.2.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos da altura $a$ .....	72
8.2.2.2. Quantificação dos efeitos aleatórios da altura $a$ .....	72
8.2.2.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos da altura $a$ .....	73
8.2.3. Incerteza da espessura da amostra ( $u_T$ ) .....	73
8.2.3.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos da espessura da amostra.....	74
8.2.3.2. Quantificação dos efeitos aleatórios da espessura da amostra .....	74
8.2.3.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos da espessura da amostra .....	76
8.3. CÁLCULO DA INCERTEZA EXPANDIDA TOTAL .....	76
8.4. CONCLUSÕES .....	77

9. INCERTEZA NAS MEDIÇÕES DA IMPEDÂNCIA E DA ABSORÇÃO ACÚSTICA ...	79
9.1. INTRODUÇÃO .....	79
9.2. FONTES DE INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DA ABSORÇÃO ACÚSTICA .....	79
9.2.1. Fontes de incerteza das posições do microfone .....	82
9.2.1.1. Incerteza da posição $d_1$ do microfone .....	83
9.2.1.2. Incerteza da posição $d_2$ do microfone .....	85
9.2.2. Incerteza da pressão medida na posição $d_1$ .....	86
9.2.3. Incerteza da pressão medida na posição $d_2$ .....	87
9.2.4. Incerteza da temperatura ambiente .....	87
9.3. INCERTEZA DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO .....	88
9.4. INCERTEZA DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO .....	88
9.5. INCERTEZA DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICA .....	89
9.6. INFLUÊNCIA DE CADA FONTE DE INCERTEZA .....	89
10. CONCLUSÕES .....	92
Referências Bibliográficas .....	94
APÊNDICES .....	98

## SÍMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

A	Área da superfície da amostra	[m <sup>2</sup> ]
a	Altura entre a superfície superior do pistão e a lateral do porta-amostra com amostra acondicionada	[m]
a	Valor da resolução do dispositivo mostrador	
c <sub>0</sub>	Velocidade do som no ar	[m/s]
d	Diâmetro do tubo	[m]
d <sub>1</sub>	Distância entre o microfone na posição 1 e o final do tubo de impedância	[m]
d <sub>2</sub>	Distância entre o microfone na posição 2 e o final do tubo de impedância	[m]
e	Espessura da amostra	[m]
f	Frequência	[Hz]
f <sub>corte</sub>	Frequência de corte	[Hz]
f <sub>m</sub>	Frequência máxima de interesse	[Hz]
h	Altura entre a superfície superior do pistão e a lateral do porta-amostra sem amostra acondicionada	[m]
H <sub>AB</sub>	Função de transferência entre o sinal do microfone na posição A e o sinal do microfone na posição B	
H <sub>AS</sub>	Função de transferência entre o sinal do microfone na posição A e o sinal do gerador S	
H <sub>SB</sub>	Função de transferência entre o sinal do gerador S e o do microfone na posição P	
k	Número de onda	[1/m]
P	Pressão manométrica	[Pa]
P <sub>A</sub>	Pressão medida na posição A do microfone	[Pa]
P <sub>B</sub>	Pressão medida na posição B do microfone	[Pa]
r	Resistência ao fluxo	[rayls]
r <sub>0</sub>	Resistividade ao fluxo	[rayls/m]
s	Distância entre posições do microfone	[m]
S	Área da superfície da amostra	[m <sup>2</sup> ]
T	Espessura da amostra	[m]

$t$	Coeficiente de <i>student</i>	
$U$	Vazão volumétrica de ar	$[m^3/s]$
$u_i$	Incerteza padrão do parâmetro $i$	
$\nu$	Número de graus de liberdade	
$V_a$	Volume total da amostra	$[m^3]$
$V_f$	Volume final da amostra após a compressão	$[m^3]$
$x_1$	Distância entre o microfone na posição 1 e a superfície da amostra	$[m]$
$x_2$	Distância entre o microfone na posição 2 e a superfície da amostra	$[m]$

Alfabeto Grego:

$\alpha_r$	Coeficiente de reflexão acústica	
$\alpha$	Coeficiente de absorção acústica	
$\xi$	Impedância acústica	$[rayl]$
$\xi'$	Impedância acústica específica	$[rayl]$
$\rho$	Densidade do ar	$[kg/m^3]$
$\Omega$	Porosidade	
$\theta_i$	Coeficiente de sensibilidade do parâmetro $i$	



## RESUMO

Seja em aeronaves, automóveis ou ambiente de trabalho, uma das principais ferramentas para o controle de ruído são os materiais de absorção sonora. O estudo das propriedades desses materiais começaram no século XIX.

Com o surgimento de computadores, vieram as técnicas numéricas que permitiram que os modelos dos materiais de absorção acústica pudessem ser simulados computacionalmente, permitindo a predição do comportamento acústico dos materiais de absorção acústica. Isto reduziu tempo e custo que antes eram gastos com protótipos. Vale lembrar que a tecnologia também permitiu o desenvolvimento de técnicas mais eficazes e rápidas para a determinação das propriedades acústicas desses materiais.

Este trabalho apresenta uma metodologia de estimar a incerteza associada ao processo de medição da resistividade ao fluxo, porosidade, coeficiente de absorção e impedância sonora de materiais porosos tipicamente utilizados em aplicações de controle de ruído. Isto é de fundamental importância já que estas propriedades são utilizadas na caracterização destes materiais. Modelos teóricos de propagação sonora em meios porosos utilizam tais propriedades no processo de predição das propriedades acústicas de materiais porosos.

## **ABSTRACT**

In aircrafts, automobiles or work environment, one of the main tools for noise control is sonorous absorption materials. The study of these materials properties started in the 19<sup>th</sup> century.

With the computers appearance, numerical techniques arisen, allowing that sonorous absorption materials could be simulated by computers as well as its acoustics behavior. By using this computational simulation, time and cost spent with prototypes were reduced. It is worth noticing that technology also allowed developing more efficiently, fast techniques to determine these materials acoustics properties.

This work presents a methodology to estimate the uncertainty associated with the process of air flow resistivity, porosity, absorption coefficient and sonorous impedance measurement of porous materials typically used in noise control applications. This measurement has a fundamental importance, since these properties are used in the characterization of these materials. Theoretical models of sonorous propagation in porous means use such properties in the process of porous materials acoustics properties prediction.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

No projeto de um veículo, seja terrestre ou aéreo, o controle do ruído é um fator importante, pois tem vários objetivos:

- Conforto;
- Facilidade de comunicação;
- Redução das fadigas física e mental;
- Redução da perda auditiva;
- Possibilidade de ouvir sinais sonoros.

Porém, na etapa de projeto, a fabricação de protótipos com o intuito de verificar as condições de ruído no interior (e algumas vezes no exterior) do veículo, além de ser de alto custo, necessita de um tempo muitas vezes precioso para as empresas. Para reduzir este gasto de recursos e tempo, existe a possibilidade da simulação numérica, onde em vez de se produzir um protótipo, utiliza-se um programa de computador que simula as condições de ruído com várias configurações de materiais no veículo. Desta forma, não há a necessidade de fabricação de protótipos para tal finalidade.

Mas, para que a simulação numérica seja adequada, várias características do material devem ser levadas em consideração. Destas características, três delas serão estudadas neste trabalho no sentido de determinação da incerteza de medição das mesmas. São elas: resistividade ao fluxo, porosidade e impedância e absorção acústicas. Para a medição da resistividade existe a Norma ASTM C 522, porém a mesma não traz nenhuma especificação de como se determina a incerteza da medição, assim como existe a Norma ISO 10534-2 que traz uma metodologia para a medição da impedância e absorção acústicas e, novamente, sem nenhuma metodologia para a determinação da incerteza da medição. No caso da medição da porosidade, a bancada desenvolvida para este trabalho não segue uma norma específica e, conseqüentemente, não dispõe de uma metodologia para determinação da incerteza de medição.

Como embasamento inicial deste trabalho, o Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica sobre as bancadas para medição de três características dos materiais porosos (porosidade, impedância acústica e resistividade ao fluxo), trazendo as técnicas de medição e a evolução

das bancadas. Como este trabalho trata da determinação da incerteza das bancadas das propriedades acima, o Capítulo 3 contém uma breve revisão bibliográfica sobre incerteza de medição.

Os Capítulos 4 a 6 trazem as bancadas utilizadas para medição das propriedades assim como os resultados obtidos. Os Capítulos 7 a 9 trazem a metodologia para determinação da incerteza das bancadas utilizadas juntamente com a incerteza das mesmas.

Este trabalho visa determinar uma metodologia de cálculo para a incerteza de três bancadas para medição das propriedades acústicas que são necessárias para a simulação numérica. São elas: resistividade ao fluxo, porosidade e impedância acústica.

A Norma ASTM C 522 [4], que traz a metodologia para determinação da resistividade ao fluxo, comenta que uma incerteza de 5% é tolerável ao correlacionar esta propriedade com as propriedades acústica do material. E, para atingir este requerimento, é necessário que os instrumentos tenham uma incerteza de 2%. Porém, quanto de incerteza realmente se tem ao medir com um conjunto qualquer de equipamentos? Este trabalho traz uma possível metodologia para responder esta questão.

A Norma ISO 10534-2 [7] traz a metodologia para a determinação da impedância e absorção sonora no tubo de impedância, porém não traz uma metodologia para determinar a incerteza utilizando os instrumentos da bancada.

E, como a incerteza proveniente da heterogeneidade das amostras é relativamente grande (como será mostrado nos Capítulos 4, 5 e 6), não se sabe ao certo qual a porcentagem desta incerteza é realmente proveniente da heterogeneidade e qual parcela é proveniente da bancada em si.

Foram utilizados seis materiais diferentes neste trabalho para a análise da incerteza. No corpo deste trabalho são apresentados os resultados de um dos materiais sendo que os resultados dos demais estão em anexos. Isto porque a metodologia para todos os seis materiais é idêntica, mudando somente os resultados obtidos.

A Figura (1.1) traz uma foto dos materiais. Os materiais dos tipos A, B, C e D são compostos por fibras de vidro (lã de vidro) e suas espessuras são (aproximadamente) 25, 50, 10, 10, 5 e

2,5 mm respectivamente. Os tipos E e F são de feltro e suas espessuras são de aproximadamente 5 e 2,5 mm respectivamente.



Figura 1.1 - Foto demonstrando os materiais utilizados. O tipo do material é dado pela letra logo abaixo do mesmo. Os materiais A, B, C e D são compostos por fibras de vidro e os materiais E e F são feltros. Suas espessuras aproximadas são, respectivamente, de 26, 44, 11, 11, 6 e 3 mm.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Introdução

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica dos estudos a respeito da teoria em torno dos materiais porosos, das técnicas de medição e dos modelos matemáticos desenvolvidos para a avaliação dos materiais porosos.

#### 2.2. Propriedades físicas dos materiais

Os modelos matemáticos utilizados para a simulação numérica de materiais porosos são baseados em suas propriedades macroscópicas, o que tornou necessário o desenvolvimento de técnicas de medição que pudessem fornecer valores com precisão adequada.

Bolton [26] alerta para o fato de que a grande maioria dos materiais porosos exhibe valores diferentes para suas propriedades físicas em cada direção. Estes materiais também apresentam heterogeneidade, ou seja, suas propriedades macroscópicas variam ao longo do material. Bolton afirma que é importante lembrar que as propriedades físicas de uma simples amostra não representam precisamente as propriedades médias daquele material.

##### 2.2.1. Resistividade ao fluxo

A resistividade ao fluxo é o parâmetro mais importante do ponto de vista de absorção acústica. Ela é definida como a razão entre a variação de pressão e a vazão de ar através da mesma.

Analisando microscopicamente, a resistividade ao fluxo resulta da formação de uma camada limite viscosa à medida que o fluido se desloca no interior dos poros. Assim, este parâmetro é considerado uma medida do acoplamento viscoso entre as fases fluida e sólida do material poro-elástico, sendo, então, uma medida do potencial de dissipação do som, ou seja, é um parâmetro de elevada importância quando se quer a atenuação ou absorção das ondas sonoras.

### 2.2.1.1. Determinação experimental da resistividade ao fluxo

Os sistemas desenvolvidos para a medição da resistividade ao fluxo podem ser divididos em dois grupos: os indiretos e os diretos.

No método comparativo, utiliza-se uma amostra com resistência ao fluxo conhecida em série com a amostra testada. Como a resistência ao escoamento de uma das duas amostras é conhecida e o escoamento nas duas é igual, por estarem associadas em série, pode-se determinar a resistência ao fluxo da amostra de teste.

No método direto, a resistividade ao fluxo é medida através da relação entre a vazão de ar escoando pela amostra e a diferença de pressão antes e após a mesma. Estas duas medições são determinadas separadamente.

Os sistemas sugeridos em 1941 por Morse [27] e em 1942 por Brown e Bolt [13] são do tipo direto, ou seja, ar é forçado através da amostra, a diferença de pressão é medida com um manômetro e a velocidade ao fluxo é obtida a partir da vazão de água que sai do compartimento onde está a amostra.

Em 1946, Leonard [14] propôs um sistema de medição composto por uma viga em balanço, à qual era fixado um ponteiro e um cilindro imerso numa bacia de querosene. A diferença de pressão era simplesmente gerada alterando-se o peso através de massas numa extremidade da viga de forma a deslocar um cilindro do lado oposto, o qual permanecia imerso na bacia. Este deslocamento produzia uma variação do volume e, conseqüentemente, gerava o fluxo de ar através da amostra. A vazão era obtida medindo-se o tempo e o deslocamento do ponteiro conectado à viga.

Em 1988, Stinson e Daigle [15] sugeriram um sistema eletrônico para a medição de resistividade ao fluxo. As diferenças de pressão foram medidas com transdutores de pressão com capacitância variável, tendo uma resolução de  $10^{-6}$  mmHg. Um controlador de fluxo eletrônico foi usado para manter o fluxo constante. Este método é comparativo, pois utiliza-se amostra calibrada em série com a amostra em teste. A grande contribuição deste método é a velocidade na obtenção dos resultados. Comparações com resultados utilizando o método de Leonard foram realizadas de forma a comprovar a precisão do método. O método mostrou ser preciso e 20 a 50 vezes mais rápido que o método tradicional de Leonard.

Em seu livro, Ingard [16] sugere um sistema bastante simples para medição de resistência ao fluxo. Neste método o fluxo através da amostra fixada ao tubo é produzido por um pistão com peso conhecido que desce sob a ação da gravidade podendo estar na vertical ou inclinado. Assim, a velocidade do pistão depende da resistência da amostra. O pistão atinge rapidamente a sua velocidade final, a qual é determinada medindo-se o tempo para o pistão descer uma certa distância ao longo do tubo. Quando o pistão atinge sua velocidade final a queda de pressão através da amostra será a mesma através do pistão se a força de fricção do pistão contra as paredes for desprezada.

A medição da resistividade ao fluxo em materiais acústicos é padronizada pela norma ASTM C 522 [17]. Esta norma define as grandezas envolvidas e descreve principalmente os cuidados que devem ser tomados durante as medições. Desta forma, no presente trabalho, o sistema construído baseou-se nas recomendações desta norma. A Figura 2.1 ilustra o sistema de medição apresentado na norma.

Uma bomba de vácuo ou compressor pode ser utilizada para gerar um fluxo de ar positivo ou negativo através da amostra. A diferença de pressão através da amostra é medida através de um medidor de pressão diferencial para cada vazão, esta também medida por um dispositivo correspondente. Desta forma, pode-se ir gradualmente aumentando a vazão de forma a obter uma curva de resistência ao fluxo em função da velocidade do fluxo. A norma recomenda obter várias medições no regime linear e fazer a média destas medições. Apenas aquelas medições cujos valores de resistência ao fluxo tiverem diferença maior que 5 % em relação à média devem ser desconsideradas. Para as medições realizadas na faixa de temperatura  $22\pm 3$  °C e de pressão atmosférica  $95\pm 15$  kPa não é necessário inserir correções nos valores calculados.

Um detalhe importante quanto à Figura 2.1 com relação ao medidor de pressão diferencial é que um dos lados do medidor não está conectado logo após a amostra. Isto se deve ao fato de que como o tubo é aberto, as velocidades de escoamentos máximas não são altas (50 mm/s) e sendo o comprimento do tubo após a amostra curto, a pressão logo após a amostra é praticamente igual à atmosférica, sendo que os instrumentos de medição normalmente utilizados para medição da pressão não tem a capacidade de perceber esta diferença.



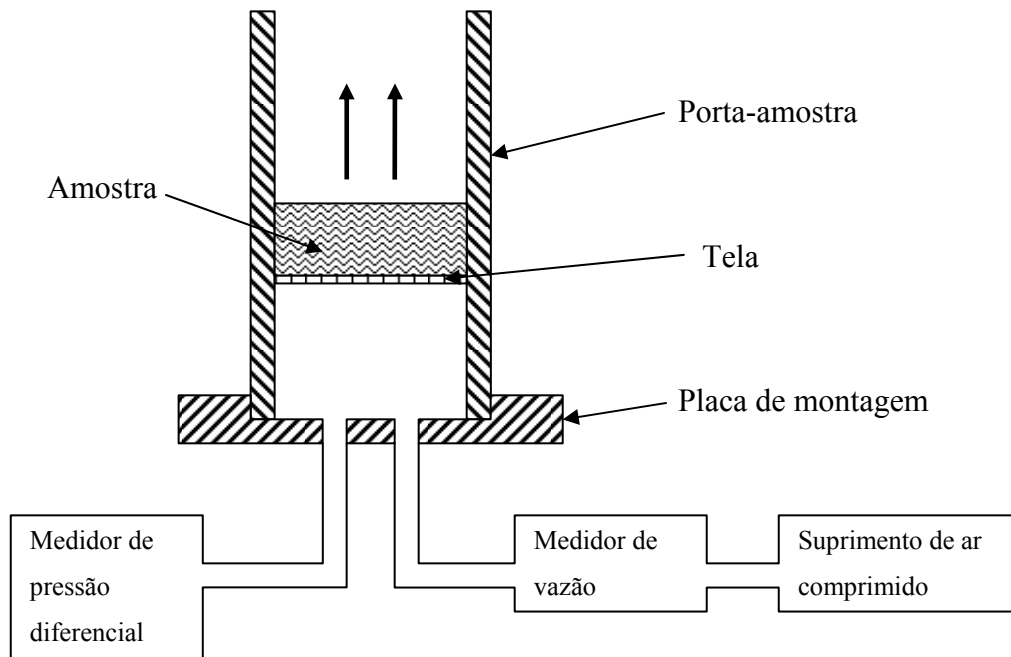


Figura 2.1 - Sistema de medição proposto pela norma ASTM C 522

Para materiais anisotrópicos as medições devem ser realizadas em mais de uma direção. A maioria dos modelos consideram os materiais porosos como sendo isotrópicos do ponto de vista macroscópico. Porém, existem casos com alto grau de anisotropia onde é importante considerar tal característica no modelo. Além disso, devido à sua heterogeneidade, a resistividade ao fluxo de um material poroso deve ser obtida a partir da média de várias amostras. Na norma recomenda-se que no mínimo 3 amostras sejam avaliadas.

O método da Norma ASTM C 522 [17] foi desenvolvido para a medição de valores de resistividade ao fluxo na faixa de 100 a 10.000 SI rayls, com velocidades de escoamento de ar lineares variando de 0,5 a 50mm/s e diferença de pressão antes e após a amostra de 0,1 a 250 Pa. O limite máximo do escoamento é o ponto onde o fluxo de ar através da amostra da maioria dos materiais porosos está na completa ou parcial transição entre escoamento laminar a turbulento.

A resistência ao fluxo, que é a resistência que o material ou amostra tem em relação ao fluxo de ar dentro do mesmo, é determinada pela Eq. (2.1):

$$r = \frac{S \cdot P}{U}, \quad (2.1)$$

sendo,

$r$  a resistência ao fluxo em [rayls],

$P$  a diferença de pressão antes e após a amostra [Pa],

$U$  a vazão volumétrica do fluxo de ar [m<sup>3</sup>/s],

$S$  a área da seção do tubo [m<sup>2</sup>].

A resistência ao fluxo depende da espessura da amostra, o que dificultaria para levar em consideração diferentes espessuras de um mesmo material. Para resolver este problema, divide-se a resistência ao fluxo pela espessura da amostra, tornando o parâmetro, agora chamado de resistividade ao fluxo, independente da espessura do material.

$$r_0 = \frac{S \cdot P}{U \cdot T}, \quad (2.2)$$

onde,

$T$  a espessura da amostra [m].

Alguns detalhes importantes na medição da resistividade ao fluxo é que o escoamento dentro da amostra precisa ser laminar. E, para que isto ocorra, é recomendado que a velocidade linear do escoamento não ultrapasse 50 mm/s. Mesmo com o escoamento abaixo deste valor, é recomendado plotar o gráfico da resistividade pela vazão (ou velocidade do escoamento). Enquanto a resistividade permanecer constante, o escoamento é laminar. A Figura 2.2 traz um gráfico simulando esta situação, com escoamento turbulento a partir de uma velocidade de escoamento de 40 mm/s.

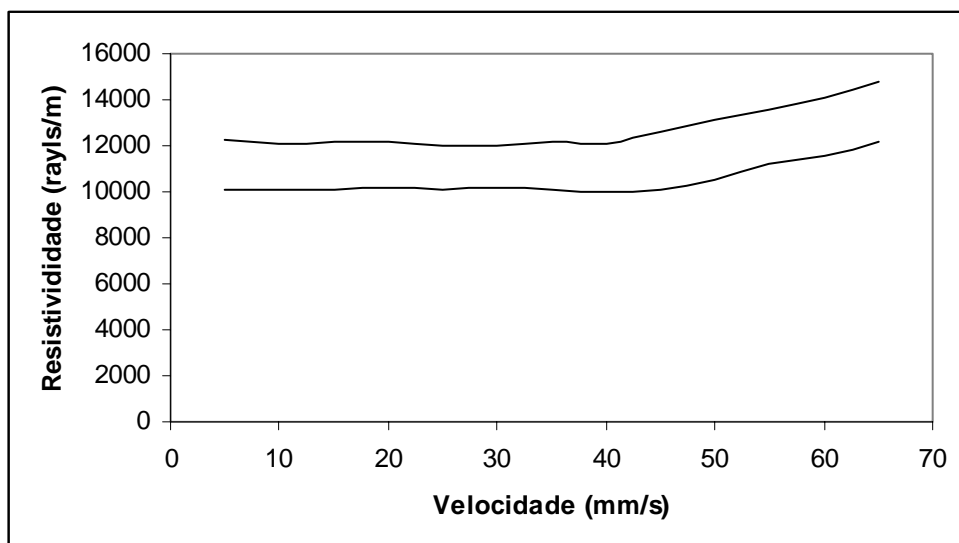


Figura 2.2 – Exemplo do limite do escoamento para uma amostra.

É importante verificar que a Norma não traz uma metodologia de cálculo de incerteza para a bancada de resistividade ao fluxo. O que é fornecido na mesma é que um erro de  $\pm 5\%$  na determinação da resistividade ao fluxo é tolerável ao correlacionar esta propriedade com as propriedades acústicas de materiais porosos. E, para obter esta margem de erro, os instrumentos utilizados devem conter uma incerteza de 2%. Este trabalho desenvolverá uma metodologia para a determinação desta incerteza.

### **2.2.2. Porosidade**

A porosidade de um material é definida pela razão de volume ocupado pelo fluido dentro dos poros e o volume total do material poroso. Assim, a porosidade varia de um valor nulo (zero) até a unidade.

Já que a porosidade quantifica a relação de ocupação das fases sólida e fluida dentro do volume do material poroso, é um parâmetro importante nas teorias de propagação do som em materiais porosos. A porosidade típica para aplicações de controle de ruído é normalmente alta, na faixa de 0,9, sendo que pode-se encontrar porosidade maior que 0,98.

Como a porosidade da maioria das espumas de controle de ruído é tão alta, e, também, como a porosidade tende a cair em uma faixa estreita, ela geralmente não é um parâmetro muito importante para definir a diferença de desempenho entre materiais típicos de controle de ruído. Entretanto, boa parte da dissipação de energia interna em um material poroso se deve ao movimento relativo entre as fases sólida e fluida e, para que isso ocorra, os poros devem estar conectados, ou seja, que o ar consiga passar entre os mesmos. Caso contrário, o material não exibirá boas propriedades acústicas e deverá ser modelado como sólido elástico em vez de poroso.

#### **2.2.2.1. Determinação experimental da porosidade**

Um dos primeiros sistemas de medição de porosidade foi desenvolvido por Beranek [18] em 1942. Neste artigo, ele apresentou um modelo para prever a impedância acústica de um material poroso para incidência normal e oblíqua. Neste modelo simplificado, propriedades tais como resistência ao fluxo e porosidade foram utilizadas para caracterizar o material. Logo, Beranek utilizou o sistema proposto por Brown e Bolt [13] para determinar a resistência ao fluxo e apresentou um método para obter a porosidade.

O método baseia-se na Lei de Boyle ou Lei dos gases perfeitos para um processo isotérmico. Inicialmente o recipiente contendo a amostra está à pressão atmosférica. Em seguida um pistão é utilizado para lentamente variar a pressão no interior do recipiente. Com as variações da pressão e de volume ocasionadas pela variação da posição do pistão, pode-se determinar a porosidade do material.

O aparato experimental do sistema proposto por Beranek [18] era constituído de um recipiente para a fixação da amostra e um manômetro de coluna de água em forma de U que podia ser deslocado verticalmente. Assim, a variação de pressão era provocada alterando-se a altura do manômetro e calculada medindo-se a diferença de altura nas colunas de água. A variação de volume era obtida simplesmente registrando-se a variação da altura da coluna de água logo abaixo do recipiente da amostra. A principal limitação deste método é o rígido controle necessário para manter a temperatura constante.

Em 1948, Leonard [19] apresentou um método dinâmico em que a porosidade era estimada a partir da compliância do ar no interior da amostra. De acordo com Leonard, as principais vantagens de seu método em relação ao proposto por Beranek [18] era o fato de não necessitar controle de temperatura e conseguir resultados de forma bastante rápida. Existem poucos detalhes neste artigo, logo, aparentemente este sistema poderia dar bons resultados para amostras cuja compliância fosse relativamente baixa, ou seja, para materiais porosos com carcaça rígida. Os fatores indicativos disto são a necessidade de calibração com amostras de metal com porosidade conhecida e o fato da compliância da carcaça não ter sido considerada no modelo teórico. Este modelo, utilizado para relacionar compliância e porosidade, baseava-se num circuito elétrico análogo ao sistema mecânico.

Champoux et al. [20], em 1991, utilizaram o princípio do sistema de Beranek [18] e instrumentos com alta precisão para obter a porosidade. Aperfeiçoamentos tais como o uso de pistão com controle de deslocamento e de dimensões com alta precisão e transdutores eletrônicos de pressão possibilitaram resultados precisos para amostras de várias porosidades. Além disso, técnicas para melhorar a estabilidade da temperatura foram utilizadas e o monitoramento da variação de pressão era realizado através de uma interface com um computador.

Em 2003, Leclaire et al. [21] apresentaram uma forma alternativa de obter a porosidade inspirando-se no trabalho de Beranek. Em seu trabalho, Leclaire et al. apresentaram melhoramentos no sistema de medição da porosidade denominado picnômetro de ar, o qual é

padronizado pela norma ASTM D 2856 [22]. Assim como a norma, o método proposto por Leclaire et al. utiliza câmara de referência.

Segundo Leclaire et al. [21], a principal vantagem é que não existe a necessidade de controle rígido da temperatura, já que as variações das condições ambientes ocorrem nas 2 câmaras ao mesmo tempo e, logo, sofrem um cancelamento quase que total, reduzindo significativamente o efeito da temperatura. A desvantagem seria o tempo, já que são necessários cerca de 20 minutos para calibração e mais 15 minutos para determinar a porosidade. Além disso, uma boa precisão é obtida somente para materiais de baixa porosidade, pois os erros crescem com o aumento da porosidade.

Em 2005, Panneton e Gros [23] apresentaram um novo método para a determinação da porosidade utilizando o Princípio de Arquimedes. Desta forma, a porosidade é obtida comparando-se o peso da amostra no vácuo e no ar. A diferença encontrada está diretamente relacionada com o peso do volume de ar deslocado pela fase sólida.

Além das formas diretas de medição da porosidade mostradas, existem ainda técnicas que utilizam ultra-som para estimar a porosidade e a tortuosidade de forma indireta [25, 26]. Estas técnicas baseiam-se em modelos de material poroso rígido para altas frequências. As propriedades são estimadas indiretamente através de um ajuste ao modelo teórico. Conseqüentemente, resultados precisos só podem ser obtidos se a suposição de carcaça rígida representar de forma adequada o material em teste.

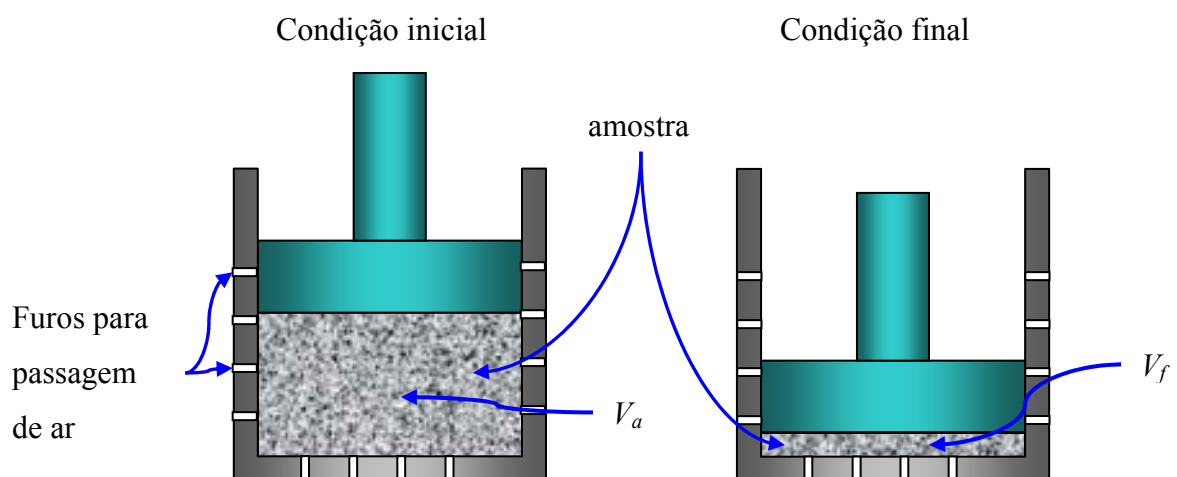


Figura 2.3- Sistema mecânico para medição da porosidade

Além das técnicas já discutidas, existe uma outra forma, ainda que possa não ser tão precisa, de estimar a porosidade de forma bastante fácil e rápida. A Figura 2.3 mostra o sistema que

pode ser utilizado. A amostra é colocada em recipiente e comprimida mecanicamente até que o ar no interior dos poros seja completamente eliminado. Logo, medindo-se o volume inicial  $V_a$  da amostra e o volume final que é igual ao volume da parte sólida  $V_f$ , pode-se obter a porosidade pela Eq. 2.3.

$$\Omega = 1 - \frac{V_s}{V_t}. \quad (2.3)$$

Esta técnica, apesar de não ser a ideal, pode fornecer uma boa estimativa em muitos casos. Quando a amostra é submetida à elevada carga de compressão e sofre deformação, o ar presente nos poros abertos e fechados é eliminado. Isto faz com que a porosidade seja superestimada. Assim, este erro será pequeno se existirem poucos volumes fechados no interior do material. As principais vantagens deste método são a ausência de equipamentos sofisticados e a rapidez. Além disso, é importante observar que a porosidade de materiais tipicamente utilizados para controle de ruído é maior que 90 %. Logo, resultados aproximados obtidos por este método não reduzem a precisão da predição dos modelos teóricos de forma significativa. No presente trabalho optou-se por este método para obter a porosidade dos materiais analisados.

### **2.2.3. Absorção e impedância acústica**

O desempenho de um material de absorção acústica é caracterizado pelo seu coeficiente de absorção para incidência de ondas planas e aleatórias, sendo uma medida da fração da energia acústica que é absorvida pelo material. O coeficiente de absorção acústica para uma incidência normal de uma amostra pode ser medido utilizando-se um tubo de ondas estacionárias. O coeficiente de absorção para incidência aleatória pode ser medido em uma câmara reverberante.

Nesta dissertação será estudada a incerteza na medição do coeficiente de absorção acústica no tubo de impedância. Assim sendo, segue abaixo uma explicação do procedimento que será utilizado.

### **2.2.3.1. Medição da absorção acústica em um tubo de impedância**

O método da onda estacionária é um dos métodos de medição do coeficiente de reflexão dos materiais de absorção acústica em dutos. Apesar de simples e preciso, é muito lento devido ao uso de frequências discretas.

Em 1977, Seybert e Ross [29] desenvolveram o método da função de transferência, hoje considerado o método padrão para a medição do coeficiente de reflexão e o coeficiente de absorção sonora, segundo a Norma ISO 10534-2 [28]. Consistia em gerar um ruído branco no interior do tubo, em cuja terminação está a amostra, e medir a densidade espectral de potência e a densidade espectral cruzada dos microfones localizados junto à parede do tubo.

Em 1980, Chung e Blaster [30] aperfeiçoaram o trabalho de Seybert e Ross, deduzindo uma expressão para a determinação do coeficiente de reflexão complexo usando a função de transferência entre os dois microfones.

Em 1986, Chu [31], adaptou o método da função de transferência para ser usado com somente um microfone. Usando um sinal periódico pseudo-randômico e aproveitando o fato do mesmo ser estacionário, não havia necessidade de se obterem os dois sinais simultaneamente. Desta forma, eliminavam-se os erros e dificuldades associados à diferença de fase entre os microfones. Chu também determinou os efeitos da distância entre as duas posições do microfone sobre a faixa de validade da medição. Porém, vale lembrar que o fato de se utilizar um microfone, torna o processo de medição mais lento.

Bodén e Abom [32,33] desenvolveram uma série de estudos sobre os erros inerentes ao método da função de transferência. A partir das medições e simulações numéricas, foram sugeridos alguns cuidados durante as medições, relacionados ao comprimento do tubo, posição dos microfones e sensibilidade da medição na faixa de frequência. O segundo trabalho aprofundou-se no estudo dos erros devidos à atenuação entre os microfones.

O princípio de operação do tubo de impedância é baseado na interação de duas ondas planas, sendo uma incidente e uma refletida. O esquema de montagem utilizado nesta técnica é mostrado na Figura 2.4.

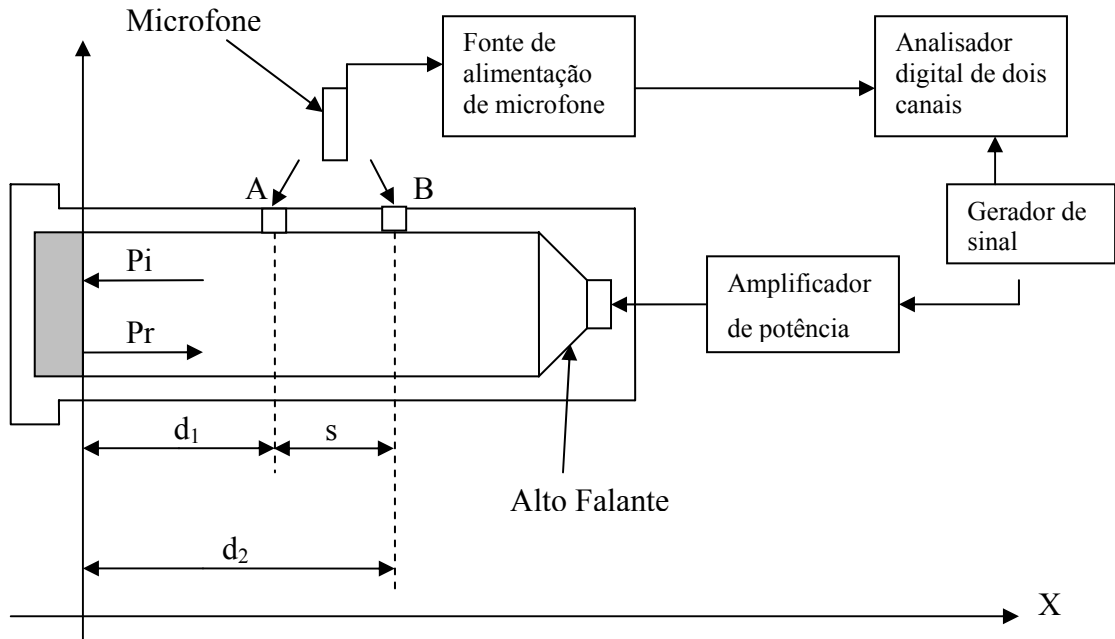


Figura 2.4 - Esquema de montagem da técnica de um microfone

Nestas condições, no interior do tubo, tem-se:

$$P_i = Ae^{i(\omega t + kx)} \quad (2.4)$$

e

$$P_r = Ae^{i(\omega t - kx)} \quad (2.5)$$

Considerando a pressão total no interior do tubo, Eq. (2.4) e (2.5), nas posições A e B, tem-se:

$$P_B = e^{i\omega t} [Ae^{ikd_2} + Be^{-ikd_2}] \quad (2.6)$$

e

$$P_A = e^{i\omega t} [Ae^{ikd_1} + Be^{-ikd_1}] \quad (2.7)$$

A função de resposta em frequência ou função de transferência entre os sinais obtidos nas posições B e A é então dada pela Eq. (2.8):

$$H_{AB} = \frac{P_B}{P_A} = \frac{[Ae^{ikd_2} + Be^{-ikd_2}]}{[Ae^{ikd_1} + Be^{-ikd_1}]} = \frac{[e^{ikd_2} + (B/A)e^{-ikd_2}]}{[e^{ikd_1} + (B/A)e^{-ikd_1}]} \quad (2.8)$$



Portanto, o módulo da razão das amplitudes é dado pela Eq. (2.9):

$$|B/A| = \left| \frac{H_{AB} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AB}} \right| \quad (2.9)$$

onde  $s = d_2 - d_1$ .

No tubo de ondas estacionárias o coeficiente de reflexão  $\alpha_r$  é determinado pela Eq. 2.10:

$$\alpha_r = \frac{|P_r^2|}{|P_i^2|} = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (2.10)$$

Considerando-se que a energia sonora transmitida para fora do tudo, através da tampa, é nula, o coeficiente de absorção  $\alpha$  pode ser determinado pela Eq. (2.11):

$$\alpha = 1 - \alpha_r = 1 - \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (2.11)$$

Substituindo o valor de  $|B/A|$  na Eq. (2.9), tem-se a Eq. (2.12):

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|^2 \quad (2.12)$$

Observando a Eq. (2.12), pode-se notar que uma vez definida a distância entre as duas posições de medição  $s$ , deve-se determinar a função de resposta em frequência para que  $\alpha$  seja obtido. A função de transferência é, por definição definida pela Eq. (2.13):

$$H_{AB} = \frac{P_B}{P_A} = \frac{G_{AB}}{G_{AA}} \quad (2.13)$$

onde,

$G_{AB}$  é o espectro cruzado de  $P_A$  e  $P_B$ , dado pela Eq. (2.14):

$$G_{AB} = (P_A^*)(P_B) \quad (2.14)$$

$G_{AA}$  é o espectro de potência de  $P_A$ , dado pela Eq. (2.15):

$$G_{AA} = (P_A)(P_A^*) \quad (2.15)$$

A equação de  $H_{AB}$  pode ainda ser escrita pela Eq. (2.16):

$$H_{AB} = \frac{(P_A^* P_B)(SS^*)}{(P_A P_A^*)(SS^*)} \quad (2.16)$$

ou

$$H_{AB} = H_{AS} H_{SB} \quad (2.17)$$

onde,

\* é o complexo conjugado,

$SS^*$  é o espectro de potência do sinal do gerador, responsável pelo campo acústico no interior do tubo,

$H_{AS}$  é a função de transferência entre o sinal do microfone na posição  $A$  e o sinal do gerador,

$H_{SB}$  é a função de transferência entre o sinal do gerador e o sinal do microfone na posição  $B$ .

Supondo que o processo seja estacionário,  $H_{AS}$  e  $H_{SB}$  não necessitam ser calculadas simultaneamente. Portanto, um único microfone poderá ser utilizado para medir, sequencialmente, a pressão nas posições  $A$  e  $B$ . A função  $H_{AB}$ , necessária para a determinação do coeficiente de absorção, é obtida através da Eq. (2.17).

Devem ser destacadas, ainda, três grandes vantagens desta técnica para determinação do coeficiente de absorção, que utiliza um microfone e analisador digital de dois canais, em relação ao método clássico:

- 1) maior rapidez do método digital na determinação do coeficiente de absorção (cerca de 30 vezes mais rápido);
- 2) fornece uma curva do coeficiente de absorção praticamente contínua, já que a discretização do sinal pode implicar, em alguns casos, numa resolução da ordem de décimos de Hz;

- 3) dispensa um tubo de ondas estacionárias de grande comprimento para medições em baixas frequências, tendo-se um tubo menor e fácil de manusear.

Tem-se mais uma função de elevada importância que deve ser determinada durante as medições do coeficiente de absorção, que é a função de coerência. Esta função, com valores entre 0 e 1, mede o grau de casualidade entre dois sinais quaisquer. Nesta medição, ela pode ser usada para verificar a validade da estimativa da função de transferência  $H_{AP}$  obtida. Através da função de coerência pode-se quantificar a confiabilidade no cálculo da função  $H_{AP}$  e, conseqüentemente, na curva de absorção determinada.

A função coerência é definida pela Eq. (2.18):

$$\gamma_{AB}^2 = \frac{|G_{AB}|^2}{G_{AA}G_{BB}} \quad (2.18)$$

Conforme ocorre com a função de transferência, quando se utiliza a técnica de um microfone, não é possível determinar a função de coerência de forma direta. No entanto, pode-se escrever:

$$\gamma_{AB}^2 = \frac{|P_A^* P_B|^2}{(P_A^* P_A)(P_B^* P_B)} \quad (2.19)$$

ou

$$\gamma_{AB}^2 = \gamma_{AS}^2 \gamma_{SB}^2 \quad (2.20)$$

As funções  $\gamma_{AS}^2$  e  $\gamma_{SB}^2$  são obtidas quando o microfone ocupar, respectivamente, as posições A e P. A função coerência  $\gamma_{AB}^2$  é determinada pela Eq. (2.20).

A impedância acústica é determinada pela Eq. (2.21):

$$\xi = \frac{Z_1}{Z_0} = \frac{1 + \alpha_r}{1 - \alpha_r} \quad (2.21)$$

sendo:

$Z_1$  – impedância acústica da amostra;

$Z_0$  – impedância acústica específica do meio.

A impedância específica pode ser determinada pela Eq. (2.22):

$$\xi' = \frac{1}{\rho \cdot c_0} \frac{1 + \alpha_r}{1 - \alpha_r} \quad (2.22)$$

Sendo que a velocidade do som no ar  $c_0$  pode ser estimada pela Eq. (2.23):

$$c_0 = 343,2 \sqrt{\frac{T}{293}} \text{ m/s} \quad (2.23)$$

e, a densidade do ar por:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_a \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (2.24)$$

onde,

T é a temperatura [K],

$p_a$  é a pressão atmosférica [kPa],

$T_0 = 293$  K,

$p_0 = 101,325$  kPa

$\rho_0 = 1,186$  kg/m<sup>3</sup>

## CAPÍTULO 3

### INCERTEZA DE MEDIÇÃO

#### 3.1. Introdução

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento do valor exato do mensurando. Este resultado, mesmo após correções de efeitos sistemáticos conhecidos, é ainda uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita para efeitos sistemáticos.

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incertezas em uma medição, sendo que algumas delas estão listadas abaixo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não representativa, ou seja, a amostra medida pode não representar o mensurando a ser medido;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Vale lembrar que estas fontes de incertezas não necessariamente são independentes umas das outras. De a) a i) podem contribuir para a fonte j). Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para seu erro.

Temos duas formas de avaliar as incertezas, a avaliação do Tipo A e a avaliação do Tipo B. A primeira é um método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações. A segunda, um método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações.

O propósito da classificação Tipo A e Tipo B é de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza, sendo que a classificação não propõe que haja qualquer diferença na natureza dos componentes resultando dos dois tipos de avaliação. Ambos os tipos são baseados em distribuição de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão.

Se, numa medição, todas as grandezas das quais o resultado depende forem variadas, sua incerteza poderá ser calculada por meios estatísticos. Entretanto, na prática, isso é raramente possível devido ao tempo e recursos limitados. A incerteza de um resultado de medição é, geralmente, avaliada utilizando-se um modelo matemático da medição e a lei da propagação da incerteza.

### 3.2. Modelando a medição

Na maioria dos casos o mensurando  $Y$  não é medido diretamente, e sim determinado a partir de  $N$  outras grandezas  $X_1, X_2, \dots, X_N$  através de uma relação funcional  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.1)$$

As grandezas de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , das quais a grandeza de saída  $Y$  depende, podem elas mesmas ser consideradas como mensurandos e depender de outras grandezas, incluindo correções e fatores de correção para efeitos sistemáticos, levando, a uma complicada relação funcional  $f$ , que nunca poderá ser escrita de modo explícito. Além disso,  $f$  pode ser determinada experimentalmente ou existir somente como um algoritmo que terá de ser resolvido numericamente.

### 3.2.1. Avaliação da incerteza padrão tipo A

Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível da esperança ou valor esperado  $\mu_q$  de uma grandeza  $q$  que varia aleatoriamente e para a qual  $n$  observações independentes  $q_k$ , foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética  $\bar{q}$  das  $n$  observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.2)$$

As observações individuais  $q_k$  diferem em valor por causa de variações aleatórias nas grandezas de influência, ou dos efeitos aleatórios. A variância experimental das observações, que estima a variância  $\sigma^2$  da distribuição de probabilidade de  $q$ , é dada pela Eq. (3.3):

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (3.3)$$

Esta estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva  $s(q_k)$ , denominada desvio padrão experimental, caracterizam a variabilidade dos valores  $q_k$  observados ou então, sua dispersão em torno de sua média  $\bar{q}$ . E a variância experimental da média é dada pela Eq. (3.4):

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3.4)$$

e o desvio padrão pela Eq. (3.5):

$$s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{s^2(q_k)}{n}} \quad (3.5)$$

A variância experimental  $s^2(\bar{q})$  e o desvio padrão experimental da média  $s(\bar{q})$ , quantificam quão bem  $\bar{q}$  estima a esperança  $\mu_q$  de  $q$ , e qualquer um deles pode ser usado como uma medida da incerteza de  $\bar{q}$ .

### 3.2.2. Avaliação da incerteza padrão tipo B

Para uma estimativa  $x_i$  de uma grandeza de entrada  $X_i$  que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada  $u^2(x_i)$  ou a incerteza padrão  $u(x_i)$  é

avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de  $X_i$ . O conjunto de informações pode incluir:

- dados de medições prévias;
- a experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- especificações do fabricante;
- dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

O uso adequado do conjunto de informações disponíveis para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão exige o discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral, sendo esta uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. A avaliação do Tipo B pode ser tão confiável quanto a do Tipo A, especialmente se a do Tipo A é baseada em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes.

Uma situação bastante comum é a de analisar a incerteza do mostrador do instrumento, já que o mesmo tem uma resolução limitada. Este erro é proveniente do arredondamento, ou do operador (quando o mostrador é analógico) ou do próprio mostrador (quando o mostrador é digital).

Quando se trata de um mostrador analógico, a incerteza é usualmente calculada através da expressão (3.6):

$$u = \frac{a}{2}, \quad (3.6)$$

sendo,

$u$  a incerteza proveniente do arredondamento,

$a$  é a resolução do dispositivo mostrador.

Quando se trata de um mostrador digital, a incerteza é usualmente calculada através da expressão (3.7):

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.7)$$



### 3.3. Incerteza padrão combinada

Depois de determinar a incerteza padrão de cada variável numa dada medição, encontra-se a incerteza padrão combinada do mensurando em questão. Existem dois tipos de determinação da incerteza padrão combinada: para grandezas correlacionadas e não correlacionadas.

#### 3.3.1. Grandezas de entrada não correlacionadas

A incerteza padrão de  $y$ , onde  $y$  é a estimativa do mensurando  $Y$ , e desta forma, o resultado da medição é obtido pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Esta incerteza padrão combinada da estimativa  $y$  é representada por  $u_c(y)$ .

A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é a raiz quadrada positiva da variância  $u_c^2(y)$ , que é dada pela Eq. (3.8):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (3.8)$$

Na Eq. (3.8), cada  $u(x_i)$  é uma incerteza padrão avaliada como descrito em 3.1.1 (avaliação Tipo A) e 3.1.2 (avaliação Tipo B). A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando  $Y$ .

As derivadas parciais  $\partial f / \partial x_i$  são freqüentemente denominadas de coeficientes de sensibilidade e descrevem como a estimativa de saída  $y$  varia com alterações nos valores das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . A variância combinada  $u_c^2(y)$  pode, desse modo, ser vista como a soma de termos, onde cada um deles representa a variância estimada associada com a estimativa de saída  $y$  gerada pela variância estimada, associada com cada estimativa de entrada  $x_i$ .

Os coeficientes de sensibilidades podem também ser calculados experimentalmente, medindo-se a variação em  $Y$  causada por uma variação em um dado  $x_i$ , enquanto se mantém as demais grandezas de entrada constantes.

### 3.3.2. Grandezas de entrada correlacionadas

Quando as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada  $u_c^2(y)$ , associada com o resultado de uma medição, é dada pela Eq. (3.9):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.9)$$

onde  $x_i$  e  $x_j$  são as estimativas de  $X_i$  e  $X_j$  e  $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$  é a covariância estimada, associada com  $x_i$  e  $x_j$ .

### 3.4. Incerteza expandida

Embora  $u_c(y)$  possa ser universalmente usada pra expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão, é muitas vezes necessário dar uma medida de incerteza, definida em um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

A medida adicional de incerteza que satisfaz o parágrafo acima é denominada incerteza expandida e é representada por  $U$ . A incerteza expandida é dada pela Eq. (3.10):

$$U = k_f u_c(y), \quad (3.10)$$

sendo,

$k_f$  fator de abrangência.

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como  $Y = y \pm U$ , que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando  $Y$  é  $y$ , e que  $y-U$  a  $y+U$  é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a  $Y$ . Tal intervalo é também expresso como  $y - U \leq Y \leq y + U$ .

A incerteza expandida é calculada da seguinte forma:

- 1) Determina-se a correção de cada parâmetro;
- 2) Determina-se a incerteza de cada parâmetro;
- 3) Calcula-se a incerteza combinada;
- 4) Calcula-se o número de graus de liberdade para a incerteza combinada;
- 5) Calcula-se a incerteza expandida.

A determinação da correção de cada parâmetro é dado através de cartas de calibração e/ou valores conhecidos através da experiência com o devido instrumento, assim como a incerteza.

A incerteza combinada é dada pela Eq. (3.11):

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2, \quad (3.11)$$

sendo,

$u_c$  a incerteza combinada,

$u_i$  a incerteza da  $i$ -ésima fonte de incerteza.

O número de graus de liberdade efetivo é dado pela Eq. (3.12):

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}}, \quad (3.12)$$

sendo,

$v_{ef}$  o número de graus de liberdade efetivos da incerteza combinada,

$u_i$  a incerteza da  $i$ -ésima fonte de incerteza,

$v_i$  o número de graus de liberdade da  $i$ -ésima fonte de incerteza.

Com o número de graus de liberdade efetivo, pode-se determinar o coeficiente “t” de student adequado para a determinação da incerteza expandida, dada pela Eq. (3.13):

$$U = t \cdot u_c, \quad (3.13)$$

sendo,

$U$  a incerteza expandida,

$t$  o coeficiente de student,

$u_c$  a incerteza combinada.

Com a incerteza expandida, podemos finalmente determinar o resultado de medição da amostra através da Eq. (3.14):

$$RM = \bar{I} + C_C \pm U, \quad (3.14)$$

sendo,

$RM$  o resultado da medição,

$\bar{I}$  a média da amostra,

$C_C$  a correção combinada,

$U$  a incerteza expandida.

## CAPÍTULO 4

### RESISTIVIDADE AO FLUXO

#### 4.1. Introdução

Este capítulo trata de uma das possíveis formas de medição da resistividade ao fluxo de uma amostra normalmente utilizada para tratamento acústico. Após a descrição da metodologia e de bancada utilizada para a medição desse parâmetro, têm-se os resultados obtidos juntamente com uma breve discussão sobre os mesmos.

#### 4.2. Medição da resistividade ao fluxo

A bancada para a medição deste parâmetro neste trabalho foi desenvolvida utilizando a norma ASTM C 522, a qual já foi apresentada no Capítulo 2. Esta norma cobre a medição da resistividade ao fluxo de materiais porosos que podem ser utilizados para a absorção e atenuação das ondas acústicas.

A resistência ao fluxo, medida desta forma, difere dos resultados medidos pelo tubo de impedância (o qual não será discutido nesta dissertação), devido a dois motivos.

1. na presença do som, a velocidade da partícula dentro do material poroso é alternada, enquanto neste método tem uma direção e sentido preferencial;
2. a velocidade da partícula dentro do material poroso não é a mesma da linear medida fora da amostra, ou seja o escoamento deve ser laminar dentro da amostra. Mesmo sendo o escoamento laminar fora, não garante que será no interior da mesma.

##### 4.2.1. Bancada

Conforme já descrito no tópico 2.2.1, a medição da resistividade ao fluxo de materiais porosos é padronizada pela Norma ASTM C 552, que contém os procedimentos experimentais recomendados, sugestões de fixação e cuidados que devem ser tomados durante as medições.

O porta-amostra (Figura 2.1) foi construído a partir de um cilindro de ferro fundido, o qual foi usinado internamente para um diâmetro de 97mm. Assim como o porta-amostra, a placa de montagem foi fabricada em ferro fundido. O encaixe entre os dois foi também usinado. As saídas para tomada de pressão e entrada do escoamento de ar foram produzidas através de processos de furação. Foram feitos vários furos nas laterais do tubo, todos à mesma altura, e passou-se um fio de nylon por esses furos, confeccionando assim a tela. Para evitar vazamentos pelos furos da tela, preencheram-se os furos com silicone. É importante salientar que a área não é significativamente alterada pelos fios de nylon e tampouco afeta de forma perceptível o escoamento já que as velocidades de escoamento são baixas. A Figura 4.2 traz uma foto da bancada. O porta-amostra e a placa de montagem foram soldados para evitar vazamento de ar na união. Antes da soldagem, fez-se um teste em que o tubo era preenchido de água e verificou-se que vazava água na união entre os dois. Após a soldagem, não houve mais vazamentos.



Figura 4.2 – Foto da bancada para medição da resistividade ao fluxo.

O medidor de pressão diferencial utilizado foi um manômetro digital series 475 Mark III modelo 475-000-FM fabricado pela Dwyer. Este manômetro possui uma precisão de  $\pm 0,5\%$  do fundo de escala, uma histerese de  $\pm 0,1\%$  do fundo de escala e tem uma faixa de medição de 0 a 0,249 kPa ou 0 a 1 polegada de coluna d'água, com divisão de escala de 0,001 em qualquer uma das duas unidades. Sendo o instrumento mais sensível às variações de pressão na escala inglesa (polegada de coluna d'água), portanto esta foi a escala utilizada nas medições. Os resultados após as medições eram convertidos para o SI. A Figura 4.3 traz uma foto do manômetro.



Figura 4.3 – Foto do manômetro digital

O medidor de vazão utilizado foi um rotâmetro analógico series VFB VISI-FLOAT da Dwyer. Este rotâmetro tem uma incerteza de 3% do fundo de escala e a faixa de medição é de 1 à 20 l/m, com divisão de escala de 0,5 l/m. A Figura 4.4 traz uma foto do rotâmetro.



Figura 4.4 – Foto do rotâmetro

O escoamento de ar foi gerado através de um tanque de ar comprimido que o Laboratório de Vibrações e Acústica dispõe.

#### **4.2.2. Metodologia da medição da resistividade ao fluxo**

A norma ASTM C 522 traz as seguintes recomendações: as velocidades mínima e máxima do escoamento é de 0,5 e 50 mm/s respectivamente. Neste trabalho as velocidades mínima e máxima linear do escoamento foram de 9 e 45 mm/s respectivamente. A diferença de pressão antes e após a amostra deve estar na faixa de 0,1 a 250 Pa. Neste trabalho a diferença de pressão esteve na faixa de 1 a 80 Pa. A resistência ao escoamento de fluido deve estar na faixa de 100 a 10.000 rayls. Neste trabalho a resistência ao escoamento das amostras girou em torno de 100 a 1.500 rayls.

As amostras foram acondicionadas na tela com cuidado para que não ficassem espaços entre a parede do porta-amostra e a amostra propriamente dita para evitar vazamentos nesta união, o que reduziria a diferença de pressão antes e após a amostra, reduzindo o valor estimado da resistividade ao fluxo. A Figura 4.5 traz uma foto da vista de cima do porta-amostra, onde pode-se ver a tela de nylon.

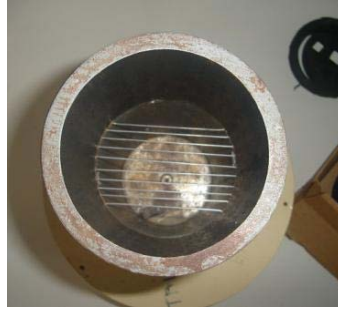


Figura 4.5 – foto da vista de cima do porta-amostra para visualização da tela de nylon.

A Figura 4.6 traz uma foto da vista de cima do porta-amostra com uma amostra acondicionada sobre a tela de nylon. Toda vez que uma amostra foi acondicionada sobre a tela, tomou-se o cuidado de analisar se existia um espaçamento entre a lateral do porta-amostra e a amostra, o que acarretaria em um vazamento e, conseqüentemente, reduziria o valor de resistividade medido.



Figura 4.6 – foto da vista de cima do porta-amostra com uma amostra acondicionada sobre a tela de nylon.

#### **4.2.3. Resultados da resistividade ao fluxo**

Os resultados que serão apresentados neste tópico refletem os resultados do material tipo A mencionado anteriormente. Os resultados das demais amostras estão apresentados no anexo, já que a forma de medição da resistividade ao fluxo é igual para todos os materiais.



Segundo a norma ASTM C 522, um número mínimo de três amostras deve ser testadas. Neste trabalho, foram utilizadas dez amostras de cada material, já que a dispersão observada em todos os materiais testados foi elevada. A Figura 4.7 traz os resultados obtidos para o material tipo A. A Figura 4.8 traz os mesmos resultados, com a diferença de estar demonstrando somente a média e a incerteza das amostras.

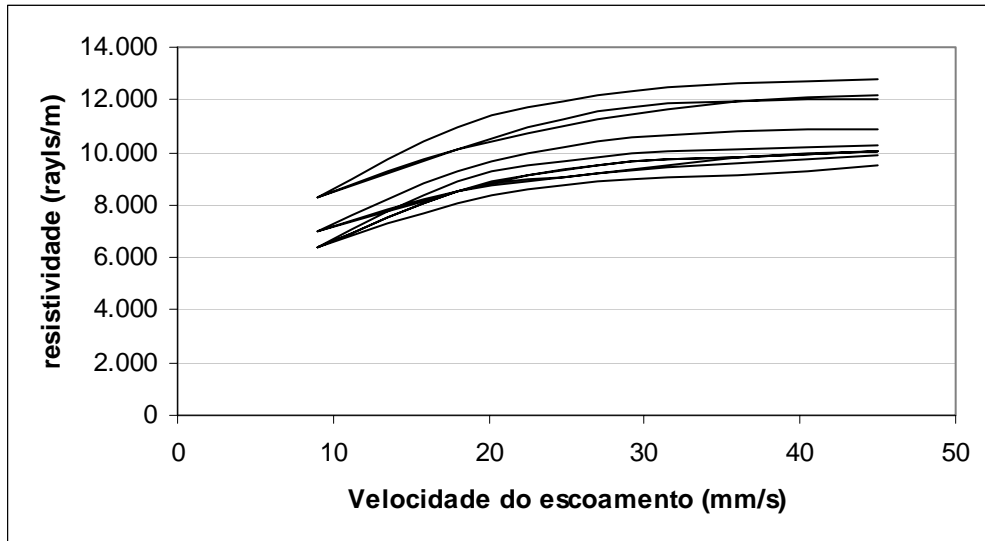


Figura 4.7 – Resultado da resistividade ao fluxo para a amostra Tipo A.

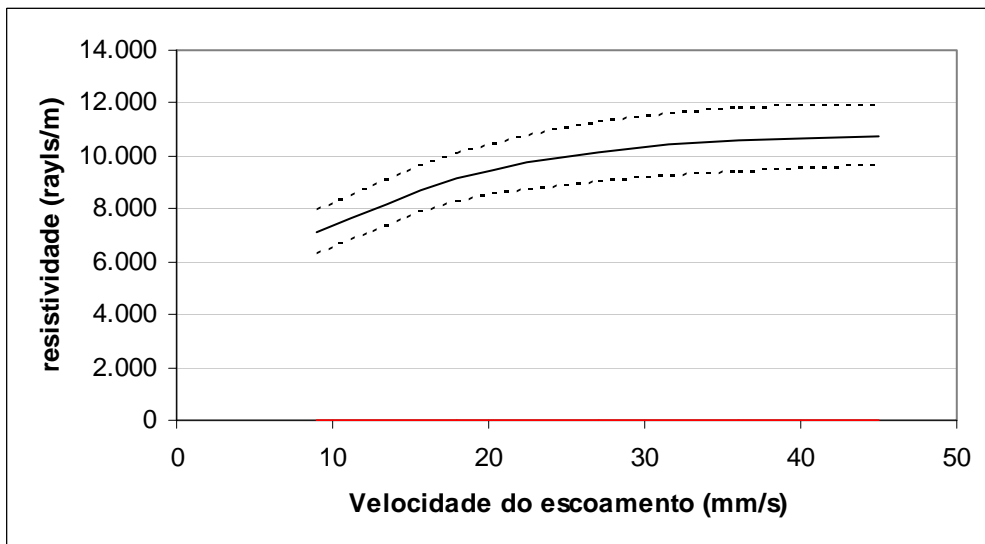


Figura 4.8 – Resultado da resistividade ao fluxo para a amostra tipo A. A linha cheia demonstra a média das amostras e as linhas pontilhadas o intervalo do desvio padrão das amostras.

Verifica-se uma elevação na resistividade ao fluxo na faixa de velocidade de escoamento de 10 a 20 mm/s. Possivelmente esta elevação ocorreu porque a pressão medida nesta faixa

esteve perto do limite inferior de medição do manômetro, o que poderia resultar em uma leitura pouco precisa, reduzindo os valores medidos. Por este motivo, a resistividade média foi calculada utilizando-se os valores medidos a partir da velocidade de escoamento de 25 mm/s. A Figura 4.9 demonstra os resultados na faixa de 25 a 50 mm/s e a Figura 4.10 demonstra a média e incerteza associada ao material analisado.

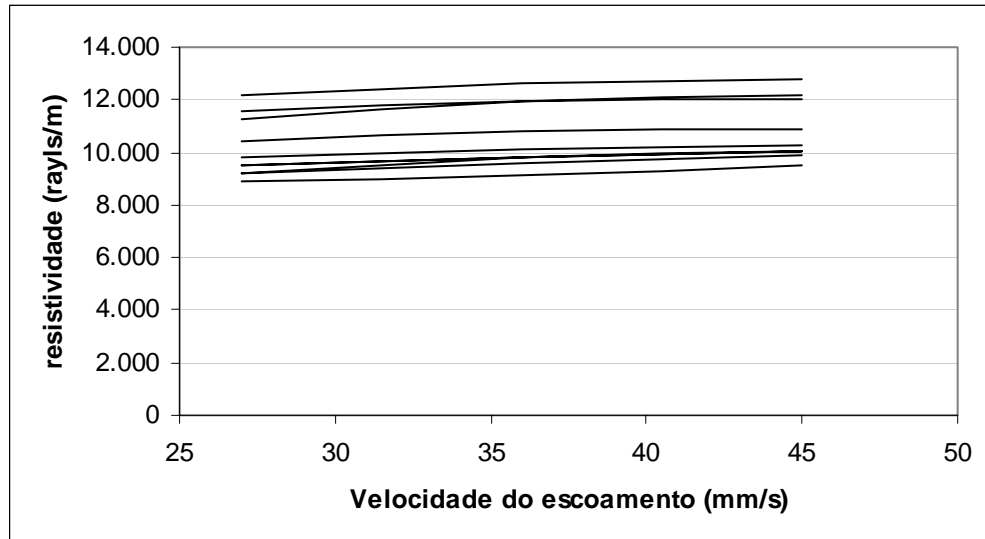


Figura 4.9 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material tipo A para velocidade de escoamento entre 25 e 50 mm/s.

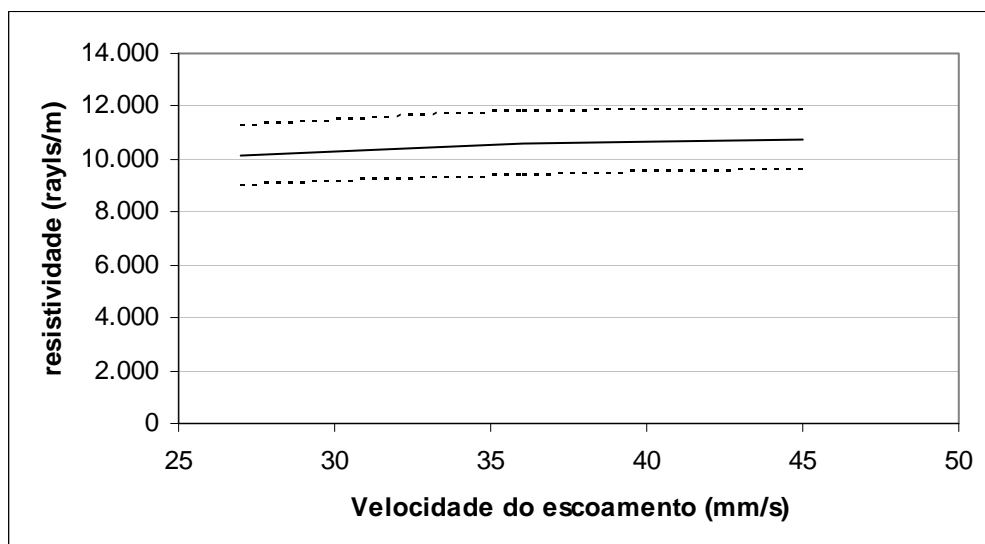


Figura 4.10 – Resultado da resistividade ao fluxo para a amostra tipo A. A linha cheia demonstra a média das amostras e as linhas pontilhadas o intervalo do desvio padrão das amostras.

Com estes resultados, estimou-se a resistividade média calculando a média dos valores obtidos para as dez amostras na faixa de velocidade do escoamento entre 25 e 50 mm/s. Da mesma forma estimou-se a incerteza máxima na faixa de valores analisada.

$$r_0 = 10.500 \text{ rayls/m}$$

$$\mu = 1.100 \text{ rayls/m}$$

Percebe-se que a incerteza da heterogeneidade do material está na faixa de 20% do valor medido de resistividade, já que a incerteza padrão está na faixa de 10% do valor medido. Lembrando que esta incerteza é proveniente da heterogeneidade do material, somente. Ainda não está sendo considerada a incerteza proveniente dos equipamentos e da metodologia de medição. No Capítulo 7 será determinada uma metodologia para medição da incerteza para esta bancada de medição da resistividade acústica e, conseqüentemente, as incertezas da bancada e da heterogeneidade da amostra serão comparadas.

#### **4.2.4. Considerações**

A resistividade ao fluxo possui uma elevada incerteza devido à heterogeneidade dos materiais analisados. Assim, deve-se tomar alguns cuidados para que o processo de medição não contribua numa dispersão ainda mais acentuada dos resultados.

Um dos principais fatores, para se manter uma integridade nos resultados, é manter um baixo escoamento de ar para que não se atinja o escoamento turbulento dentro do material, o que resulta numa variação do resultado (neste caso está-se medindo uma resistividade ao fluxo aparente). Baixas velocidades reduzem os efeitos do escoamento turbulento, que cresce com o quadrado da velocidade, mantendo uma relação linear entre a resistência ao fluxo e a velocidade. Assim, um escoamento de ar laminar é desejado durante as medições. Segundo a norma ASTM C 522, a maioria dos materiais porosos mantém um escoamento laminar até uma velocidade ao escoamento de 50 mm/s .

Uma forma de verificar a integridade da medição, é plotar o gráfico da resistividade ao fluxo em função da vazão ou velocidade ao fluxo, conforme as figuras 4.7 a 4.10. No momento em que a resistividade inicia uma curva ascendente, significa que o fluxo no interior do material está entrando no escoamento turbulento e os resultados acima desta velocidade de fluxo precisam ser descartados.

Neste trabalho não foram detectadas elevações significativas na resistividade após um “patamar” plano. O que se observou foi uma queda a baixas velocidades de escoamento, o que é possivelmente causado pela resolução limitada do equipamento utilizado, já que o valor de pressão medido a baixas velocidades de escoamento estava quase nos limites inferiores de medição do manômetro e do rotâmetro. Mais pesquisas sobre este efeito poderão esclarecer esta queda.

## CAPÍTULO 5

### POROSIDADE

#### 5.1. Introdução

A porosidade de um material é definida pela razão de volume ocupado pelo fluido dentro dos poros conectados e o volume total do material poroso. Assim, a porosidade varia de um valor nulo (zero) até a unidade.

Já que a porosidade quantifica a relação entre as fases sólida e fluida dentro do volume do material poroso, é um parâmetro importante nas teorias de propagação do som em materiais porosos. A porosidade típica para aplicações de controle de ruído é normalmente alta, na faixa de 0,9, sendo que pode-se encontrar porosidade maior que 0,98.

Como a porosidade da maioria das espumas de controle de ruído é tão alta, e, também, tende a cair em uma faixa estreita, a porosidade geralmente não é um parâmetro muito importante para estabelecer a diferença entre materiais típicos de controle de ruído. Entretanto, boa parte da dissipação de energia interna em um material poroso se deve ao movimento relativo da fase sólida e fluida dentro dos poros e, para que isso ocorra, os poros devem estar conectados, ou seja, deve-se garantir que o ar consiga passar entre os mesmos. Caso contrário, tais materiais não exibirão boas propriedades acústicas e devem ser modelados como sólidos elásticos em vez de porosos.

#### 5.2. Medição da porosidade

A porosidade  $\Omega$  de um material é definida como a razão entre o volume ocupado pelo fluido no seu interior e o volume total do material sendo, portanto, um valor adimensional. Pode ser calculado através da Eq. 5.1.

$$\Omega = \frac{V_f}{V_a}, \quad (5.1)$$

onde

$V_f$  é o volume de fluido da amostra,

$V_a$  é o volume total da amostra.

Sendo que a porosidade quantifica a relação de volume ocupado pela fase fluida e sólida, torna-se um importante parâmetro na teoria de Biot de propagação sonora em materiais porosos.

Para a medição deste parâmetro, utilizou-se um experimento relativamente simples, conforme Figura 5.1.

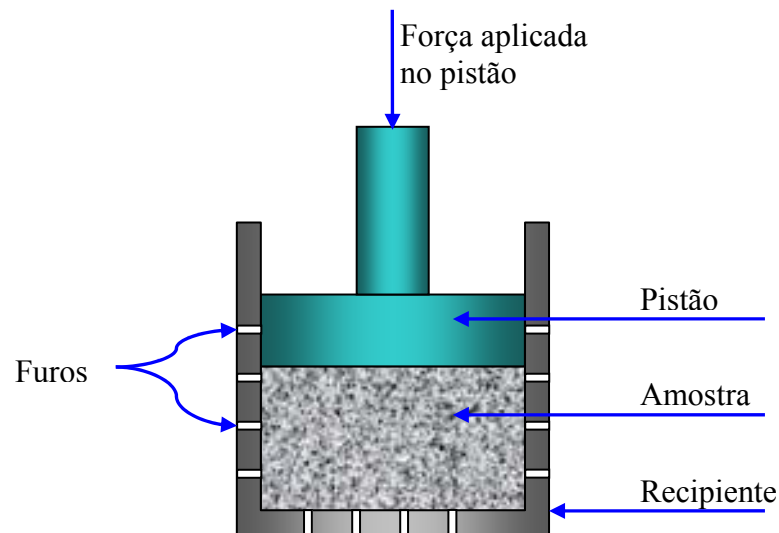


Figura 5.1 – Diagrama da bancada de medição da porosidade

O recipiente é um cilindro de metal com fundo e tem a finalidade de impedir a deformação da amostra para os lados. Assim, a amostra fica confinada e só pode se deformar na vertical, sendo seu diâmetro constante. Vale lembrar que o recipiente tem vários furos pequenos na lateral e em baixo para permitir a saída de ar da amostra sem resistência adicional. O pistão irá comprimir a amostra, forçando a saída do ar nos poros, sendo que a força aplicada no pistão é exercida por uma prensa hidráulica manual. Assim, mede-se o deslocamento do pistão e pode-se determinar a o volume ocupado pelo fluido e o volume total da amostra através das Eq. (5.2) e (5.3):

$$V_f = A \cdot (T - d), \quad (5.2)$$

$$V_a = A \cdot T, \quad (5.3)$$

sendo

$V_f$  → Volume final da amostra após a compressão,

$V_a$  → Volume da amostra antes da compressão,

$A$  → Área da superfície da amostra,

$T$  → Espessura da amostra antes da compressão,

$d$  → Deslocamento do pistão na amostra.

Substituindo 5.2 e 5.3 em 5.1, resulta na Eq. 5.4:

$$\Omega = 1 - \frac{d}{T} \quad (5.4)$$

E, para determinar o deslocamento do pistão, utilizou-se o seguinte método:

Na primeira etapa deste procedimento, mediu-se a altura “h” sem nenhuma amostra no recipiente, ou seja, com o pistão encostado no fundo em 10 pontos distintos, pois não há garantias de que ao medir em posições diferentes o mensurando seja invariável. Experimentalmente ele se mostrou variável conforme resultados da tabela 5.1. Veja a Figura 5.2.

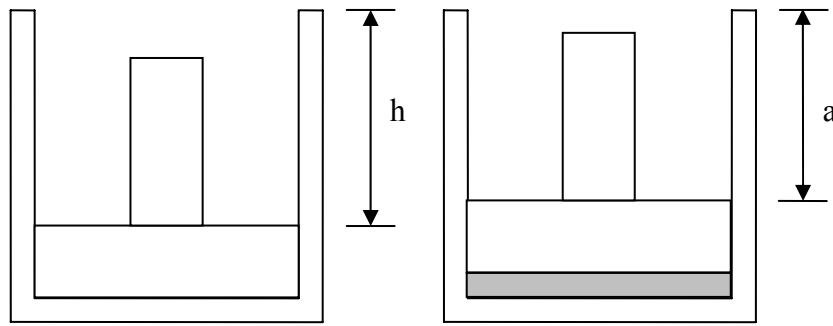


Figura 5.2 – Diagrama representativo das medições feitas na bancada

As dez medições da altura “h” resultaram em um valor médio de 15,09 mm e uma incerteza de 0,12 mm para 95,45% de probabilidade.

Na segunda etapa, ou seja, nas medições, mediu-se a altura *a* de forma semelhante à primeira etapa, com a diferença de que a amostra está comprimida no recipiente, sendo uma força aplicada ao cilindro de duas toneladas.

Desta forma, pode-se alterar a Eq. 5.4 para a Eq. 5.5:

$$\Omega = 1 - \left( \frac{h - a}{T} \right) \quad (5.5)$$

Tabela 5.1 – Medições da altura “h”

Medição	Altura h (mm)
1	15,04
2	15,04
3	15,15
4	15,16
5	15,12
6	15,04
7	15,07
8	15,12
9	15,02
10	15,11

Assim, pode-se verificar que a porosidade é dependente das medias  $h$ ,  $a$  e  $T$  (espessura da amostra).

### 5.2.1. Bancada

A Figura 5.3 traz uma foto do porta-amostra juntamente com o cilindro utilizado para a compressão da amostra no porta-amostra. O porta-amostra e o cilindro foram fabricados em ferro fundido. A força que atua no cilindro para pressionar a amostra é fornecida por uma prensa hidráulica manual Schuler 10T-PBC.



Figura 5.3 – Foto do porta-amostra e do cilindro de compressão

A Figura 5.4 traz uma foto da bancada em duas situações. Uma delas é com a amostra no porta-amostra sem o cilindro. E a outra é a prensa já fazendo força no cilindro para pressionar e retirar o ar da amostra. A força utilizada para as medições da prensa hidráulica foi de 2 toneladas.





Figura 5.4 – foto da bancada em duas situações, uma com o porta-amostra com amostra (esquerda). E outra foto (direita) sendo que a amostra está comprimida dentro do porta-amostra pelo cilindro de compressão.

### 5.2.2. Resultados

Com a altura  $h$  previamente determinada, mediu-se a altura “ $a$ ”, ou seja, a altura da lateral do porta-amostra e a superfície superior do cilindro para cada uma das dez amostras. Os resultados destas medições estão na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados das medições da altura “ $a$ ” juntamente com o cálculo da diferença entre a altura “ $h$ ” e “ $a$ ” e o resultado final da porosidade para cada amostra.

Amostra	$a$ (mm)	$h-a$ (mm)	porosidade
1	14,93	0,16	99,37%
2	14,95	0,14	99,45%
3	15,06	0,03	99,89%
4	15,07	0,02	99,93%
5	14,84	0,25	99,00%
6	14,94	0,15	99,41%
7	14,88	0,21	99,16%
8	14,95	0,14	99,45%
9	14,98	0,11	99,57%
10	14,94	0,15	99,41%

A média das dez amostras resultou em uma média de 99,46% e uma incerteza de 0,66% para uma probabilidade de 95,45%.

### 5.3. Considerações

A incerteza da heterogeneidade da amostra com este tipo de medição da porosidade é muito menor do que a incerteza da resistividade ao fluxo (vide tópico 4.2.3). E, como discutido anteriormente, a porosidade da maioria dos materiais acústicos está na faixa de valores entre 0,9 e 0,99, com pequena dispersão de valores, conforme o resultado obtido.

Quando medir a porosidade de espumas por este método, deve-se ter em mente que a compressão das amostras danificará os poros fechados das amostras fornecendo, assim, um valor de porosidade maior que o verdadeiro. Pois o que importa para a absorção acústica são os poros abertos que permitem a passagem do ar. Na medição de fibras como, por exemplo, o material tipo A, este problema dos poros não se aplica, pois em fibras não existem poros fechados.

## CAPÍTULO 6

### MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

#### 6.1. Introdução

O desempenho de um tratamento acústico com materiais porosos é geralmente avaliado pelo seu coeficiente de absorção, que é uma medida da fração de energia acústica absorvida pelo sistema em relação à energia acústica incidente. Este processo se deve à onda sonora incidente entrar nos poros e dissipar-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica.

O coeficiente de absorção pode ser medido em uma câmara reverberante ou calculado utilizando-se um tubo de impedância. No tubo de impedância, considera-se a propagação somente de ondas planas e a impedância e o coeficiente de absorção normais podem ser determinados.

Tanto a absorção quanto a impedância acústica não são propriedades inerentes do material, pois dependem tanto do material quanto das condições de contorno a que está submetido, tais como restrição de deslocamento em uma ou mais direções, acoplamento a uma superfície (sendo rígida ou não), etc. Neste trabalho a impedância e a absorção acústica foram medidas utilizando um tubo de impedância, o que já foi descrito no tópico 2.2.3.1.

#### 6.2. Medição da absorção e da impedância acústicas

O método da função de transferência possui algumas limitações, principalmente em relação à faixa de frequência útil, e alguns cuidados devem ser tomados para que os erros sejam minimizados. O método de transferência considera que somente ondas planas propagam-se no interior do tubo. Sendo assim, a frequência máxima válida para o equipamento é a frequência de corte para o primeiro modo em dutos, dada pela Eq. (6.1).

$$f_{\text{corte}} = \frac{1,84 \cdot c}{\pi \cdot d}, \quad (6.1)$$

onde

$d$  é o diâmetro do tubo de impedância,

$c$  é a velocidade do som no ar.

Em 1980, Chung e Blaser [35] concluíram que, quando o produto  $k*s$  for um número múltiplo inteiro de  $\pi$ , o coeficiente de reflexão, dado pela Eq. (2.10) torna-se indeterminado. Esta afirmação é equivalente a dizer que o coeficiente de reflexão é indeterminado quando  $s = m\lambda/2$ , ou seja, quando a distância entre os dois sinais medidos pelos microfones for igual a um múltiplo de meio comprimento de onda. Assim, a distancia entre as posições dos microfones deve ser escolhida pela Eq. (6.2).

$$s \leq \frac{c}{2f_m}, \quad (6.2)$$

onde

$f_m$  é a frequência máxima de interesse.

Bodén e Abon [36,37] estudaram como minimizar os erros na medição da função de transferência:

- o comprimento total do tubo de impedância deve ser mantido pequeno, na prática entre cinco e dez vezes o seu diâmetro, para reduzir a absorção do sinal pelas paredes do tubo;
- a fonte sonora não deve ser refletora;
- a posição do microfone mais próximo da amostra deve ser a mais próxima possível da extremidade da mesma, porém não inferior a 10 cm;
- os melhores resultados são obtidos numa determinada faixa de frequência que depende da distância  $s$  entre os microfones e pode ser calculada pela Eq. (6.3).

$$\frac{0,1c}{2s} < f < \frac{0,8c}{2s} \quad (6.3)$$

A região para a qual o método possui uma menor sensibilidade aos erros associados à função de transferência será nas frequências próximas de:

$$f = \frac{c}{4s}, \quad (6.4)$$

ou seja, se a faixa de interesse nas medições forem baixas frequência, então deve-se utilizar uma distância maior entre os microfones.

### 6.2.1. Bancada de medição da impedância e absorção acústica

Neste trabalho, a bancada utilizada para medição da impedância e da absorção acústicas foi o tubo de impedância. A Figura 6.1 traz o diagrama esquemático da mesma.

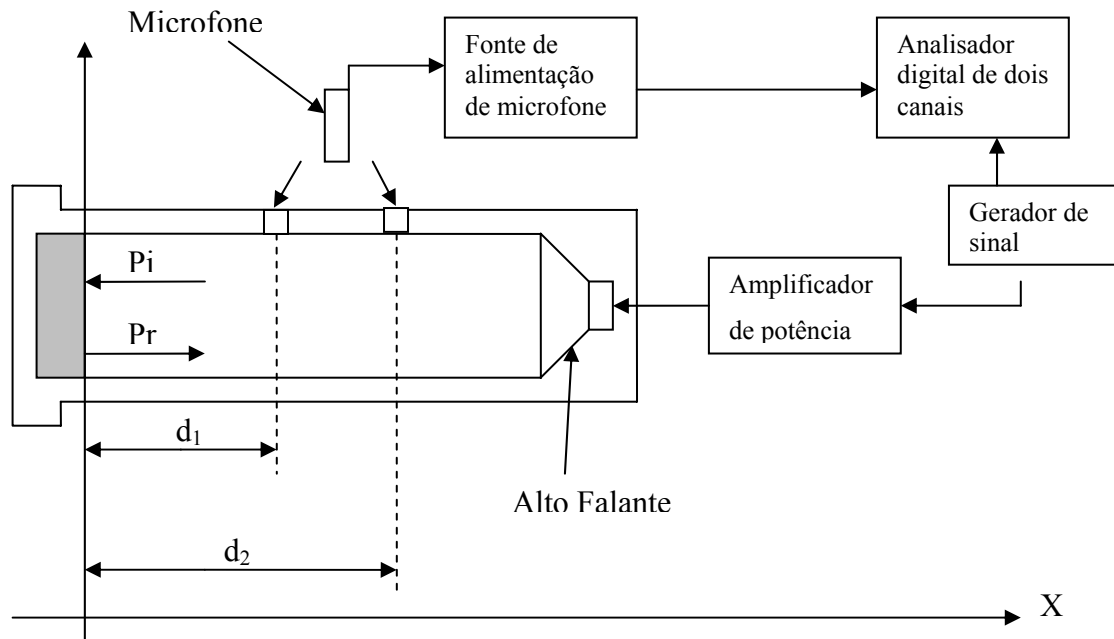


Figura 6.1 – Diagrama esquemático da bancada de medição da impedância acústica

O amplificador utilizado foi o Power Amplifier Type 2706. O analisador digital utilizado foi um LAN Interface Module Type 7533 também. O microfone foi o Delta Tron Pressure-field  $\frac{1}{4}$ " Microfone Type 4944A. Todos esses equipamento são do fabricante Brüel & Kjaer. A Figura 6.2 traz a foto da bancada.

### 6.2.2. Metodologia da medição da impedância e absorção acústica

Para medir a impedância e o coeficiente de absorção pelo método da função de transferência, pode-se utilizar um ou dois microfones. Neste trabalho foi utilizado o procedimento com um microfone que está descrito no tópico 2.2.3.1.



Figura 6.2 – Foto da bancada do tubo de impedância

### 6.2.3. Resultados da impedância e absorção sonora

Os resultados que serão apresentados neste tópico refletem os resultados do material tipo A mencionado anteriormente. Os resultados das demais amostras estão apresentados no anexo, já que a forma de medição da impedância e absorção sonora é igual para todos os materiais.

A distância entre os microfones foi de 66mm. De acordo com a Eq. 6.3, serão esperados bons resultados na faixa de frequência de 260 a 2079 Hz, considerando uma velocidade do som no ar de 343 m/s. A frequência com menor sensibilidade a erros será de aproximadamente 1169 Hz.

Para que se tenha uma medição de qualidade no tubo de impedância, a absorção do tubo deve ser muito pequena, tendendo a zero em todo o espectro de frequências a ser analisado. A Figura 6.3 demonstra o resultado obtido do coeficiente de absorção do tubo de impedância sem que houvesse qualquer amostra dentro do mesmo, para quantificar a sua absorção. Percebe-se que a absorção do tubo é pequena, o que poderia gerar um inconveniente em amostras com uma absorção excessivamente baixa, que não é o caso das amostras deste trabalho. É importante frisar que nos gráficos de resultados a faixa de frequência demonstrada nos mesmos é a faixa de frequência em que se espera bons resultados conforme discutido anteriormente.

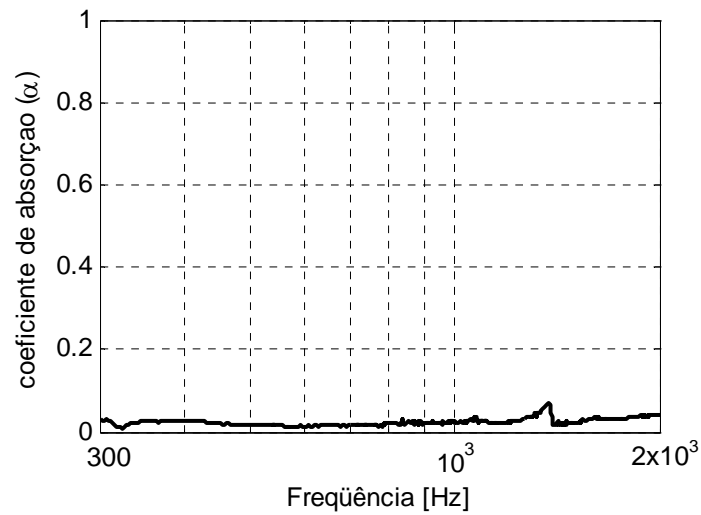


Figura 6.3 – Medição da absorção do tubo sem amostra. A linha preta grossa representa a absorção interna do tubo no espectro de frequência analisado.

Para cada material, foram medidas as impedâncias e os coeficientes de absorção para 10 amostras. A Figura 6.4 demonstra os resultados para a absorção medida para cada uma das dez amostras. A Figura 6.5 demonstra os resultados para a absorção da média das amostras demonstrando também o desvio padrão das amostras.

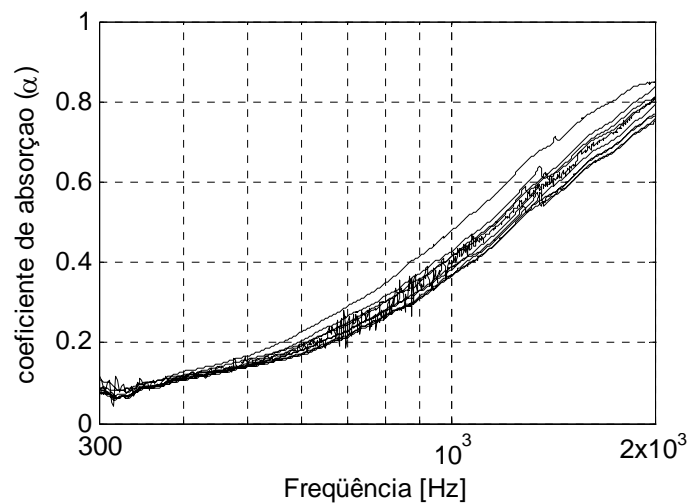


Figura 6.4 – Resultado do coeficiente de absorção para as dez amostras do material Tipo A.

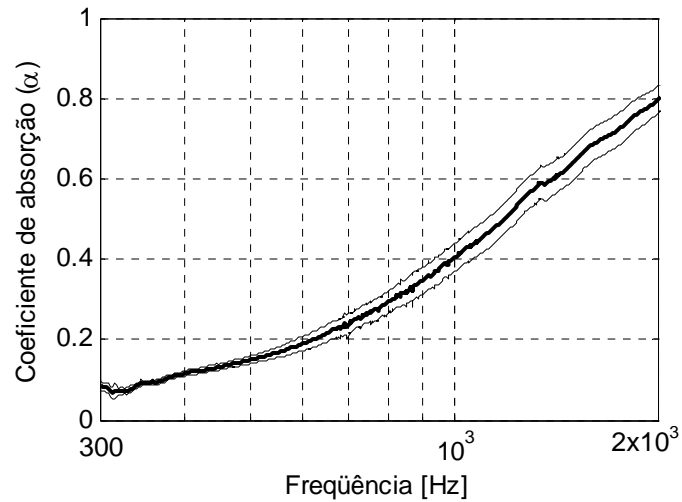


Figura 6.5 – Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas).

A Figura 6.6 demonstra os resultados medidos da impedância para as dez amostras analisadas. E a Figura 6.7 demonstra a média da impedância das dez amostras com seu respectivo desvio padrão. Nesta última figura, a curva da média das amostras está praticamente sobreposta com as curvas da média  $\pm$  o desvio padrão.

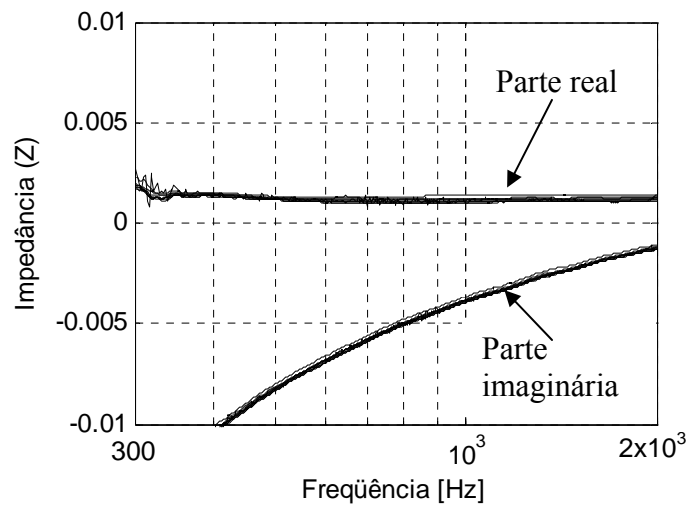


Figura 6.6 – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo A.



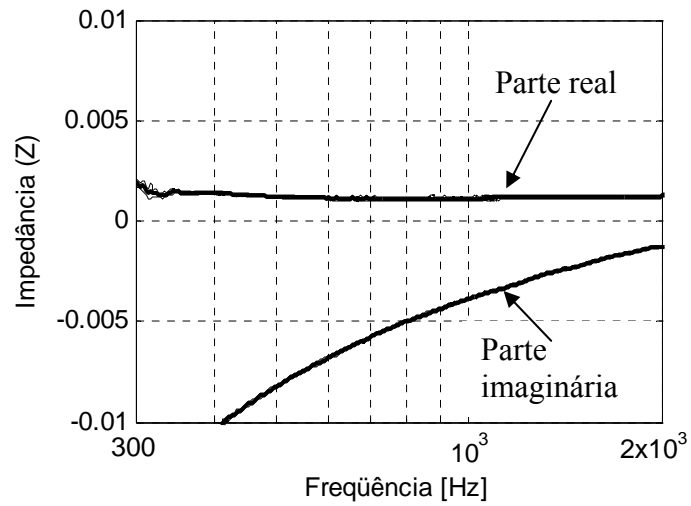


Figura 6.7 – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo A. As curvas grossas demonstram a média das amostras e as curvas finas a média  $\pm$  o desvio padrão da respectiva curva.

Percebe-se que a impedância obteve uma dispersão muito menor que a absorção acústica.

## CAPÍTULO 7

### INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE AO FLUXO

#### 7.1. Introdução

Neste capítulo será abordada uma forma de determinação da incerteza de medição da resistividade ao fluxo de materiais de absorção acústica. Para a demonstração da metodologia foi calculada a incerteza da bancada de resistividade ao fluxo para um dos tipos de materiais (Tipo A) e os resultados dos demais materiais se encontram no anexo.

Quando se faz uma medição, por melhor que sejam os equipamentos, as amostras ou mesmo o próprio operador, sempre existirá uma incerteza no processo de medição. Essas incertezas se acumulam, gerando um resultado de certa forma duvidoso, ou seja, há uma incerteza em relação ao valor medido. A norma ASTM C 522 não traz nenhuma especificação de como se determina essa incerteza na medição da resistividade ao fluxo, sendo este um dos propósitos desta dissertação: a de desenvolver uma metodologia para a determinação da incerteza na medição da resistividade ao fluxo e de mais dois parâmetros, os quais já foram citados e suas metodologias serão discutidas nos próximos capítulos.

#### 7.2. Fontes de incerteza da resistividade ao fluxo

Na medição da resistividade ao fluxo, temos várias fontes de incertezas. Inicialmente, analisam-se as variáveis pertinentes à determinação da resistividade ao fluxo, a qual é estimada pela Eq. (2.2). Analisando os parâmetros da Eq. (2.2), tem-se:

- a) sendo  $S$  a área de passagem do escoamento, temos a incerteza proveniente do diâmetro do tubo utilizado na bancada;
- b) sendo  $P$  a diferença de pressão antes e após a amostra, temos a incerteza associada com o instrumento de medição de pressão;
- c) sendo  $U$  a vazão volumétrica de ar que passa pela amostra, temos a incerteza proveniente do instrumento de medição de vazão;
- d) sendo  $T$  a espessura da amostra, temos a incerteza proveniente do instrumento de medição e da própria variação da amostra.

De todos os parâmetros citados, somente a área é medida indiretamente, ou seja, mede-se o diâmetro para depois calcular a área. E, para calcular a área, temos que levar em consideração as possíveis fontes de incerteza na medição do diâmetro. Para que o cálculo da resistividade fique em função do diâmetro, podemos definir a área  $S$  através da Eq. (7.1):

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (7.1)$$

sendo  $d$  o diâmetro da amostra.

Substituindo a Eq. (7.1) em (4.2), temos:

$$r_0 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot P}{4 \cdot T \cdot U} \quad (7.2)$$

Agora se tem a resistividade em função de variáveis que são medidas diretamente. Com isto, pode-se continuar o cálculo da incerteza da bancada, determinando-se a incerteza expandida da mesma. Mas, antes, faz-se necessária a análise da incerteza padrão combinada, que é dada pela Eq. (3.8). A utilização da Eq. (3.8) é aceitável porque se podem considerar estas grandezas de entrada como sendo não-correlacionadas.

A resistividade ao fluxo é função do diâmetro do tubo ( $d$ ), da diferença de pressão ( $P$ ), da espessura da amostra ( $T$ ) e da vazão volumétrica de ar ( $U$ ). A partir disto é necessário calcular os coeficientes de sensibilidade para cada variável em que a resistividade ao fluxo é dependente, obtendo-se:

O coeficiente de sensibilidade do diâmetro do tubo:

$$\theta_d = \frac{\partial r_0}{\partial d} = \frac{\pi d P}{2 T U} \quad (7.3)$$

O coeficiente de sensibilidade da diferença de pressão:

$$\theta_P = \frac{\partial r_0}{\partial P} = \frac{\pi d^2}{4 T U} \quad (7.4)$$

O coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra:

$$\theta_r = \frac{\partial r_0}{\partial T} = -\frac{\pi d^2 P}{4T^2 U} \quad (7.5)$$

O coeficiente de sensibilidade da vazão volumétrica do ar:

$$\theta_U = \frac{\partial r_0}{\partial U} = -\frac{\pi d^2 P}{4TU^2} \quad (7.6)$$

Com os coeficientes de sensibilidade, pode-se calcular a incerteza da resistividade ao fluxo:

$$u_c^2(r_0) = \theta_d^2 u_d^2 + \theta_P^2 u_P^2 + \theta_T^2 u_T^2 + \theta_U^2 u_U^2 \quad (7.7)$$

A Figura (7.1) traz um diagrama demonstrando a propagação da incerteza da resistividade ao fluxo.

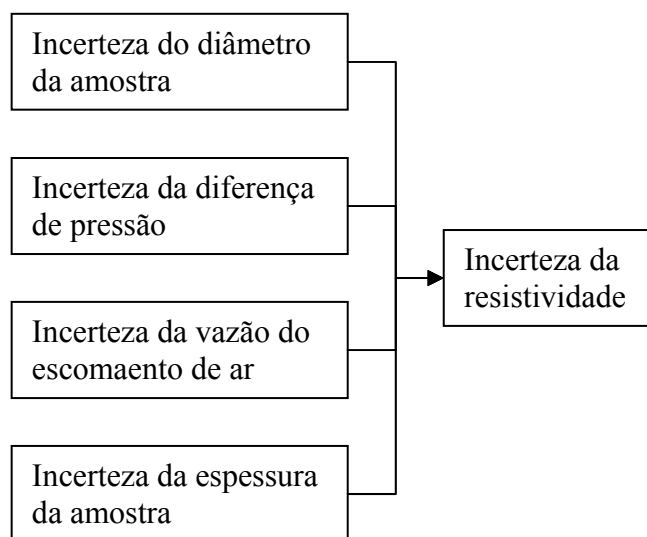


Figura 7.1 – Diagrama da propagação de incertezas para a resistividade ao fluxo.

Assim, tem-se a incerteza da resistividade ao fluxo através do cálculo da incerteza padrão combinada. A partir deste ponto, deve-se encontrar os valores da incerteza de medição de cada variável relevante, que serão definidas nos próximos tópicos.

### 7.2.1. Incerteza do diâmetro ( $u_d$ )

O diâmetro do tubo normalmente será um mensurando variável, já que a usinagem do mesmo muitas vezes não será boa o suficiente para que seja invariável, para medições com um paquímetro.

Identificação das fontes de incerteza da medição do diâmetro do tubo:

- a) A repetitividade do diâmetro – ao medir-se o diâmetro em pontos diferentes, podem-se obter valores distintos ao utilizar-se um paquímetro, pois no processo de fabricação do tubo (no caso do utilizado, a usinagem), o diâmetro em pontos diferentes tem valores diferentes, resultando em uma fonte de incerteza;
- b) Resolução do dispositivo mostrador – o paquímetro, como todos os instrumentos de medição, tem um dispositivo mostrador limitado, ou seja, o resultado medido contém uma incerteza;

A figura (7.2) traz um diagrama demonstrando as fontes de incerteza do diâmetro do tubo consideradas neste trabalho.

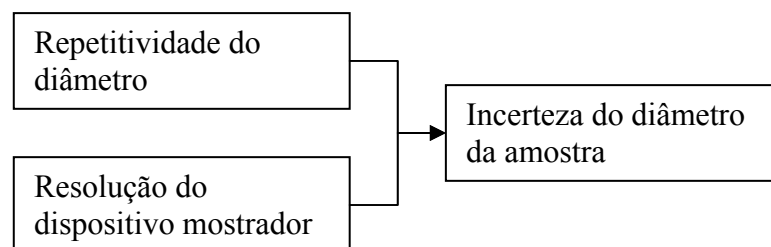


Figura 7.2 – Diagrama da propagação de incertezas para o diâmetro da amostra.

#### 7.2.1.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos

A repetitividade e a resolução do dispositivo mostrador são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias, não tendo, conseqüentemente, componentes sistemáticas.

#### 7.2.1.2. Quantificação dos efeitos aleatórios do diâmetro do tubo

##### I – Repetitividade do diâmetro

A repetitividade do tubo se mostrou um mensurando variável ao se medir com um paquímetro em várias posições de seu diâmetro. Os valores medidos estão expressos na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Medições do diâmetro do tubo da bancada.

Medição	Diâmetro ( $\times 10^{-3}$ m)
1	97,19
2	96,65
3	96,51
4	96,08
5	96,64
6	97,40
Média	96.87

Através da média e das medições, estima-se o desvio padrão através da Eq. (3.5).

$$s = 0,35 \text{ mm} \quad (7.8)$$

A incerteza da repetitividade do diâmetro resultou em:

$$u_{Re} = 0,142 \text{ mm} \quad (7.9)$$

Foram feitas seis medições e, conseqüentemente, são cinco graus de liberdade:

$$\nu_{Re} = 5 \quad (7.10)$$

## II – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7) e, sendo uma incerteza tipo B, o número de graus de liberdade é infinito.

$$u_R = 5,8 \text{ } \mu\text{m} \quad (7.11)$$

$$\nu_R = \infty \quad (7.12)$$

### III - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela 7.2. E, vale salientar que a incerteza da repetitividade da medição do diâmetro é muito maior que a incerteza proveniente da resolução do dispositivo mostrador, o que está demonstrado na Figura 7.2.

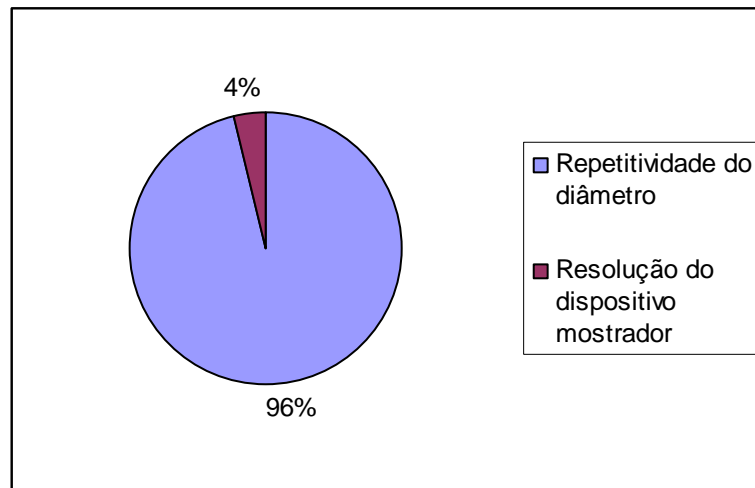


Figura 7.2 – Parcela de contribuição das incertezas para a incerteza do diâmetro do tubo.

Este resultado demonstra que, para reduzir a incerteza do diâmetro, faz-se necessário que o tubo seja usinado por um processo ou máquina que resulte numa variação menor do diâmetro, conseqüentemente aumentando o custo da bancada.

#### 7.2.1.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos

Calcula-se a incerteza combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (3.5).

$$u_d = 142 \mu\text{m} \quad (7.13)$$

O número de graus de liberdade efetivos é calculado através da Eq. (3.12):

$$v_{ef} = 5 \quad (7.14)$$

Tabela 7.2 – Tabela de incertezas do diâmetro do tubo ( $u_d$ )

Símbolo	Descrição	Correção	a ( $\mu\text{m}$ )	Distribuição	U ( $\mu\text{m}$ )	$\nu$
Re	Repetitividade di diâmetro	-	-	Normal	142	5
R	Resolução do dispositivo mostrador	-	10	Retangular	5,8	$\infty$
$u_d$	Incerteza padrão combinada do diâmetro	-	-	Normal	142	5

### 7.2.2. Incerteza da pressão ( $u_p$ )

No caso da pressão, a incerteza é proveniente do instrumento de medição da mesma, ou seja, do manômetro utilizado. Têm-se as seguintes fontes de incerteza:

- a) Incerteza da escala do mostrador (digital);
- b) Incerteza do instrumento de medição;

A árvore da incerteza do diâmetro da amostra está demonstrada na Figura (7.3).

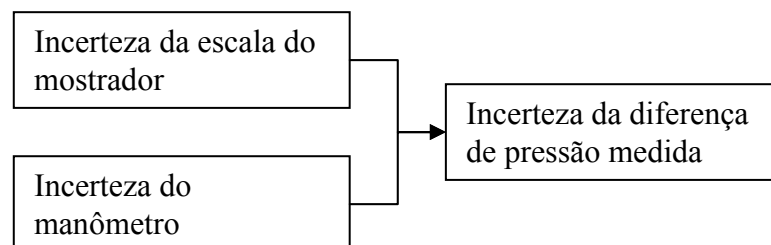


Figura 7.3 – Diagrama da propagação de incertezas para a diferença de pressão.

#### 7.2.2.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos

A resolução do dispositivo mostrador, assim como a incerteza do manômetro, são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias, não tendo, conseqüentemente, componentes sistemáticas.



### 7.2.2.2. Quantificação dos efeitos aleatórios

#### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzida pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7), sendo que o número de graus de liberdade é infinito:

$$u_R = 0,719 \text{ Pa} \quad (7.15)$$

$$\nu_R = \infty \quad (7.16)$$

#### II – Incerteza do instrumento de medição

A incerteza do instrumento de medição, segundo o manual, é igual a 0,5% do fundo de escala. Portanto, como o fundo de escala é igual a 249 Pa, tem-se:

$$u_i = 1,245 \text{ Pa} \quad (7.17)$$

#### III - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (7.3). E, vale salientar, a incerteza do instrumento de medição (manômetro) é muito maior do que a incerteza proveniente da resolução do dispositivo mostrador, o que está demonstrado na Figura (7.4).

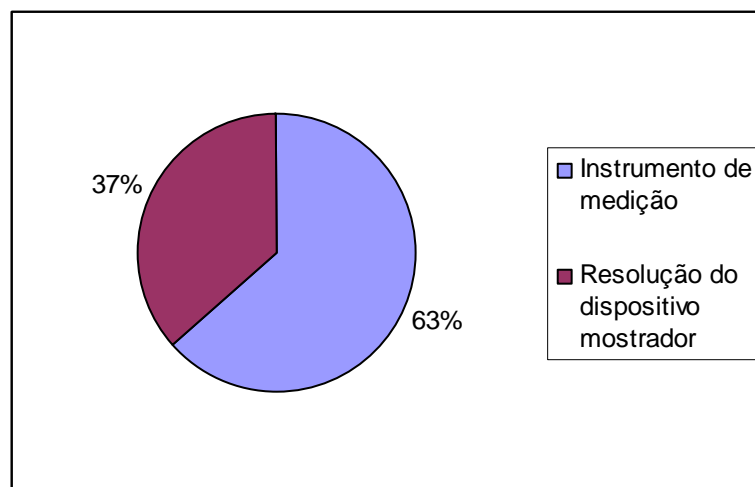


Figura 7.4 – Parcela de contribuição das incertezas para a incerteza da pressão.

Este resultado demonstra que, para reduzir a incerteza medida na pressão, faz-se necessária a utilização de um manômetro com menor incerteza.

### 7.2.2.3. Cálculo da correção combinada

Como não há efeitos sistemáticos na incerteza da pressão, também não haverá correção combinada.

### 7.2.2.4. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos:

Calcula-se a incerteza padrão combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (3.11):

$$u_p = 1,438 \text{ Pa} \quad (7.18)$$

O número de graus de liberdade efetivos é calculado pela Eq. (3.12):

$$v_{ef} = \infty \quad (7.19)$$

Tabela 7.3 – Tabela de incertezas da pressão ( $u_p$ )

Símbolo	Descrição	Correção	a (Pa)	Distribuição	U (Pa)	$\nu$
I	Instrumento de medição	-		Normal	1,245	$\infty$
R	Resolução do dispositivo mostrador	-	1,245	Retangular	0,719	$\infty$
$u_p$	Incerteza combinada	-		Normal	1,438	$\infty$

### 7.2.3. Incerteza da espessura da amostra ( $u_T$ )

A espessura da amostra é um parâmetro de difícil medição. Isto porque as amostras normalmente não são rígidas, e sim espumas ou fibras macias, o que impossibilita ter certeza de que não se está deformando ao medir e, conseqüentemente, alterando o resultado medido. Para minimizar este problema, fez-se a média da espessura medida das dez amostras, para cada material.

Para a espessura da amostra, têm-se as seguintes fontes de incerteza:

- a) Incerteza da escala do mostrador (analógico);

b) Incerteza devido à repetitividade da amostra;

A árvore da incerteza da espessura da amostra está demonstrada na Figura (7.5).

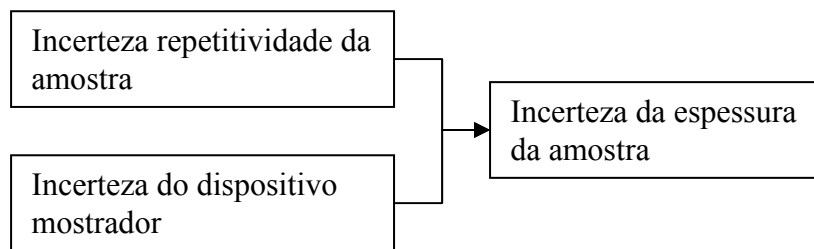


Figura 7.5 – Diagrama da propagação de incertezas para a espessura da amostra.

### 7.2.3.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos

A resolução do dispositivo mostrador, assim como a incerteza da repetitividade da espessura das amostras, são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias, não tendo, conseqüentemente, componentes sistemáticas.

### 7.2.3.2. Quantificação dos efeitos aleatórios

#### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7), sendo que o número de graus de liberdade é infinito:

$$u_R = 5,77 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (7.20)$$

$$\nu_R = \infty \quad (7.21)$$

#### II – Repetitividade da espessura da amostra

A espessura da amostra é um mensurando variável ao se medir com um paquímetro, pois existem dois motivos para tal: o primeiro é que mesmo uma mesma amostra tem uma espessura variável, dependendo de onde se medir; o segundo é que medir a espessura de uma amostra com um paquímetro é uma tarefa complicada, pois não se tem certeza de que o paquímetro está realmente encostando na mesma, já que a amostra é macia. A tabela (7.4) traz os resultados das espessuras das dez amostras utilizadas do material Tipo A.

Tabela 7.4 – Medição da espessura das amostras do material Tipo A.

Amostra	Espessura (mm)
1	22,8
2	25,0
3	22,8
4	26,0
5	24,2
6	25,9
7	24,0
8	24,5
9	27,0
10	25,7

Deve-se reparar que, apesar de se utilizar um paquímetro com resolução de até 0,01 mm, os resultados foram apresentados com somente uma casa decimal. Isto porque mesmo com uma casa decimal já não se tem certeza ao medir a fibra de vidro, já que a mesma é muito macia e também a espessura varia muito na mesma amostra. O resultado da incerteza destas medições e o número de graus de liberdade são dados pelas equações (7.22) e (7.23).

$$u_{Re} = 0,000440 \text{ m} \quad (7.22)$$

$$\nu_{Re} = 9 \quad (7.23)$$

### III - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (7.4). E, vale salientar, a incerteza da repetitividade da amostra é muito maior que a incerteza proveniente do dispositivo mostrador do paquímetro, o que está demonstrado na Figura (7.6).

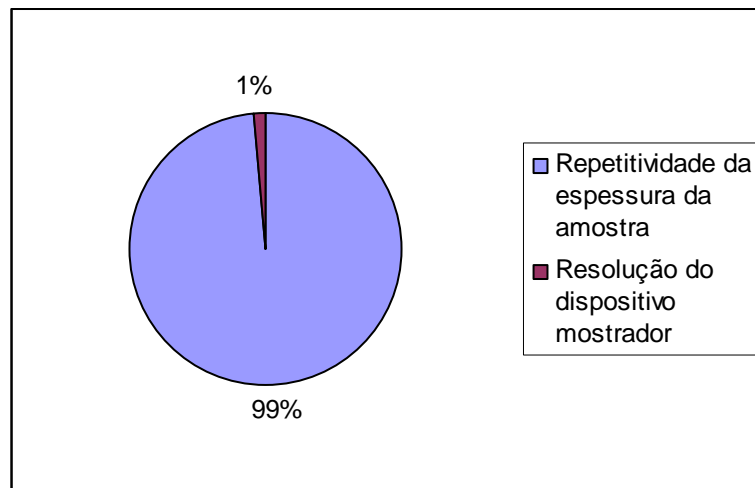


Figura 7.6 – Parcela de contribuição das incertezas para a incerteza da pressão.

Este resultado demonstra que, para reduzir a incerteza medida na pressão, faz-se necessária uma forma de medição da espessura das amostras mais adequada e exata.

### 7.2.3.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos

Calcula-se a incerteza combinada a partir das incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (3.5):

$$u_T = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (7.24)$$

O número de graus de liberdade efetivos é calculado pela Eq. (3.12):

$$v_{ef} = 9,005 \quad (7.25)$$

O número de graus de liberdade será arredondado para o menor número inteiro, ou seja, 9.

### 7.2.4. Incerteza da vazão volumétrica de ar ( $u_U$ )

A incerteza da vazão volumétrica é devida ao instrumento utilizado, ou seja, do rotâmetro. Sendo que o rotâmetro utilizado era um instrumento analógico, temos as seguintes fontes de incerteza:

- a) Incerteza do mostrador analógico;
- b) Incerteza do próprio rotâmetro;

Tabela 7.4 – Tabela de incertezas da espessura da amostra ( $u_T$ )

Símbolo	Descrição	Correção	a ( $\mu\text{m}$ )	Distribuição	U ( $\mu\text{m}$ )	$\nu$
Re	Repetitividade	-	1.390	Normal	440	9
R	Resolução do dispositivo mostrador	-	10	Retangular	5,8	$\infty$
$u_T$	Incerteza combinada	-		Normal	440	9

A árvore da incerteza da vazão volumétrica está demonstrada na Figura (7.7).

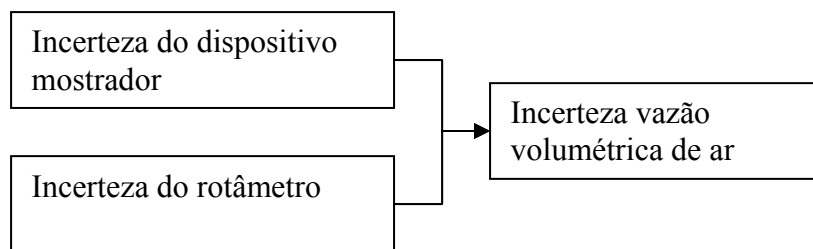


Figura 7.7 – Diagrama da propagação de incertezas da vazão volumétrica de ar.

#### 7.2.4.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos

A resolução do dispositivo mostrador, assim como a incerteza do rotâmetro são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias, não tendo, conseqüentemente, componentes sistemáticas.

#### 7.2.4.2. Quantificação dos efeitos aleatórios

##### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada assumindo uma distribuição retangular com  $a = R/2$ , isto por ser instrumento analógico. Como está sendo assumida uma distribuição retangular, o número de graus de liberdade é infinito:

$$u_R = 4,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.26)$$

$$\nu_R = \infty \quad (7.27)$$

## II – Incerteza do rotâmetro

A incerteza devida ao rotâmetro, fornecida pelo manual, é igual a 1,5% do fundo de escala, assim:

$$u_i = 3,33 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1,5}{100} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.28)$$

$$v_i = \infty \quad (7.29)$$

## III - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (7.5). A Figura (7.8) demonstra a comparação da incerteza do dispositivo mostrador e a incerteza do rotâmetro na incerteza da vazão do escoamento de ar. Pode-se perceber que a incerteza proveniente do manual do rotâmetro é dominante. Porém, como as duas incertezas são provenientes de um mesmo equipamento, não se pode melhorar uma delas sem alterar a outra, no caso da compra de um equipamento com menores incertezas, ou seja, as duas fontes de incerteza são inerentes do mesmo instrumento de medição.

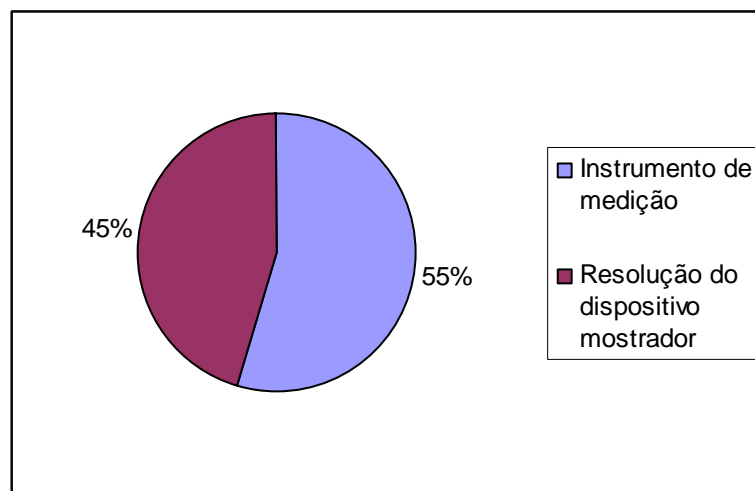


Figura 7.8 – Parcela de contribuição das incertezas para a incerteza da vazão do escoamento de ar.

### 7.2.4.3 Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos:

Calcula-se a incerteza combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (3.5):

$$u_U = 6,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.30)$$

Podemos perceber pela Eq. (3.20) que a contribuição da incerteza do instrumento é dominante em relação à da resolução de escala..

O número de graus de liberdade efetivos é calculado pela Eq. (3.12):

$$v_{ef} = \infty \quad (7.31)$$

O número de graus de liberdade será infinito.

Tabela 7.5 – Tabela de incertezas da vazão volumétrica de ar ( $u_U$ )

Símbolo	Descrição	Correção	a (m <sup>3</sup> /s)	Distribuição	u(m <sup>3</sup> /s)	V
$u_R$	Incerteza da resolução do mostrador	-	$8,33 \cdot 10^{-6}$	Normal	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$\infty$
$u_I$	Incerteza do instrumento	-	-	Normal	$5 \cdot 10^{-6}$	$\infty$
$u_C$	Incerteza combinada	-	-	Normal	$6,51 \cdot 10^{-6}$	$\infty$

### 7.3. Cálculo da Incerteza Expandida Total

Até agora foi calculada a contribuição da incerteza para cada fonte de incertezas da bancada de determinação da resistividade ao escoamento da amostra. Para a determinação da incerteza expandida da bancada, deve-se primeiro aplicar a Eq. (3.5):

$$u_c^2(r_0) = \theta_d^2 u_d^2 + \theta_P^2 u_P^2 + \theta_T^2 u_T^2 + \theta_U^2 u_U^2 \quad (7.32)$$

Os coeficientes de sensibilidade já foram definidos no tópico (3.2), sendo que para os valores de d, P, T e U, foram utilizados os seguintes valores médios medidos:

$$d = 0,09687m \quad (7.33)$$

$$P = 11,947Pa \quad (7.34)$$

$$T = 0,02479m \quad (7.35)$$

$$U = 2,67 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (7.36)$$



Com os valores das equações (7.33) à (7.36), pode-se determinar os valores dos coeficientes de sensibilidade substituindo estes valores nas equações (7.3) à (7.6).

$$\theta_d = 274.642,31 \quad (7.37)$$

$$\theta_p = 1.113,44 \quad (7.38)$$

$$\theta_T = 536.599,45 \quad (7.39)$$

$$\theta_U = 49.821.349,43 \quad (7.40)$$

Com esses dados, podemos determinar a incerteza padrão combinada da resistividade retornando à Eq. (3.11):

$$u_c(r_0) = 1651,08 \text{ rayls/m} \quad (7.41)$$

O número de graus de liberdade efetivo é dado por:

$$\nu_{ef} = 9,1 \cdot 10^{28} \approx \infty \quad (7.42)$$

E o coeficiente de student, para um número infinito de graus de liberdade, é igual a 2.

$$U = 3302,16 \text{ rayls/m} \quad (7.43)$$

Com a incerteza expandida, podemos finalmente determinar o resultado de medição da amostra por:

$$RM = 11.015,1 \pm 3302,2 \text{ rayls/m} \quad (7.44)$$

Percebe-se que a incerteza da bancada está por volta de 30%. Desta forma, percebe-se que a incerteza está superior à incerteza das amostras que está em torno de 20%, conforme discutido no tópico 3.1.3.

#### 7.4. Conclusões

A Figura 7.9, demonstra um diagrama de incerteza para a resistividade ao fluxo incluindo todas as fontes consideradas neste trabalho.

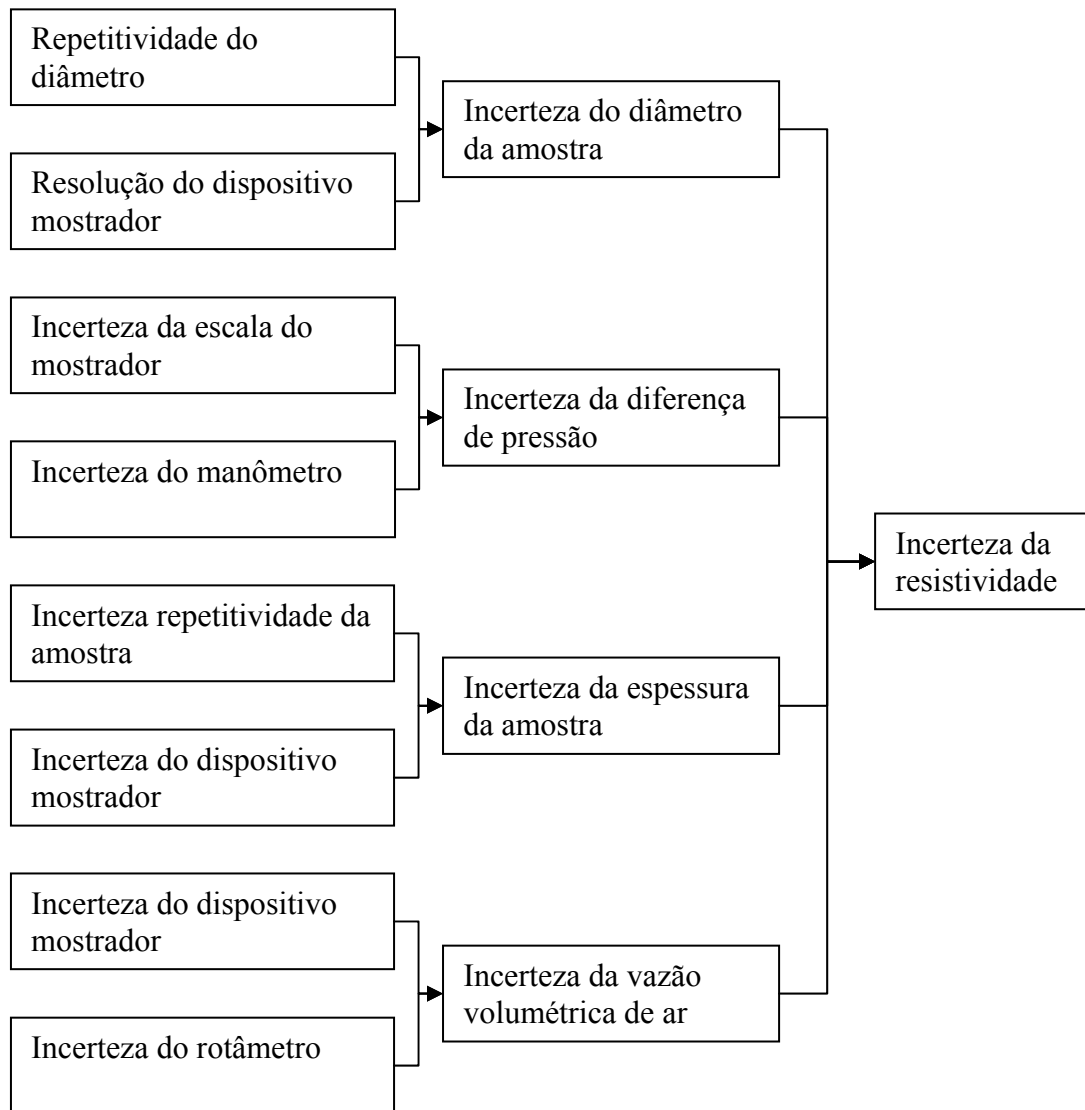


Figura 7.9 – Diagrama das fontes de incerteza para a medição da resistividade ao fluxo

A Figura 7.10 mostra a comparação entre as quatro fontes de incerteza da medição da resistividade ao fluxo. O motivo da incerteza da bancada resultar em um valor tão elevado (30%) está na medição da pressão, conforme pode ser observado na Figura (7.10). E a razão para esta contribuição elevada da incerteza da pressão se deve ao fato de que o instrumento de medição da pressão não está adequado para medir esta amostra em específico, já que a incerteza do instrumento (segundo o manual) é de 0,5% do fundo de escala, ou seja, 1,227 Pa e, medindo-se um valor próximo de 11 Pa, temos uma incerteza padrão próxima de 11%, sendo que a incerteza expandida será o dobro (22%), pois o coeficiente de student é igual a 2 para infinitos graus de liberdade. Para reduzir este problema, deve-se utilizar um manômetro com uma faixa de medição menor como, por exemplo, de 0 a 25 Pa. Pode ser afirmado que este instrumento está inadequado para medir a resistividade desta amostra em particular. No caso de amostras com uma resistividade maior, onde o valor da pressão medido seria mais elevado, este instrumento poderá estar adequado.

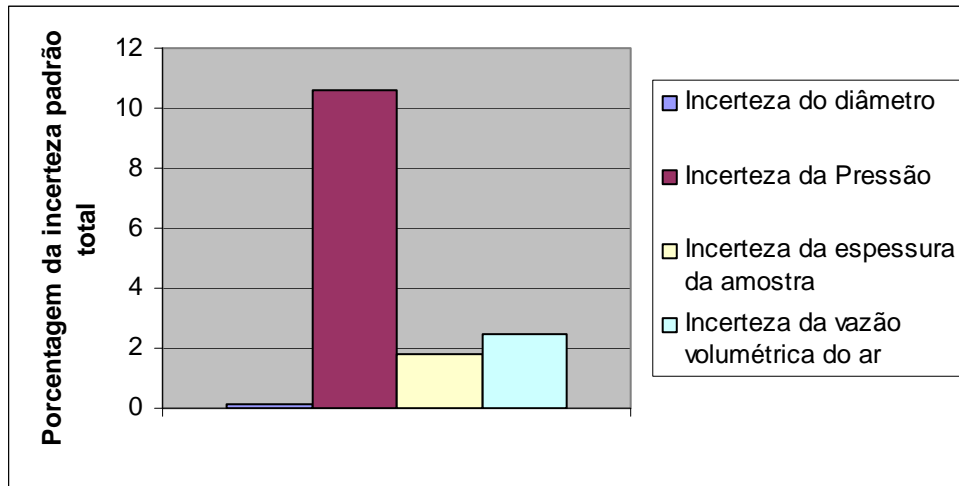


Figura 7.10 - Parcela de contribuição das fontes de incerteza para a incerteza da resistividade ao fluxo.

## CAPÍTULO 8

### INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA POROSIDADE

#### 8.1. Introdução

Neste capítulo será abordada uma forma de determinação da incerteza de medição da porosidade de materiais acústicos. Para a demonstração da metodologia foi calculada a incerteza da bancada de medição da porosidade um dos tipos de materiais (Tipo A) e os resultados dos demais materiais se encontram no anexo.

Quando se faz uma medição, por melhor que sejam os equipamentos, as amostras ou mesmo o próprio operador, sempre existirá uma incerteza no processo de medição. Essas incertezas se acumulam, gerando um resultado de certa forma duvidoso, ou seja, há uma incerteza em relação ao valor medido.

A bancada escolhida neste trabalho para medição da porosidade tem a vantagem de ter um baixo custo na comparado com outros métodos. Porém, no caso de espumas, o resultado obtido pode ser um pouco maior do que o que se mediria com outras bancadas, visto que os poros fechados serão abertos pela compressão. Mas, como discutido anteriormente, os materiais de absorção acústica normalmente têm uma porosidade na faixa de 95 até 99%. Com isto, uma diferença de 1% ou 2% na estimativa da porosidade é praticamente irrelevante para distinguir os materiais porosos.

#### 8.2. Fontes de incerteza na medição da porosidade

A metodologia de medição da porosidade está descrita em detalhes no tópico 5.2. A Figura (8.1) traz um breve esquema das variáveis pertinentes para a estimativa da porosidade. Observa-se que, mesmo para a medição da altura  $h$ , o pistão está sob a ação da força de 2 toneladas, já que verificou uma variação, mesmo que pequena, ao de se medir esta mesma altura sem aplicar a força. Além das variáveis mostradas na Figura (8.1), não se deve esquecer da espessura da amostra, que também é uma variável influente no processo da estimativa da porosidade.

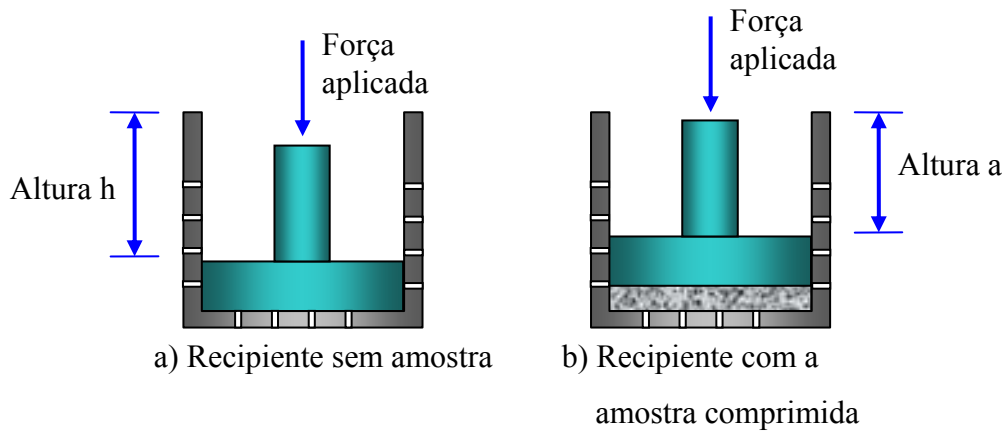


Figura 8.1 – Diagrama representativo das medições feitas com o paquímetro na bancada. A Figura (a) demonstra a medição da altura  $h$ , ou seja, a altura da lateral do recipiente até a superfície superior do pistão, sem que haja amostra dentro do recipiente. A Figura (b) demonstra a medição da altura  $a$ , ou seja, a altura medida da lateral do recipiente à superfície superior do pistão, com a amostra comprimida.

Sendo a porosidade estimada pela Eq. (5.5), temos as seguintes fontes de incerteza:

- Medição da altura  $h$  – pois é a altura considerada máxima, já que o recipiente está sem amostra;
- Medição da altura  $a$  – esta medição é feita para cada amostra de material adicionada. Portanto, tem influência direta na medição da porosidade;
- Medição da espessura da amostra  $T$  – como a porosidade depende do volume inicial da amostra, esta variável não pode ser descartada.

A Figura (8.2) demonstra as fontes de incertezas consideradas neste trabalho e descritas acima.

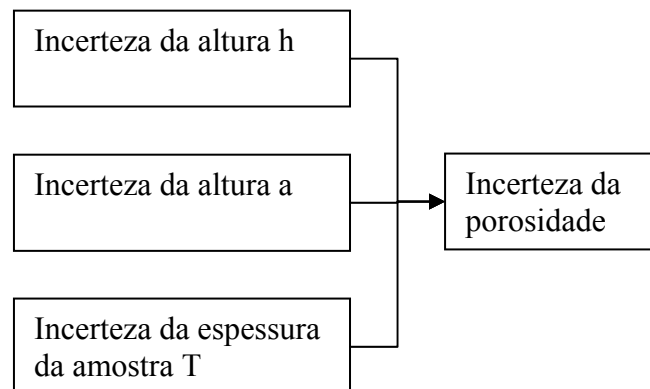


Figura 8.2 – diagrama da propagação da incerteza da porosidade

A estimativa da porosidade é dada pela Eq. (5.6). E, para determinar a incerteza da porosidade descrita pela Eq. (8.1), é necessário determinar os coeficientes de sensibilidade, que estão expressos nas equações (8.2) à (8.4).

$$u_c^2(\Omega) = \theta_h^2 u_h^2 + \theta_a^2 u_a^2 + \theta_T^2 u_T^2 \quad (8.1)$$

O coeficiente de sensibilidade para a altura  $h$  é determinado pela Eq. (8.2):

$$\theta_h = \frac{\partial \Omega}{\partial h} = -\frac{1}{T} \quad (8.2)$$

O coeficiente de sensibilidade da altura  $a$  é determinado pela Eq. (8.3):

$$\theta_a = \frac{\partial \Omega}{\partial a} = \frac{1}{T} \quad (8.3)$$

O coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra é determinado pela Eq. (8.4):

$$\theta_T = \frac{\partial \Omega}{\partial T} = \frac{h-a}{T^2} \quad (8.4)$$

Com os coeficientes de sensibilidade, pode-se calcular a incerteza da bancada de medição da porosidade. Faz-se necessário o cálculo das incertezas de cada parâmetro relevante para a incerteza da porosidade, que serão determinados nos tópicos seguintes.

### 8.2.1. Incerteza da altura $h$ ( $u_h$ )

A incerteza da altura entre a lateral do recipiente e o pistão é devido tanto à incerteza do paquímetro utilizado como da irregularidade do recipiente. Sendo que o paquímetro utilizado é um instrumento de medição analógico, temos:

- c) Incerteza do mostrador analógico;
- d) Repetitividade na medição da altura  $h$ .

A repetitividade na medição da altura  $h$  foi detectada ao medir a altura  $h$  em vários pontos do recipiente, pois resultaram valores distintos. Desta forma, esta fonte de incerteza não pode ser desconsiderada.

A Figura 8.3 demonstra as fontes de incerteza da altura  $h$  consideradas neste trabalho.

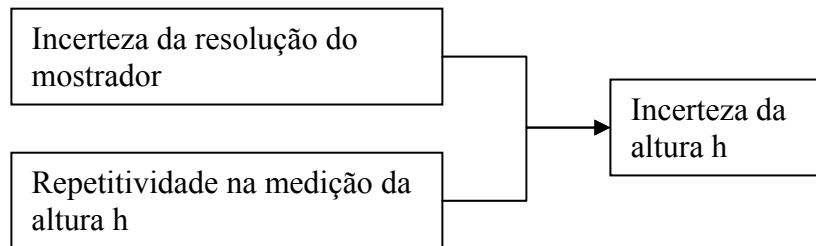


Figura 8.3 - diagrama da propagação da incerteza da altura  $h$

### 8.2.1.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos da altura $h$

A repetitividade e a resolução do dispositivo mostrador são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias, portanto não contêm efeitos sistemáticos.

### 8.2.1.2. Quantificação dos efeitos aleatórios da altura $h$

#### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7). Sendo uma incerteza tipo B, o número de graus de liberdade é infinito.

A incerteza resulta em:

$$u_R = 2,5\mu\text{ m} \quad (8.5)$$

E o número de graus de liberdade:

$$\nu_R = \infty \quad (8.6)$$

#### II – Repetitividade da altura $h$

A altura  $h$  é um mensurando variável. Para determinar esta fonte de incerteza, fizeram-se 10 medições em pontos diferentes. A tabela (8.1) traz os resultados destas medições.

Tabela 8.1 – Resultados da medição da altura h

Medição	Altura h (mm)
1	15,04
2	15,04
3	15,15
4	15,16
5	15,12
6	15,04
7	15,07
8	15,12
9	15,02
10	15,11

Com os resultados da tabela (8.1), estimou-se o desvio padrão:

$$s = 0,00005 \text{ m} \quad (8.7)$$

E a média das medições:

$$\bar{I} = 0,01595 \text{ m} \quad (8.8)$$

Como foram feitas dez medições, a incerteza é estimada pela Eq. (3.5) que resulta em:

$$u_h = 1,6 \text{ } \mu\text{m} \quad (8.9)$$

E o número de graus de liberdade:

$$v_h = 9 \quad (8.10)$$

### III – Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (8.2). E, vale salientar, a incerteza da resolução do dispositivo mostrador é maior que a incerteza proveniente da repetitividade na medição da altura h, o que está demonstrado na Figura (8.4).



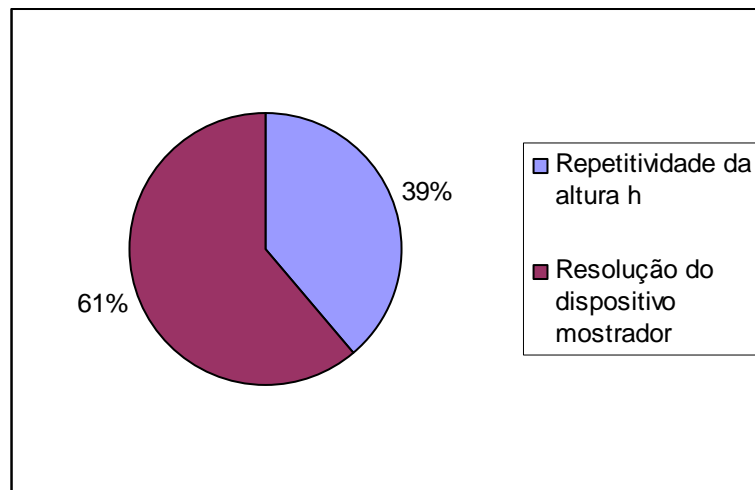


Figura 8.4 – Parcela de contribuição das incertezas para a altura h.

Este resultado demonstra que, para reduzir a incerteza na medição da altura h, faz-se necessário utilizar um equipamento com melhor resolução do dispositivo mostrador.

### 8.2.1.2. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos da altura h

Calcula-se a incerteza combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (3.11), resultando em:

$$u_C = 3 \mu\text{m} \quad (8.11)$$

O número de graus de liberdade efetivos é determinado pela Eq. (3.12):

$$v_{ef} = 16,875 \quad (8.12)$$

O número de graus de liberdade é o número inteiro de 16,875, ou seja,  $v_{ef} = 16$ .

Tabela 8.2 – Tabela de incertezas da altura h

Símbolo	Descrição	correção	a(μm)	distribuição	U (μm)	v
Es	Incerteza da escala do mostrador	-	5	Normal	2,5	∞
Re	Incerteza da repetitividade	-	-	Normal	1,6	9
u <sub>C</sub>	Incerteza combinada	-	-	Normal	3	16

### 8.2.2. Incerteza da altura $a$ ( $u_a$ )

A incerteza da altura entre a lateral do recipiente e o pistão sendo que a amostra está comprimida dentro do recipiente, é devida tanto à incerteza do paquímetro utilizado como da irregularidade do recipiente. Sendo o paquímetro utilizado um instrumento analógico, temos:

- e) Incerteza do mostrador analógico;

A Figura 8.5 demonstra as fontes de incerteza da altura  $a$  consideradas neste trabalho.

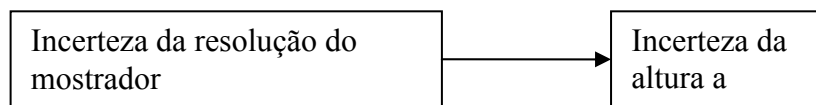


Figura 8.5 - diagrama da propagação da incerteza da altura  $a$

#### 8.2.2.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos da altura $a$

A resolução do dispositivo mostrador é uma fonte de incerteza apenas com componentes aleatórias.

#### 8.2.2.2. Quantificação dos efeitos aleatórios da altura $a$

##### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzida pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7) e o número de graus de liberdade é infinito.

$$u_R = 2,5 \mu\text{m} \quad (8.13)$$

$$\nu_R = \infty \quad (8.14)$$

##### II - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (8.3). Como a incerteza da altura  $a$  só depende da resolução do dispositivo mostrador, se necessitar melhorar esta fonte de incerteza deverá ser utilizado um instrumento com uma resolução mais adequada.

### 8.2.2.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos da altura a

Calcula-se a incerteza combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (4.7).

$$u_c = 2,5 \mu\text{m} \quad (8.15)$$

O número de graus de liberdade efetivo é igual a infinito, já que a única fonte de incerteza para a medição da altura a tem um número de graus de liberdade infinito.

Tabela 8.3 – Tabela de incertezas da altura a

Símbolo	Descrição	correção	a(μm)	distribuição	u (μm)	v
Es	Incerteza da escala do mostrador	-	5	Normal	2,5	∞
u <sub>c</sub>	Incerteza combinada	-	-	Normal	2,5	∞

### 8.2.3. Incerteza da espessura da amostra ( $u_T$ )

A incerteza da altura entre a lateral do recipiente e o pistão sendo que a amostra está comprimida dentro do recipiente, é devida tanto à incerteza do paquímetro utilizado como da irregularidade do recipiente. Sendo o paquímetro utilizado um instrumento analógico, temos:

- a) Resolução do dispositivo mostrador;
- b) Repetitividade da espessura da amostra..

A Figura 8.6 demonstra as fontes de incerteza da espessura da amostra consideradas neste trabalho.

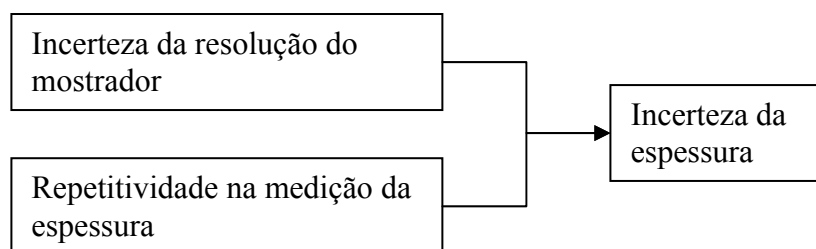


Figura 8.6 - diagrama da propagação da incerteza da espessura da amostra

### 8.2.3.1. Quantificação dos efeitos sistemáticos da espessura da amostra

A resolução do dispositivo mostrador são fontes de incertezas apenas com componentes aleatórias.

### 8.2.3.2. Quantificação dos efeitos aleatórios da espessura da amostra

#### I – Resolução do dispositivo mostrador

A incerteza padrão do erro de arredondamento, introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador, pode ser determinada utilizando a Eq. (3.7). Sendo uma incerteza tipo B, o número de graus de liberdade é infinito

$$u_R = 2,5 \text{ } \mu\text{m} \quad (8.16)$$

$$v_R = \infty \quad (8.17)$$

#### II – Repetitividade da espessura da amostra

A repetitividade da espessura da amostra é um mensurando variável, pois há uma grande variação nas medidas de sua espessura. Dois motivos básicos foram constatados:

- a) As amostras de um mesmo material demonstraram variação em sua espessura;
- b) Como as amostras são muito macias, não se tem a certeza de que está medindo corretamente, pois qualquer pressão extra com o paquímetro resulta numa deformação da amostra, alterando o resultado. Por este motivo, mesmo com um paquímetro, os resultados das medições da espessura das amostras foram arredondadas para uma casa decimal (em milímetros).

A tabela (8.4) traz o resultado das medições da espessura das amostras do material Tipo I:

Assim:

$$s = 0,00139 \text{ m} \quad (8.18)$$

$$\bar{I} = 0,02479 \text{ m} \quad (8.19)$$

Como foram feitas dez medições, a incerteza é dada por:

$$u_{Re} = 440 \text{ } \mu\text{m} \quad (8.20)$$

$$v_h = 9$$

(8.21)

Tabela 8.4 – Resultados da medição da espessura da amostra

Medição	T (mm)
1	22,8
2	25,0
3	22,8
4	26,0
5	24,2
6	25,9
7	24,0
8	24,5
9	27,0
10	25,7

### III - Conclusões

Tais informações foram transcritas para as quatro últimas colunas da tabela (8.5). A Figura (8.7) demonstra a contribuição das fontes de incerteza para a medição da espessura das amostras. Percebe-se que a repetitividade da espessura da amostra é a fonte de incerteza dominante. Isto porque a medição da espessura das amostras com um paquímetro é muito complicado pois, como a amostra é macia, qualquer pressão adicional além do toque faz com que a mesma se deforme, alterando o resultado obtido. E, além deste problema, as amostras tendem a variar sua espessura ao longo da mesma amostra.

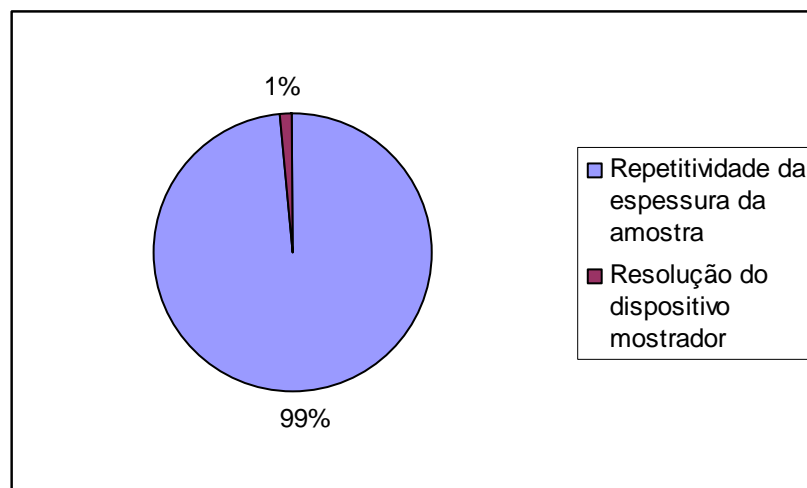


Figura 8.7 – Parcela de contribuição das incertezas para a incerteza da espessura da amostra.

### 8.2.3.3. Cálculo da incerteza combinada e do número de graus de liberdade efetivos da espessura da amostra

Calcula-se a incerteza combinada a partir da incerteza padrão de cada fonte de incertezas através da Eq. (4.7).

$$u_C = 0,00044 \text{ m} \quad (8.22)$$

Podemos perceber pela Eq. (4.15) que a contribuição da repetitividade da amostra é dominante para a incerteza combinada.

O número de graus de liberdade efetivos é calculado através da Eq. (3.17):

$$v_{ef} = 9 \quad (8.23)$$

Tabela 8.5 – Tabela de incertezas da espessura da amostra

Símbolo	Descrição	correção	a(μm)	distribuição	u(μm)	v
Es	Incerteza da escala do mostrador	-	5	Normal	2,5	∞
Re	Incerteza da repetitividade	-	-	Normal	440	9
u <sub>C</sub>	Incerteza combinada	-	-	Normal	440	9

### 8.3. Cálculo da incerteza expandida total

Até agora foi calculada a contribuição da incerteza para cada fonte de incertezas da bancada de determinação da porosidade da amostra.

Os coeficientes de sensibilidade já foram definidos no tópico 8.2. Sendo que para os valores de a, h e T, foram utilizados os valores médios medidos. Assim:

$$a = 0,01509 \text{ m} \quad (8.24)$$

$$h = 0,01595 \text{ m} \quad (8.25)$$

$$T = 0,02479 \text{ m} \quad (8.26)$$

Com os valores das equações (8.30) à (8.31), pode-se determinar os valores dos coeficientes de sensibilidade substituindo estes valores nas equações (8.2) à (8.4).

$$\theta_h = -40,34 \quad (8.27)$$

$$\theta_a = 40,34 \quad (8.28)$$

$$\theta_T = 1,40 \quad (8.29)$$

Com esses dados, pode-se determinar a incerteza combinada da resistividade retornando à Eq. (3.5):

$$u_c(\Omega) = 0,00064 \quad (8.30)$$

O número de graus de liberdade efetivo é dado por:

$$v_{ef} = 1,5 \cdot 10^{25} \approx \infty \quad (8.31)$$

E, o coeficiente de student para um número infinito de graus de liberdade é igual a 2.

$$U = 0,0013 \quad (8.32)$$

Com a incerteza expandida, pode-se finalmente determinar o resultado de medição da amostra por:

$$RM = 0,9946 \pm 0,00127 \quad (8.33)$$

Percebe-se que a incerteza da bancada está por volta de 0,1% do resultado de medição, o que faz esta incerteza um resultado satisfatório mediante os equipamentos utilizados.

#### 8.4. Conclusões

A Figura (8.8), demonstra um diagrama de incerteza para a porosidade incluindo todas as fontes consideradas neste trabalho.

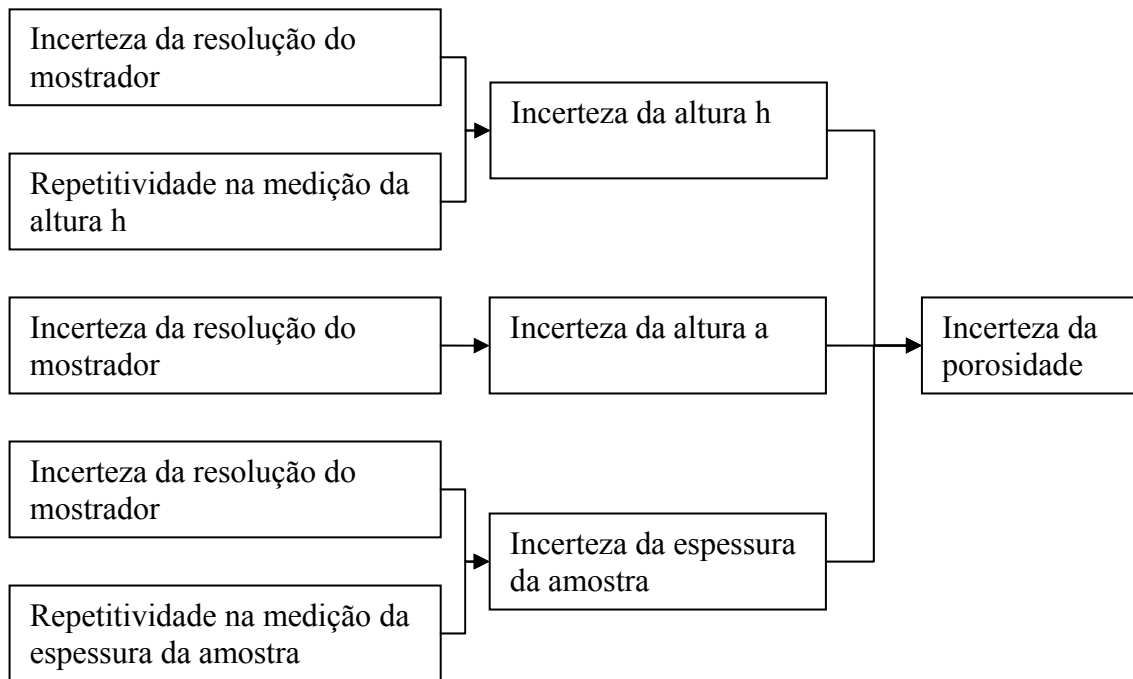


Figura 8.8 – Diagrama das fontes de incerteza para a medição de porosidade

A Figura (8.9) mostra uma comparação entre as três fontes de incerteza na medição da porosidade. A principal contribuição para a incerteza da porosidade é a proveniente da medição da espessura da amostra, sendo que as demais têm praticamente a mesma contribuição. Assim sendo, para reduzir a incerteza desta bancada de medição da porosidade, precisa-se estudar um meio mais adequado de medir a espessura das amostras. Porém, como no Capítulo 5 determinou-se que a incerteza da heterogeneidade das amostras para a porosidade esteve em torno de 0,66%, a incerteza da bancada é muito menor, sendo desnecessária uma melhoria na mesma sem que tenham materiais com menor heterogeneidade.

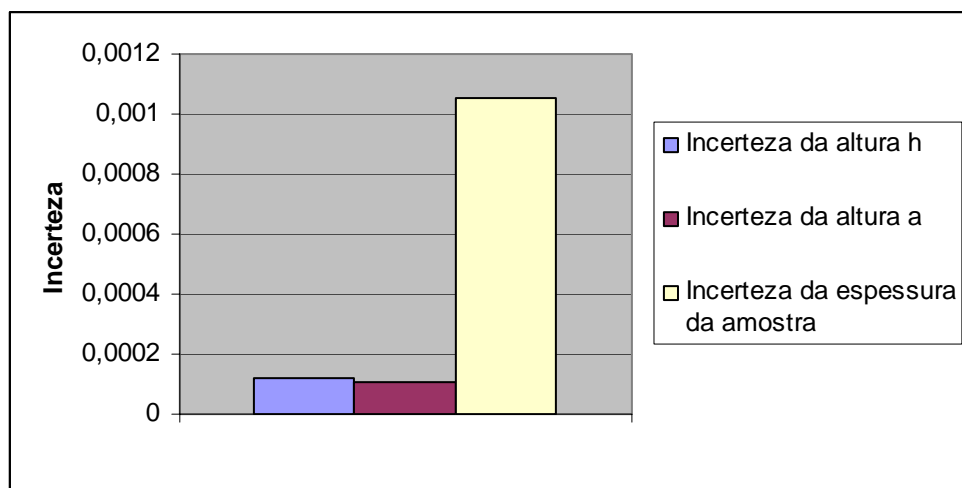


Figura 8.9 - Parcela de contribuição das fontes de incerteza para a incerteza da porosidade.



## CAPÍTULO 9

### INCERTEZA NAS MEDIÇÕES DA IMPEDÂNCIA E DA ABSORÇÃO ACÚSTICA

#### 9.1. Introdução

Neste capítulo será abordada uma forma de determinação da incerteza de medição da impedância e da absorção de materiais de absorção acústica. Sendo que para a demonstração da metodologia foi calculada a incerteza da bancada de impedância para um dos tipos de materiais (Tipo A) e os resultados dos demais materiais se encontram no anexo.

Quando se faz uma medição, por melhor que sejam os equipamentos, as amostras ou mesmo o próprio operador, sempre existirá uma incerteza no processo de medição. Essas incertezas se acumulam, gerando um resultado de certa forma duvidoso, ou seja, com uma incerteza em relação ao valor medido. A Norma ISO 10534-2 [28] traz um método que abrange a medição de absorção sonora de materiais porosos que pode ser utilizado para determinar a absorção e a atenuação do som. O método desta Norma está descrito no tópico 2.2.3.1.

#### 9.2. Fontes de incerteza na medição da impedância e da absorção acústica

Na medição da absorção e da impedância acústica, têm-se várias fontes de incerteza. Para determiná-las, verifica-se pelas equações (2.21) e (2.22) que tanto a absorção quanto a impedância são dependentes do coeficiente de reflexão, que é determinado pela Eq. (2.10). Analisando a Eq. (2.10), tem-se que o coeficiente de reflexão é diretamente dependente da FRF ( $H_{AB}$ ) e das posições do microfone ( $d_1$  e  $d_2$ ), ou seja, a incerteza do coeficiente de reflexão é dependente das incertezas dos parâmetros acima relacionados. Assim, podem-se determinar os coeficientes de sensibilidade para o coeficiente de reflexão.

O coeficiente de sensibilidade em relação à posição 1 do microfone é dado pela Eq. (9.1).

$$\theta_{d_1} = 2jkH_{12} \frac{\cos(k(d_1 - d_2)) - H_{12}}{(e^{-jkd_2} - H_{12}e^{-jkd_1})^2} \quad (9.1)$$

O coeficiente de sensibilidade em relação à posição 2 do microfone é dado pela Eq. (9.2).

$$\theta_{d_2} = 2jkH_{12} \frac{\cos(k(d_1 - d_2)) - 1}{(e^{-jkd_2} - H_{12}e^{-jkd_1})^2} \quad (9.2)$$

O coeficiente de sensibilidade em relação à Função resposta em frequência (FRF) é dado pela Eq. (9.3).

$$\theta_{H_{12}} = 2j \frac{\sin(k(d_1 - d_2))}{(e^{-jkd_2} - H_{12}e^{-jkd_1})^2} \quad (9.3)$$

$H_{12}$  é determinada pela Eq. (2.8), sendo portanto dependente das pressões medidas nas posições A e B do microfone e do número de onda. Sendo que as pressões são medidas diretamente, pode-se determinar os coeficientes de sensibilidade para as pressões medidas nas posições 1 e 2 do microfone.

O coeficiente de sensibilidade em relação à pressão do microfone na posição 1 é definido pela Eq. (9.4).

$$\theta_{P_1} = \frac{1}{P_2} \theta_{H_{12}} \quad (9.4)$$

O coeficiente de sensibilidade em relação à pressão do microfone na posição 2 é definido pela Eq. (9.5).

$$\theta_{P_2} = -\frac{P_1}{P_2^2} \theta_{H_{12}} \quad (9.5)$$

E, sendo o número de onda uma variável que não é medida diretamente, e sim função da temperatura, o coeficiente de sensibilidade para a temperatura é dada pela Eq. (9.6):

$$\theta_T = -j \frac{(\omega \gamma R_{air})}{c_0^3} \frac{\partial R}{\partial k} \quad (9.6)$$

sendo,

$$\frac{\partial R}{\partial k} = 2j \frac{(d_1 + d_2)H_{12} \cos(k(d_1 - d_2)) - d_1 H_{12}^2 - d_2}{(e^{-jkd_2} - H_{12}e^{-jkd_1})^2} \quad (9.7)$$

Assim, tem-se a incerteza combinada do coeficiente de reflexão:

$$u_c^2(R) = \theta_{d_1}^2 u_{d_1}^2 + \theta_{d_2}^2 u_{d_2}^2 + \theta_{P_1}^2 u_{P_1}^2 + \theta_{P_2}^2 u_{P_2}^2 + \theta_T^2 u_T^2 \quad (9.8)$$

A Figura (9.1) traz um diagrama demonstrando a propagação da incerteza do coeficiente de reflexão.

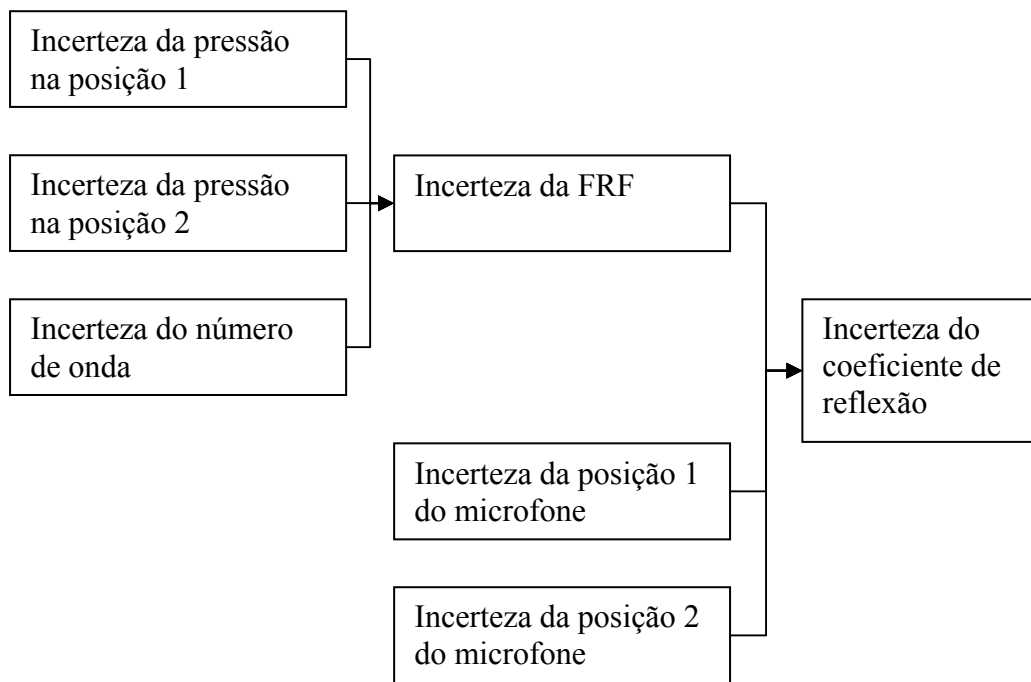


Figura 9.1 – Diagrama da propagação de incertezas para o coeficiente de reflexão.

Com estes dados pode-se calcular a incerteza combinada da impedância acústica. Sendo que a impedância acústica é somente dependente do coeficiente de reflexão conforme discutido anteriormente:

$$u_c^2(\xi) = \theta_R^2 u_R^2 \quad (9.9)$$

onde,

$$\theta_R = \frac{2}{(1-R)^2} \quad (9.10)$$

Desta forma, pode-se calcular a incerteza combinada da impedância acústica na medição num tubo de impedância.

A Figura (9.2) traz um diagrama demonstrando a propagação da incerteza da impedância acústica.



Figura 9.2 – Diagrama da propagação de incertezas para a impedância acústica.

Também pode-se determinar a incerteza do coeficiente de absorção da mesma forma que para a impedância acústica. Sendo que o coeficiente de absorção  $\alpha$  é determinado pela Eq. (2.11), temos que o mesmo é dependente somente do coeficiente de reflexão, assim como a impedância acústica. Assim, a incerteza combinada para o coeficiente de absorção é dada pela Eq. (9.13).

$$u_c^2(\alpha) = \theta_R^2 u_R^2 \quad (9.13)$$

onde o coeficiente de sensibilidade dado pela Eq. (9.14),

$$\theta_R = -2R \quad (9.14)$$

A Figura (9.3) traz um diagrama demonstrando a propagação da incerteza para o coeficiente de absorção.

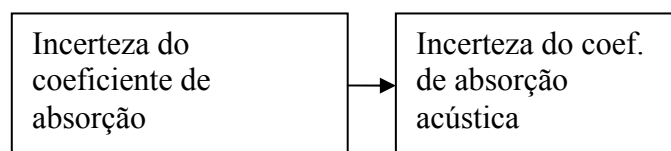


Figura 9.3 – Diagrama da propagação de incertezas para o coeficiente de absorção acústica.

### 9.2.1. Fontes de incerteza das posições do microfone

As posições do microfone foram medidas utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. A distância entre a extremidade do tubo e a posição do microfone mais próxima,  $x_1$ , é igual a 150,43 mm. Sendo que a distância entre os microfones,  $x_2$ , é igual a 216,44

mm, conforme Figura (9.4). Lembrando, também, que a amostra tem uma espessura  $e$  que varia com cada amostra analisada.

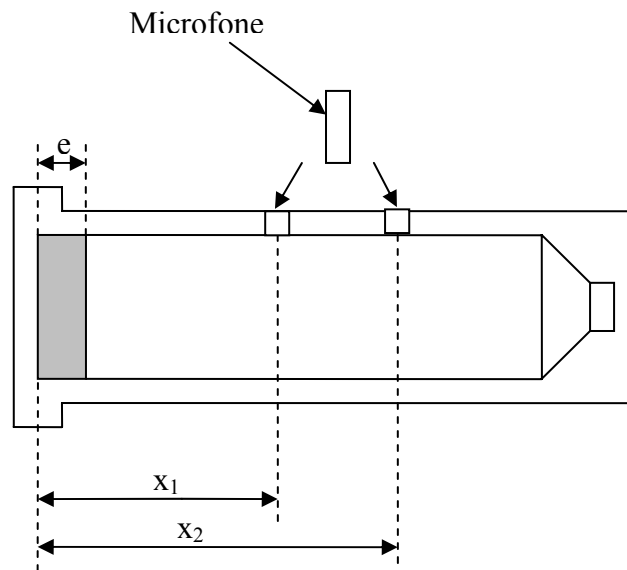


Figura 9.4 – Diagrama das dimensões importantes para a determinação das distâncias  $d_1$  e  $d_2$  representadas na Figura (2.3).

Com os valores de  $x_1$ ,  $x_2$  e  $e$ , pode-se determinar as distâncias  $d_1$  e  $d_2$  através das equações (9.15) e (9.16).

$$d_1 = x_1 - e \quad (9.15)$$

$$d_2 = x_2 - e \quad (9.16)$$

Desta forma, percebe-se que a incerteza da distância  $d_1$  depende tanto de  $x_1$  quanto da espessura da amostra. E a incerteza da distância  $d_2$  depende de  $x_1$ ,  $x_2$  e da espessura da amostra.

#### 9.2.1.1. Incerteza da posição $d_1$ do microfone

Pode-se estimar a incerteza de  $d_1$  pela Eq. (9.17).

$$u_{d_1} = \sqrt{\theta_{x_1}^2 u_{x_1}^2 + \theta_e^2 u_e^2} \quad (9.17)$$

sendo,

$u_{d_1}$  a incerteza combinada da distância  $d_1$ ,

$\theta_{x_1}$  o coeficiente de sensibilidade da distância  $x_1$ ,

$u_{x_1}$  a incerteza da distância  $x_1$ ,

$\theta_e$  o coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra,

$u_e$  a incerteza da espessura da amostra.

O coeficiente de sensibilidade da distância  $x_1$  é dada pela Eq. (9.18).

$$\theta_{x_1} = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} = 1 \quad (9.18)$$

A incerteza da distância  $x_1$  é decorrente do paquímetro utilizado. Lembrando que é um paquímetro digital, a sua incerteza é dada pela Eq. (3.6), resultando no valor de 0,005 mm, sendo que o número de graus de liberdade é infinito, visto que é uma incerteza Tipo B.

Da mesma forma, o coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra pode ser determinado pela Eq. (9.19).

$$\theta_{e_1} = \frac{\partial d_1}{\partial e} = -1 \quad (9.19)$$

A incerteza da espessura da amostra foi determinada no tópico (7.2.3.3), sendo que a mesma é igual a 0,00044 mm e com 9 graus de liberdade.

Com estes valores pode-se determinar a incerteza combinada da distância  $d_1$ , que resulta na Eq. (9.20).

$$u_{d_1} = 0,005 \text{ mm} \quad (9.20)$$

O número de graus de liberdade é dado pela Eq. (3.12), resultando num total de 9 graus de liberdade para a incerteza da distância  $d_1$ .

### 9.2.1.2. Incerteza da posição $d_2$ do microfone

Pode-se estimar a incerteza de  $d_2$  pela Eq. (9.21).

$$u_{d_2} = \sqrt{\theta_{x_2}^2 u_{x_2}^2 + \theta_e^2 u_e^2} \quad (9.21)$$

sendo,

$u_{d_2}$  a incerteza combinada da distância  $d_2$ ,

$\theta_{x_2}$  o coeficiente de sensibilidade da distância  $x_2$ ,

$u_{x_2}$  a incerteza da distância  $x_2$ ,

$\theta_e$  o coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra,

$u_e$  a incerteza da espessura da amostra.

O coeficiente de sensibilidade da distância  $x_2$  é dada pela Eq. (9.22).

$$\theta_{x_2} = \frac{\partial d_2}{\partial x_2} = 1 \quad (9.22)$$

A incerteza da distância  $x_2$  é decorrente do paquímetro utilizado. Como se utiliza é um paquímetro digital, a sua incerteza é dada pela Eq. (3.6), resultando no valor 0,005 mm, sendo que o número de graus de liberdade é infinito, visto que é uma incerteza Tipo B.

Da mesma forma, o coeficiente de sensibilidade da espessura da amostra pode ser determinado pela Eq. (9.23).

$$\theta_{e_2} = \frac{\partial d_2}{\partial e} = 1 \quad (9.23)$$

A incerteza da espessura da amostra foi determinada no tópico (7.2.3.3), sendo que o seu valor é igual a 0,00044 mm, com 9 graus de liberdade.

Com estes valores, pode-se determinar a incerteza combinada da distância  $d_2$ , que resulta na Eq. (9.24).

$$u_{d_2} = 0,005 \text{ mm} \quad (9.24)$$

O número de graus de liberdade é dado pela Eq. (3.12), resultando num total de 9 graus de liberdade para a incerteza da distância  $d_2$ .

### 9.2.2 Incerteza da pressão medida na posição $d_1$

A incerteza da pressão medida no ponto 1 é decorrente da incerteza do próprio microfone. Segundo as especificações do mesmo (Delta Tron Pressure-field 1/4" Microfone Type 4944A), a incerteza é de 0,3 dB para uma confiança de 95%. Sendo uma incerteza do tipo B, considera-se um coeficiente de student igual a 2 e um número de graus de liberdade infinito. Desta forma, a incerteza resultante do microfone na posição 1 ( $P_1$ ) é dada pela Eq. (9.25).

$$u_{NPS} = 0,15 \text{ dB} \quad (9.25)$$

Porém, precisa-se determinar a pressão em Pa ao invés de decibéis. Para fazer esta conversão utiliza-se a Eq. (9.26).

$$NPS = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (9.26)$$

sendo,

NPS o nível de pressão sonora, em dB,

P o valor da pressão em Pa,

$P_0$  o valor da pressão de referência que vale  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Fazendo simples operações matemáticas, chega-se na Eq. (9.27) que converte o nível de pressão sonora em Pascal.

$$P = P_0 \cdot 10^{NPS/20} \quad (9.27)$$

Convertendo as variáveis para a incerteza das mesmas, tem-se a Eq. (9.28).

$$u_{P1} \cong \left( 10^{\frac{u_{NPS}}{20}} - 1 \right) \cdot P_1 \quad (9.28)$$



sendo,

$\mu_{P_1}$  a incerteza da pressão na posição 1,

$\mu_{NPS}$  a incerteza do nível de pressão sonora.

Percebe-se pela Eq. (9.28) que, quanto maior a pressão sonora, maior a incerteza associada à pressão medida. Por este motivo, deve-se tomar o cuidado, ao medir a impedância e o coeficiente de absorção acústica, de não utilizar um nível de pressão sonora muito elevado, pois assim resultar uma incerteza mais elevada. Porém, deve-se sempre tomar cuidado de fazer a medição bem acima do NPS do ruído de fundo.

### 9.2.3 Incerteza da pressão medida na posição $d_2$

A incerteza da pressão medida no ponto 2 é decorrente da incerteza do próprio microfone, assim como a incerteza da pressão medida no ponto 1. Como foi utilizado o mesmo microfone para a medição nos dois pontos, a incerteza da pressão no ponto 2 é determinada da mesma forma que para o ponto 1. Assim, a incerteza é dada pela Eq. (9.29).

$$u_{P_2} \cong \left( 10^{\frac{u_{NPS}}{20}} - 1 \right) \cdot P_2 \quad (9.29)$$

sendo  $\mu_{P_2}$  a incerteza da pressão na posição 2.

### 9.2.4 Incerteza da temperatura ambiente

A temperatura ambiente foi medida utilizando-se um termômetro comum, com resolução de 1° C. Sendo o termômetro analógico, a sua incerteza  $\mu_T$  é determinada através da Eq. (3.6).

$$\mu_T = 0,5 \text{ °C} \quad (9.30)$$

No tópico 9.2, onde constam os resultados da incerteza da bancada, será discutido se este instrumento de medição da temperatura é adequado ou não para que a incerteza seja baixa.

### 9.3 Incerteza do coeficiente de reflexão

O coeficiente de reflexão é um espectro em função da frequência. Assim, a incerteza do mesmo será em função da frequência, pois os valores utilizados para calcular os coeficientes de sensibilidade variarão com a frequência.

A Figura (9.5) demonstra o resultado da medição do coeficiente de reflexão. Observe que as linhas pretas que são a média  $\pm$  o desvio padrão estão muito próximas, ficando praticamente sobrepostas à linha da média. Com isto conclui-se que a incerteza para o coeficiente de reflexão proveniente da bancada é muito menor que a incerteza do material (vide fig. 6.8).

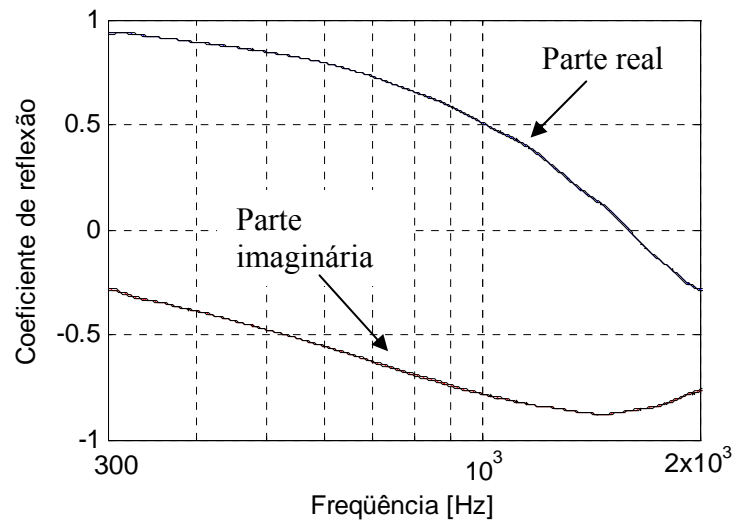


Figura 9.5 – Resultado da medição do coeficiente de reflexão. A curva superior é a parte real do coeficiente de reflexão. Sendo que, tanto para a parte real quanto para a imaginária, a curva central é o valor medido para uma amostra e as demais duas linhas são a média  $\pm$  a incerteza da bancada para o coeficiente de reflexão.

### 9.4 Incerteza do coeficiente de absorção

A Figura (9.6) demonstra o resultado da medição do coeficiente de absorção para uma amostra do material analisado. Percebe-se que as linhas da média  $\pm$  o desvio padrão (linhas vermelhas) estão muito próximas da linha da média (linha azul). Com isto verifica-se que a incerteza da bancada é menor que a incerteza da heterogeneidade das amostras (ver fig. 6.5).

## 9.5 Incerteza da impedância acústica

A Figura (9.7) demonstra o resultado da medição da impedância acústica para uma amostra do material analisado. Pela figura, percebe-se que as linhas da média  $\pm$  o desvio padrão (linhas pretas) estão muito próximas da linha da média (linha azul para a parte real da impedância e linha vermelha para a parte imaginária), ou seja, a incerteza da bancada é baixa. Ao comparar com a Figura (6.6), percebe-se que, no caso da impedância, a incerteza da bancada é próxima da incerteza da heterogeneidade da amostra.

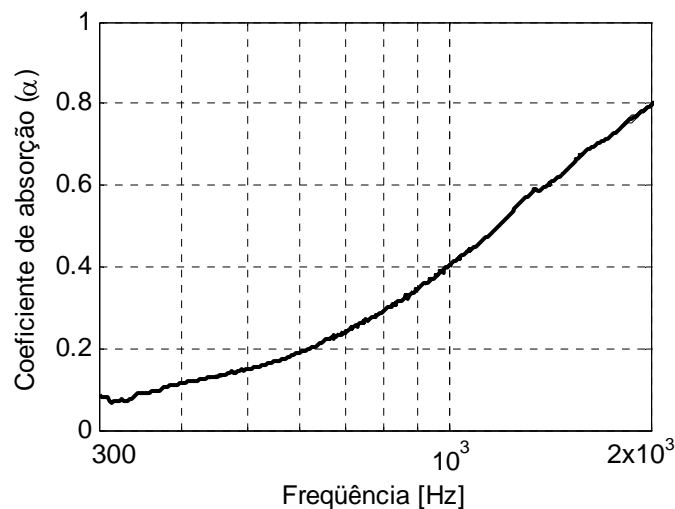


Figura 9.6 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção. A linha grossa é o valor medido para uma amostra e as linhas finas são a média  $\pm$  a incerteza da bancada para o coeficiente de absorção.

## 9.6 Influência de cada fonte de incerteza

A Figura (9.8) demonstra a influência de cada fonte de incertezas na determinação da incerteza da bancada. Verifica-se que a parcela da incerteza proveniente da medição da temperatura ambiente é dominante, seguida da incerteza das medições da pressão e por último a incerteza proveniente das distâncias  $d_1$  e  $d_2$  (as menos significativas). Ou seja, para reduzir a incerteza da bancada, primeiramente deve-se melhorar o sistema de medição da temperatura. Um equipamento com uma divisão de escala de  $0,1^\circ\text{C}$  poderia reduzir consideravelmente a incerteza da bancada.

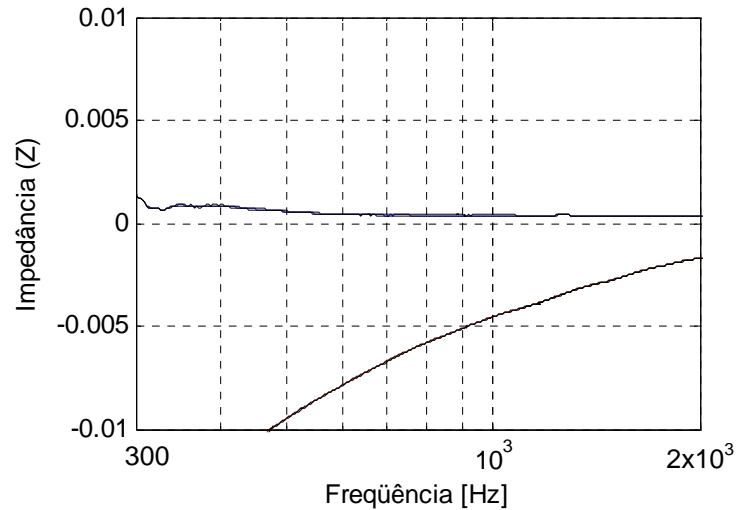


Figura 9.7 - Resultado da medição da impedância acústica. A curva superior é a parte real da impedância. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão. A curva inferior é a parte imaginária do coeficiente de reflexão.

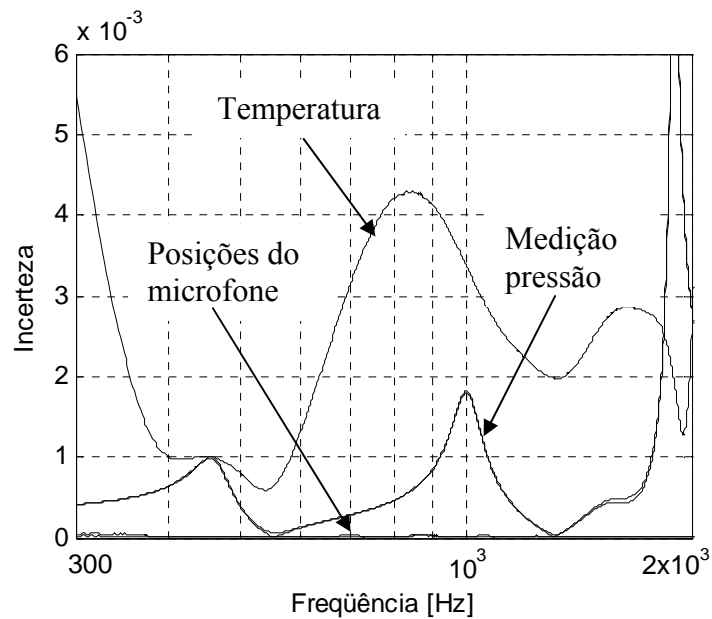


Figura 9.8 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o coeficiente de reflexão.

Para verificar o quanto um termômetro com uma divisão de escala de 0,1°C poderia influir, fez-se uma simulação que resultou na Figura (9.9). Observa-se que, ao se utilizar um termômetro com esta divisão de escala, a fonte dominante de incerteza passa a ser a pressão medida nos pontos  $d_1$  e  $d_2$ .

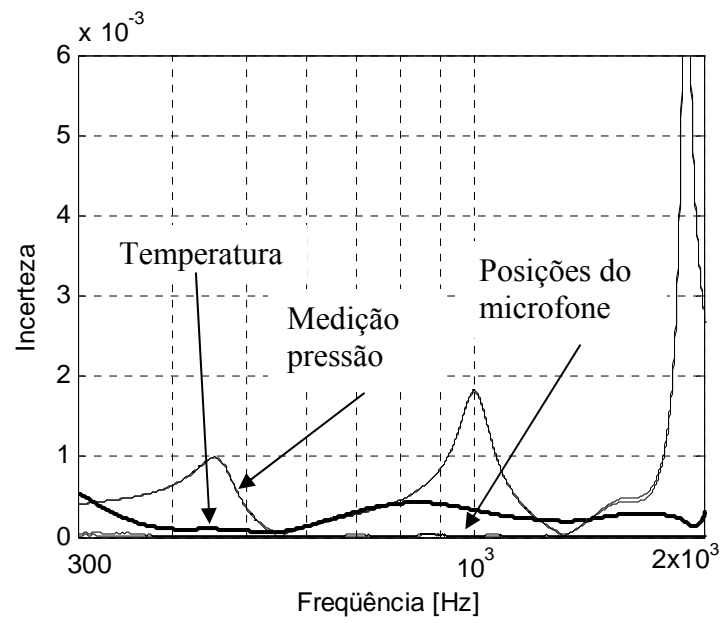


Figura 9.9 - Comparação da influência das fontes de incerteza.

## CAPÍTULO 10

### CONCLUSÕES

Para a bancada da medição da resistividade ao fluxo, percebe-se que é necessário um instrumento com uma menor faixa de medição para a medição do material Tipo A. Um manômetro com faixa de medição de 0 a 25 Pa seria o recomendável para este material, pois com o atual instrumento de medição da pressão, a incerteza da bancada é maior que a incerteza da heterogeneidade das amostras.

Na medição da porosidade, a maior fonte de incerteza da bancada é proveniente da incerteza devida à variação da espessura entre as amostras. Mesmo que fosse melhorado o sistema de medição (neste trabalho foi utilizado um paquímetro), não surtiria um efeito satisfatório, pois esta variação de espessura entre os materiais é proveniente do material em si, e não efetivamente da bancada. Visto que esta fonte de incerteza é cerca de dez vezes maior que as demais, faz-se desnecessária uma melhoria nas demais fontes de incerteza (que são da bancada em si, e não das amostras). Desta forma, faz-se desnecessário uma melhoria nos sistemas de medição desta bancada. Vale lembrar que este método não é muito adequado para espumas pois, conforme dito anteriormente, este método não mede a porosidade real, e sim um valor um pouco maior, já que rompe os poros fechados ao comprimir a amostra. Consequentemente é um método de teste destrutivo, sendo que a amostra testada não pode ser reutilizada.

A incerteza da bancada de impedância acústica é dominada pela incerteza inerente ao medidor de temperatura (no trabalho utilizado um termômetro, com divisão de escala de 1°C). Porém, se for utilizado um termômetro com uma menor divisão de escala, a incerteza dominante será a medição da pressão. É importante salientar que, como a incerteza do instrumento é em decibéis, então a incerteza do mesmo será tão maior quanto a pressão medida. Percebeu-se, também, que a contribuição proveniente das posições do microfone é muito menor do que as demais. Assim, não se faz necessária uma melhoria no sistema de medição das posições (neste trabalho foi utilizado um paquímetro). Nesta bancada, a incerteza da bancada também ficou abaixo da incerteza proveniente da heterogeneidade das amostras. Novamente vale lembrar que a incerteza gerada pelos instrumentos da bancada não são relevantes em comparação com a incerteza das amostras em si.

Resumindo, a incerteza proveniente da heterogeneidade das amostras é muitas vezes superior à incerteza proveniente dos instrumentos utilizados nas bancadas de medição da porosidade e impedância acústica. Porém, a incerteza da bancada de medição da resistividade ao fluxo para o material e instrumentos analisados é elevada e está longe de ser adequada. Desta forma, para as duas primeiras bancadas acima, não se faz necessário uma melhoria no instrumental utilizado. Mas para a bancada da resistividade ao fluxo um manômetro com menor faixa de medição se faz necessário.

### **10.1 Projetos futuros**

Baseado nas considerações anteriores, este trabalho pode ser estendido e aperfeiçoado de modo que algumas sugestões estão assinaladas a seguir:

- Estudo da influência da incerteza na simulação numérica;
- Análise da incerteza para outras bancadas que medem propriedades utilizadas para determinação das características de materiais acústicos;
- Comparação destes resultados com resultados de outros laboratórios e comparação com outros tipos de testes, por exemplo, testes de absorção sonora em câmaras reverberantes, apesar de se tratar de ensaios com incidência aleatória das ondas sonoras, e tamanhos de amostras maiores e com formato diferente.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Gerges, Samir N. Y., “Ruído, fundamentos e controle”, NR editora, 2000.
- [2] Balvedi, Alessandro M., “Medição e simulação acústica de materiais porosos e sistemas multicamadas”, dissertação, 1998.
- [3] Allard, J. F., “Propagation of sound in porous media – modeling sound absorbing materials”, Elsevier Applied Science.
- [4] ASTM C 522-80: Norma para medição de resistividade ao fluxo.
- [5] “Guia para a expressão da incerteza de medição”, ABNT, 2003.
- [6] Primeira edição brasileira do EA-4/02, “Expressão da incerteza de medição na calibração”, 1999.
- [7] ISO 10534-2, “Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes”.
- [8] M. G. Jones and P. E. Stiede, “Comparison of Methods for Determining Specific Acoustic Impedance”, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 101, pp. 2694-2704, 1997.
- [9] M. Abom and H. Bodén, “Error Analysis of Two-Microfone Method in Ducts with Flow.” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 83, pp. 2429-2438, 1988.
- [10] H. Bodén and M. Abon, “Influence of Errors on the Two-Microfone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts”, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 79, pp. 541-549, 1986.
- [11] Todd Schultz, Louis N. Cattafesta III, Toshikazu Nishida, Mark Sheplak, “Uncertainty Analysis of the Two-Microphone Method for Acoustic Impedance Testing”, 8<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, june 17-19, 2002, Breckenridge, CO.



- [12] Leonard, R. W., "Simplified porosity measurements", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 20, p. 39-41, 1948.
- [13] Brown, R. L. and Bolt, R. H., "The measurement of flow resistance of porous acoustic materials", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 13, p. 337-344, 1942.
- [14] Leonard, R. W., "Simplified flow resistance measurements", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 17, p. 240-241, 1946.
- [15] Stinson, M.R. and Daigle, G.A., "Electronic system for the measurement of flow resistance", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 83(6), p. 2422- 2428, 1988.
- [16] Ingard, U., *Notes on Sound Absorption Technology*, Noise Control Foundation, N. Y., USA, 1994.
- [17] ASTM C 522, "Standard test method for airflow resistance of acoustical materials", p. 258-263, 1980.
- [18] Beranek, L. L., "Acoustic impedance of porous materials", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 13, p. 248-260, 1942.
- [19] Leonard, R. W., "Simplified porosity measurements", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 20, p. 39-41, 1948.
- [20] Champoux, Y., Stinson, M. R. and Daigle G. A., "Air-base system for the measurement of the porosity", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 89, p. 910-916, 1991.
- [21] Leclaire, P., Umnona, O., Horoshenkov, K. V. and Maillet, L., "Porosity measurement by comparison of air volumes", *Review of Scientific Instruments*, V. 74, p. 1366-1370, 2003.
- [22] ASTM D 2856, "Standard test method for open-cell content of rigid cellular plastics by the air pycnometer", 1994.

- [23] Panneton, R. and Gros, E., "A missing mass method to measure the open porosity of porous solids", *Acta Acustica With Acustica*, V. 91, p. 342-348, 2005.
- [24] Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H. C. and Cummings, A., "Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials", *Applied Acoustics*, V. 66 (2005), p. 607-624, 2005.
- [25] Fellah, Z. E. A., Berger, S., Lauriks, W., Depollier, C., Aristégui, C. and Chapelonand, J.-Y., "Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence", *Journal of the Acoustical Society of America*, V. 113(5), p. 2424-2433, 2003.
- [26] Bolton, J. S. and Kang, Y. J., "Elastic porous materials for sound absorption and transmission control", *Society of Automotive Engineers, Inc.* 1997.
- [27] Morse, P. M. et al, "Relation between acoustic impedance and flow resistance of porous acoustic materials", *Journal of the Acoustical Society of América* V. 12, 475-476, 1941.
- [28] ISO 10534-2, "Acoustics – Determination of sound coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method".
- [29] Seybert, A. F. and Ross, D. F., "Experimental determination of acoustics properties using a two-microphone random excitation technique", *Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, Vol 61, pp. 1362-1370, 1970.
- [30] Chung, J. Y. and Blaster, D. A., "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I – Theory. II – Experience", *Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, Vol. 68, No. 3, pp. 907-921, 1980.
- [31] Chu, W. T., "Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone", *Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, Vol. 80, pp. 555-560, 1986.
- [32] Bodén, H. and Abom, M., "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustics properties in ducts", *Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, Vol. 79, No. 2, pp. 541-549, 1986.

- [33] Bodén, H. and Abom, M., “error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow”, *Journal of the Acoustical Society of America, JASA*, Vol. 83, No. 6, pp. 2429-2438, 1988.
  
- [34] Zent, A. and Long, J. T., “Automotive Sound Absorbing Material Survey Results”, *Society of Automotive Engineers, Inc.* 2007.
  
- [35] Chung, J. Y. and Blaser, D. A., “Transfer function method of measuring induct acoustic properties. I – Theory – Experience”, *JASA*, vol. 68, n° 3, 1980.
  
- [36] Bodén, H. and Abom, M., “Influence of errors on the two microphone method for measuring acoustic properties in ducts”, *JASA*, vol. 79, n° 2, 1986.
  
- [37] Bodén, H. and Abom, M., “Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow”, *JASA*, vol. 83, n° 6, 198

**APÊNDICES**

## APENDICE 1

## RESULTADOS DA RESISTIVIDADE AO FLUXO

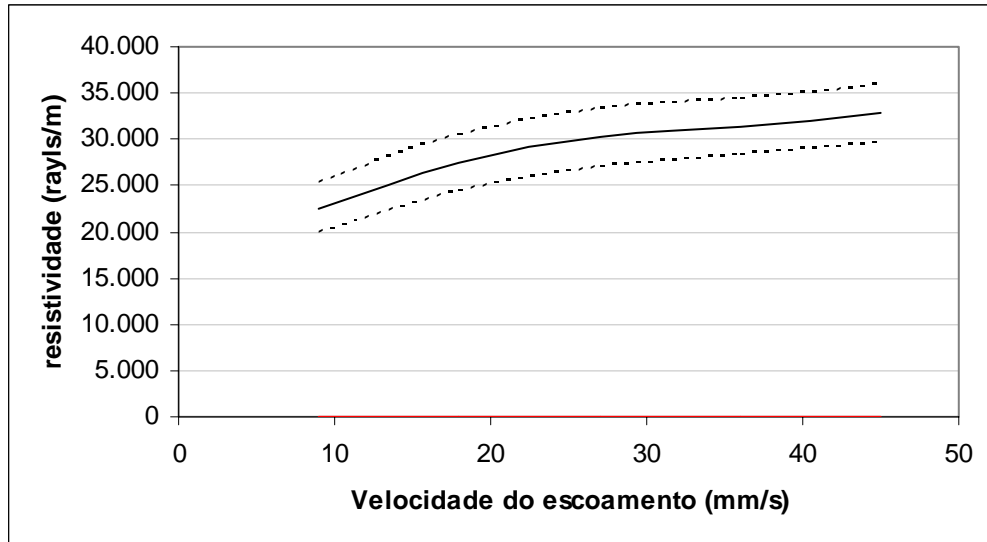


Figura A1.1 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material Tipo B. A curva cheia representa a média das dez amostras e as linhas pontilhadas demonstram a média  $\pm$  o desvio padrão. A média da resistividade ao fluxo no patamar plano é de 17.200 rayls/m.

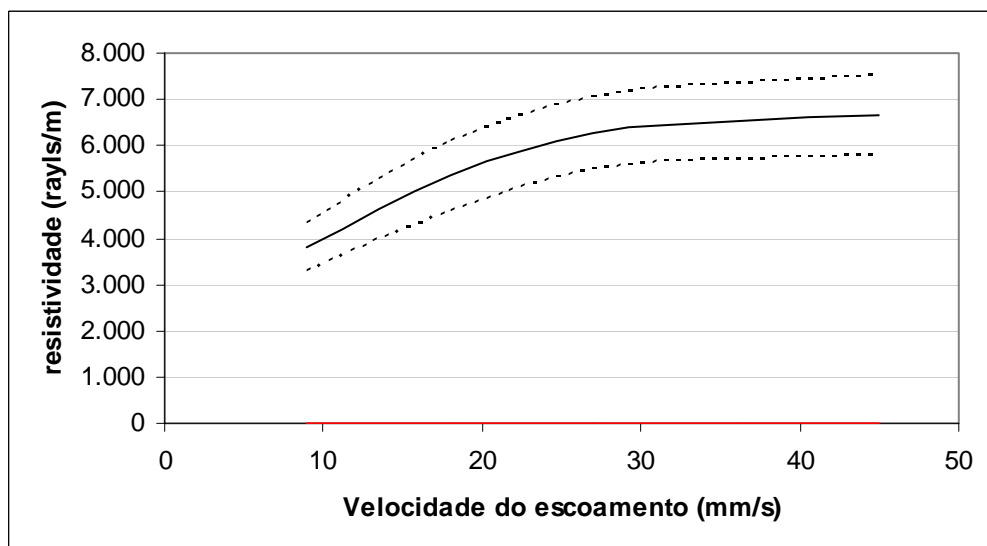


Figura A1.2 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material Tipo C. A curva cheia representa a média das dez amostras e as linhas pontilhadas demonstram a média  $\pm$  o desvio padrão. A média da resistividade ao fluxo no patamar plano é de 15.200 rayls/m.

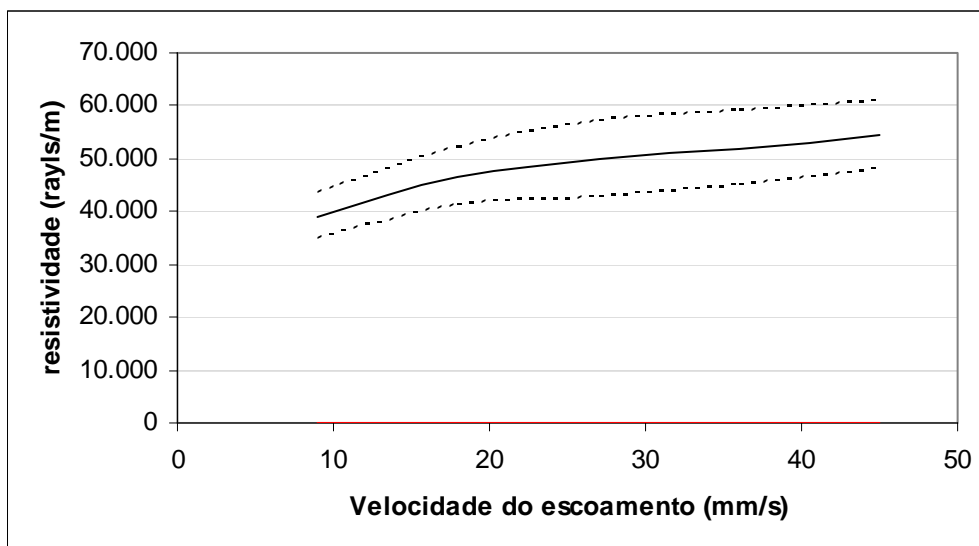


Figura A1.3 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material Tipo D. A curva cheia representa a média das dez amostras e as linhas pontilhadas demonstram a média  $\pm$  o desvio padrão. A média da resistividade ao fluxo no patamar plano é de 115.000 rayls/m.

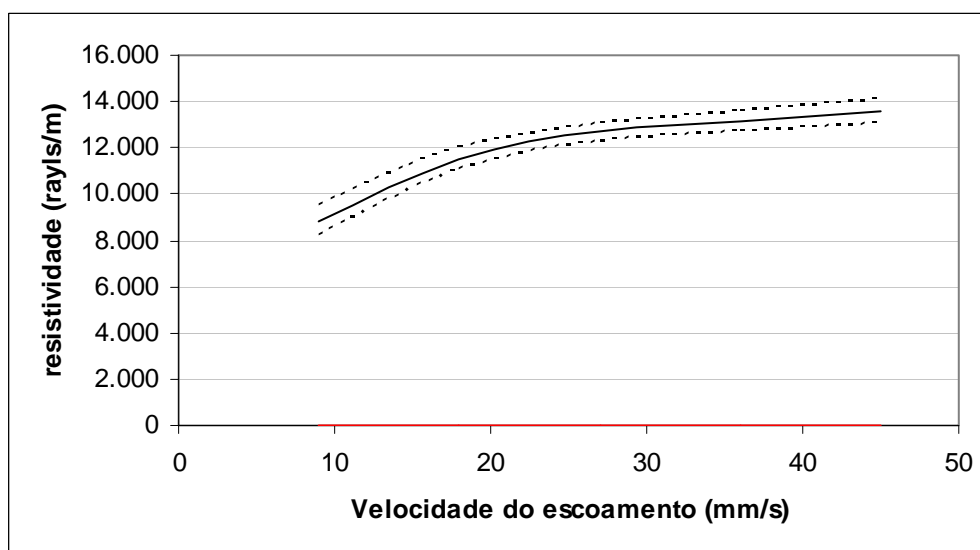


Figura A1.4 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material Tipo E. A curva cheia representa a média das dez amostras e as linhas pontilhadas demonstram a média  $\pm$  o desvio padrão. A média da resistividade ao fluxo no patamar plano é de 58.000 rayls/m.

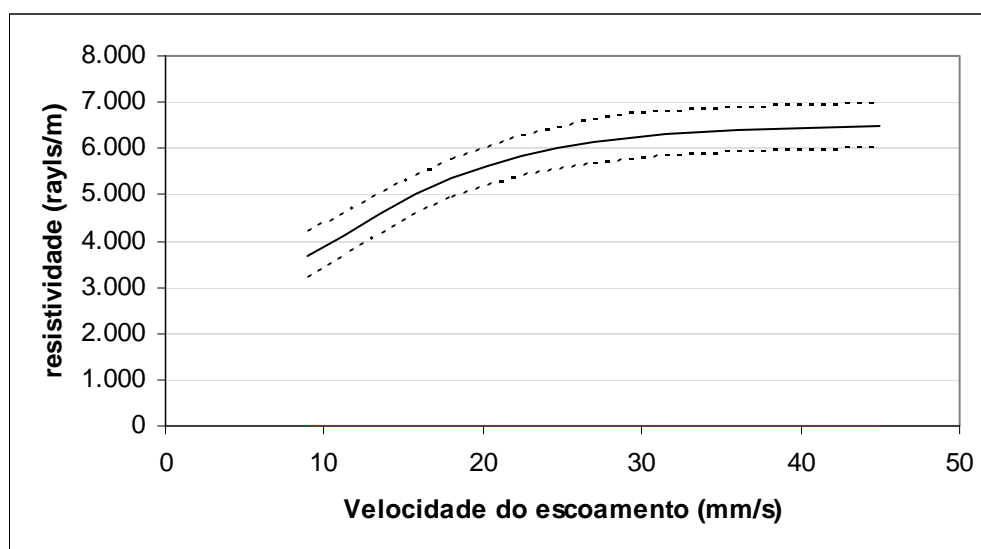


Figura A1.5 – Resultado da resistividade ao fluxo para o material Tipo F. A curva cheia representa a média das dez amostras e as linhas pontilhadas demonstram a média  $\pm$  o desvio padrão. A média da resistividade ao fluxo no patamar plano é de 55.400 rayls/m.

**APENDICE 2****RESULTADOS DA POROSIDADE**

A tabela (A2.1) traz aos resultados da porosidade para todos os tipos de materiais utilizados neste trabalho assim como seus respectivos desvios padrão.

Tabela A2.1 – Resultados da medição da porosidade

Material	Porosidade	Desvio padrão
Tipo B	99,20%	0,08%
Tipo C	98,68%	0,41%
Tipo D	99,63%	0,09%
Tipo E	97,06%	0,24%
Tipo F	98,78%	0,20%



## APENDICE 3

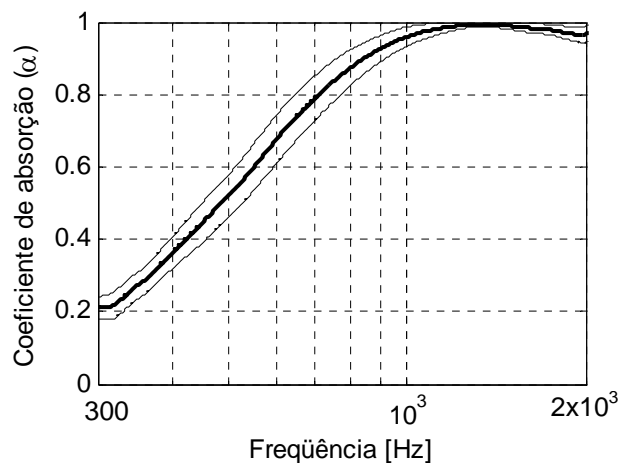
RESULTADOS DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E DA IMPEDÂNCIA  
ACÚSTICA

Figura A2.1 – Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas). O material é o Tipo B.

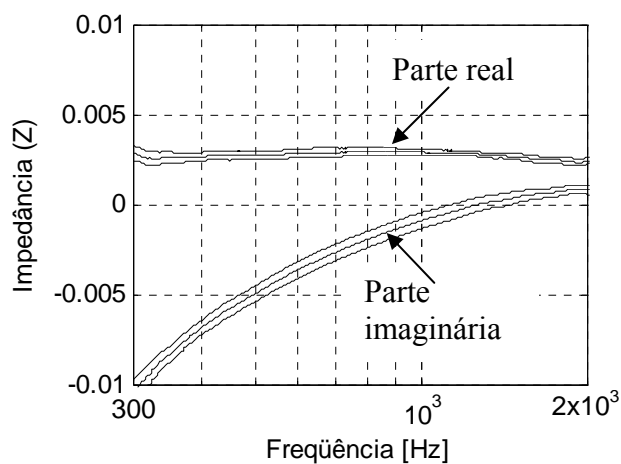


Figura A2.2 - Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo B. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

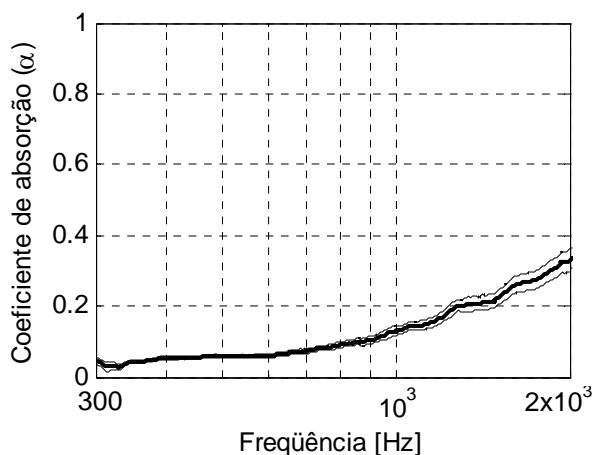


Figura A2.3 – Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas). O material é o Tipo C.

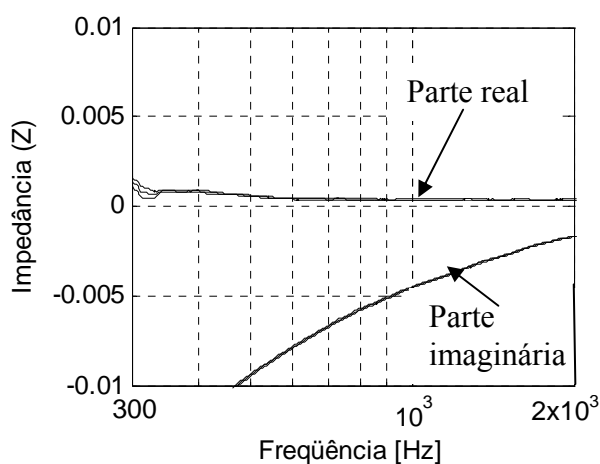


Figura A2.4 – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo C. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

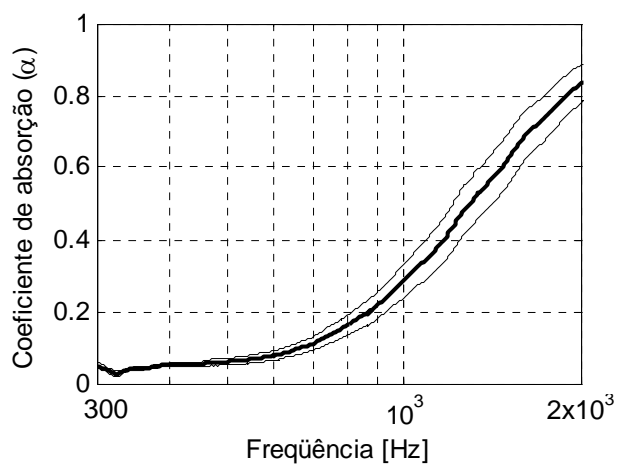


Figura A2.5 - Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas). O material é o Tipo D.

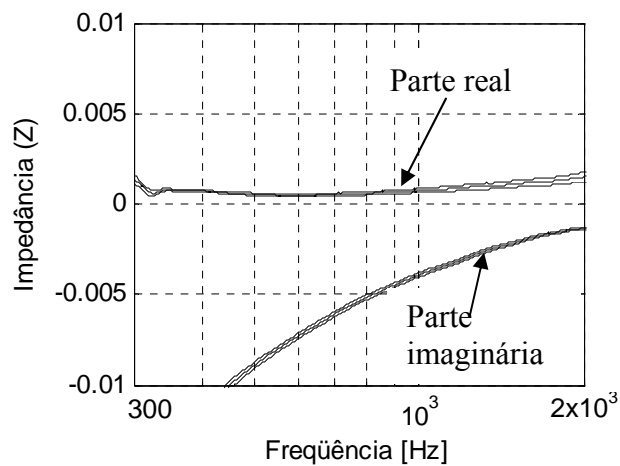


Figura A2.6 – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo D. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

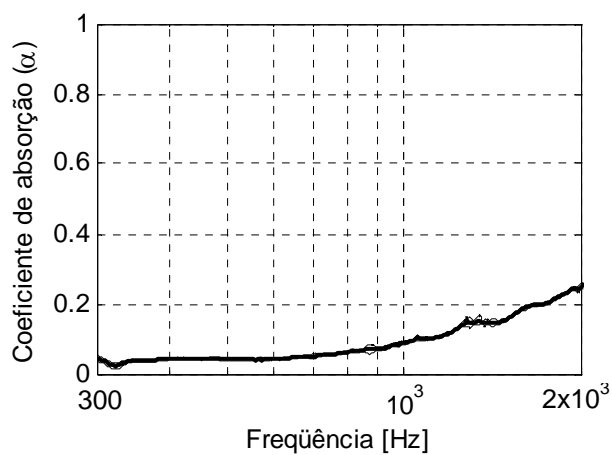


Figura A2.7 - Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas). O material é o Tipo E.

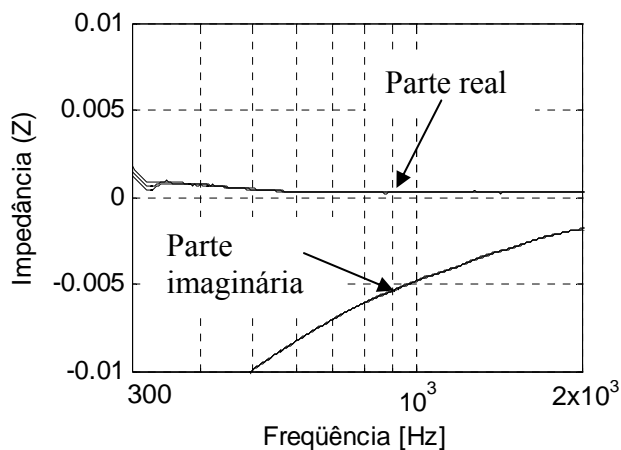


Figura A2.8 - – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo E. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

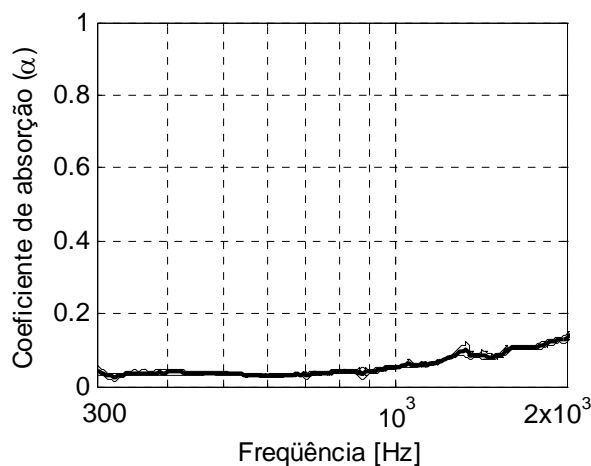


Figura A2.9 – Resultado do coeficiente de absorção da média das dez amostras (curva grossa) e o valor médio  $\pm$  o desvio padrão (curvas finas). O material é o Tipo F.

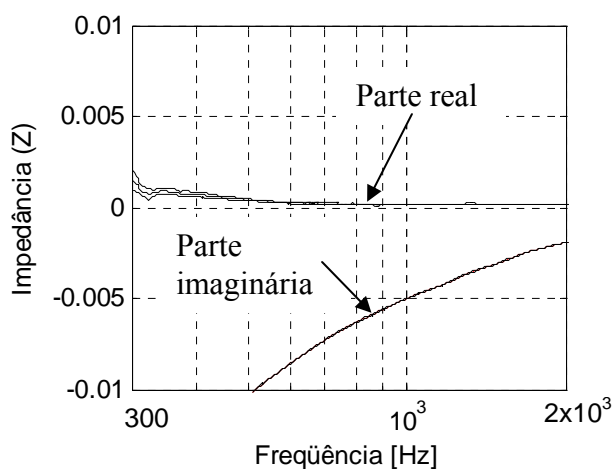


Figura A2.10 - – Resultado da impedância para as dez amostras do material Tipo F. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

**APENDICE 4****INCERTEZA DA BANCADA NA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE AO FLUXO**

Tabela A4.1 – Resultado da incerteza combinada total para os materiais considerados

Material	incerteza (rayls/m)	Incerteza (%)
Tipo B	2.285,4	13,3%
Tipo C	7.691,0	50,3%
Tipo D	12.321,7	10,72%
Tipo E	14.776,8	25,44%
Tipo F	28.287,6	51,1%

## APENDICE 5

### INCERTEZA DA BANCADA NA MEDIÇÃO DA POROSIDADE

Tabela A5.1 – resultado da incerteza na medição da porosidade para os materiais analisados. A unidade de medida para as alturas  $a$  e  $h$  e a espessura é o milímetro.

Tipo	Altura $h$	Altura $a$	Espessura (T)	Incerteza
A	15,087	14,954	24,79	0,11%
B	15,087	14,726	45	0,27%
C	15,087	14,948	10,53	0,14%
D	15,087	14,996	11,25	0,11%
E	15,087	14,357	5,6	0,41%
F	15,087	14,785	5,6	0,14%

## APENDICE 6

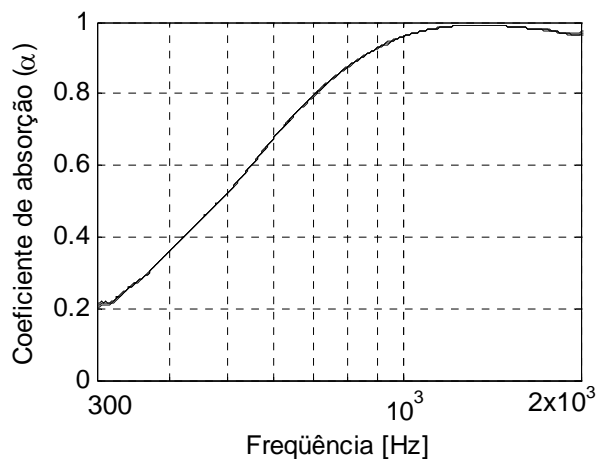
INCERTEZA DA BANCADA NA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DO  
COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA

Figura A6.1 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção para o material Tipo B. A linha central é o valor medido para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

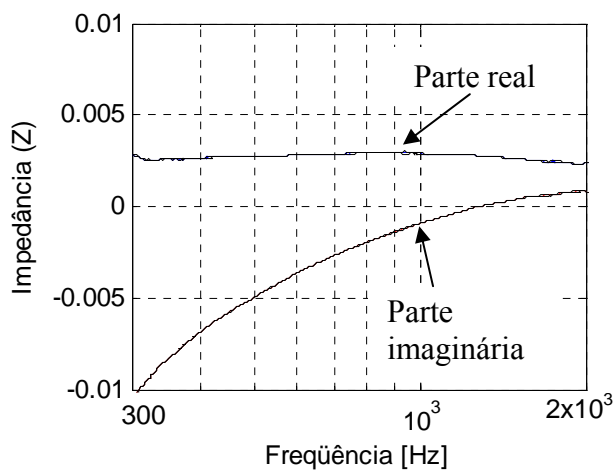


Figura A6.2 - Resultado da incerteza impedância acústica para o material Tipo B. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

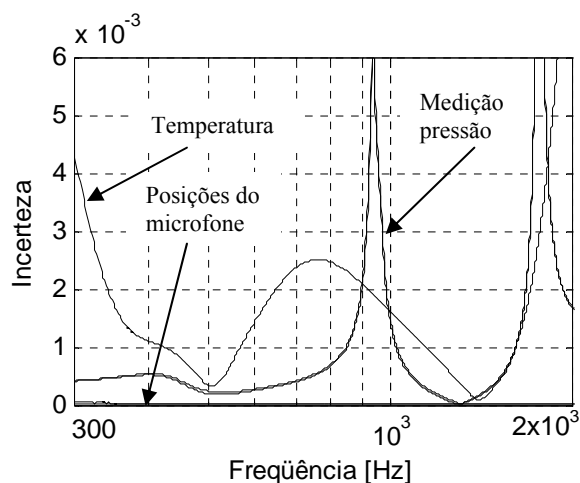


Figura A6.3 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o material Tipo B.

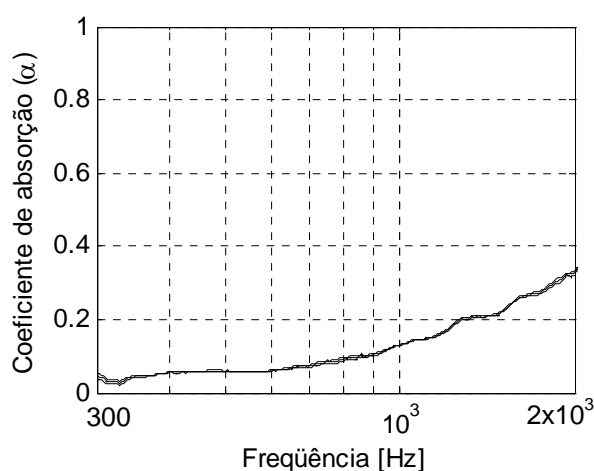


Figura A6.4 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção para o material Tipo C. A linha central é o valor medido para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão

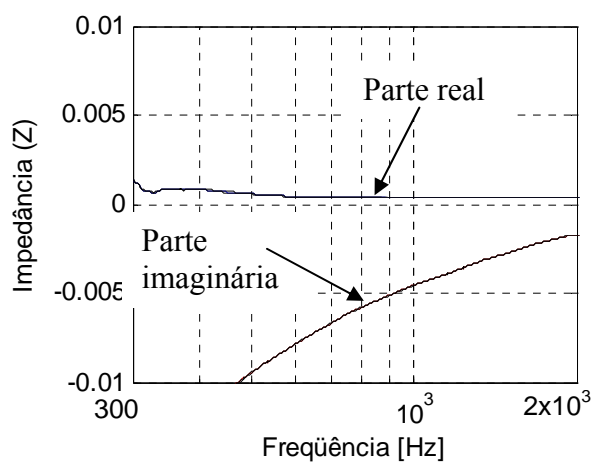


Figura A6.5 - Resultado da incerteza impedância acústica para o material Tipo C. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.



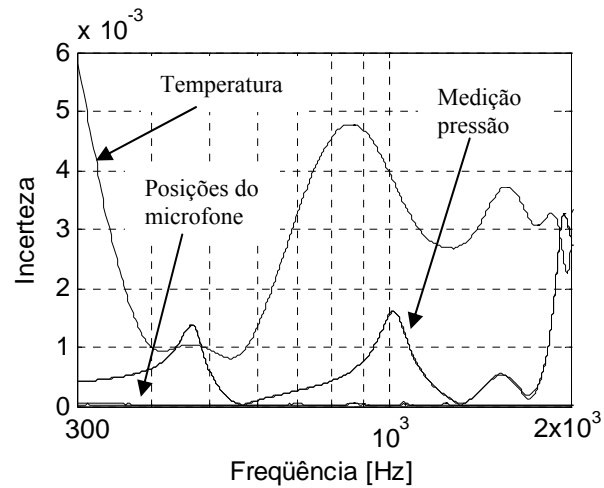


Figura A6.6 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o material Tipo C.

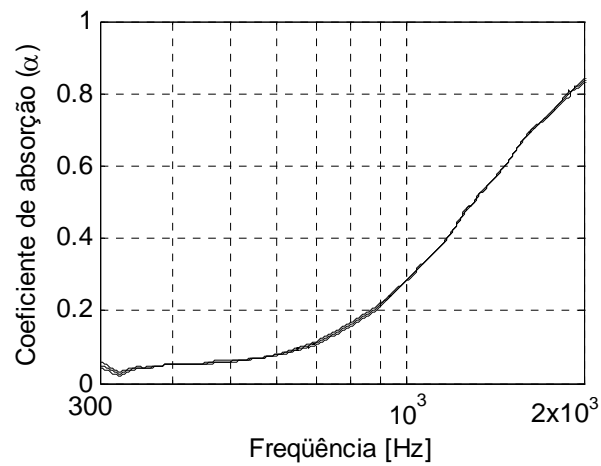


Figura A6.7 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção para o material Tipo D. A linha central é o valor medido para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

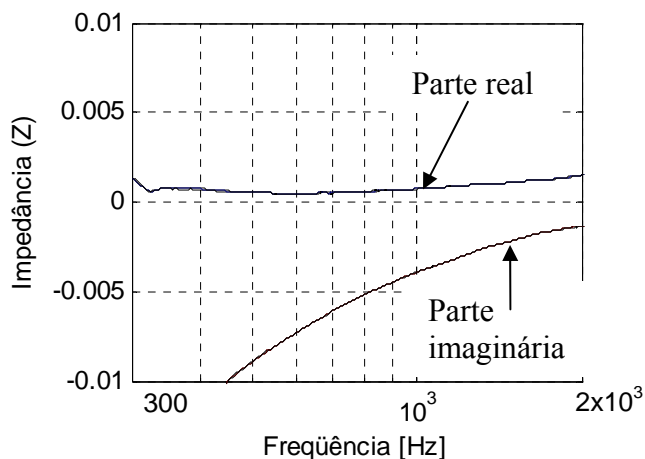


Figura A6.8 - Resultado da incerteza impedância acústica para o material Tipo D. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

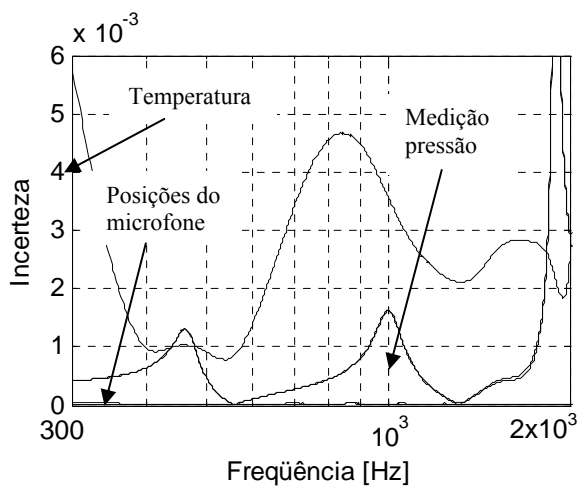


Figura A6.9 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o material Tipo D.

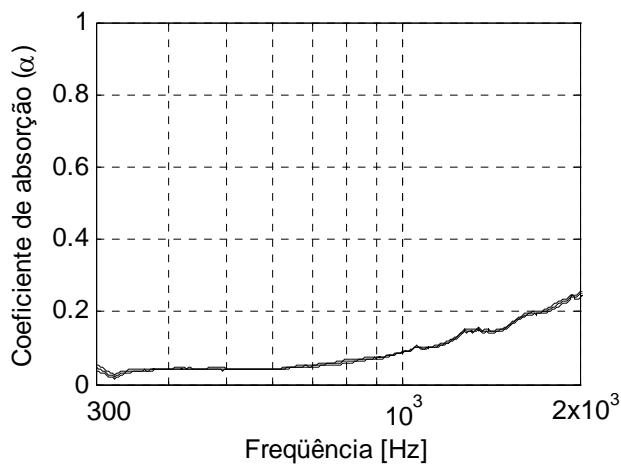


Figura A6.10 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção para o material Tipo E. A linha central é o valor medido para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão

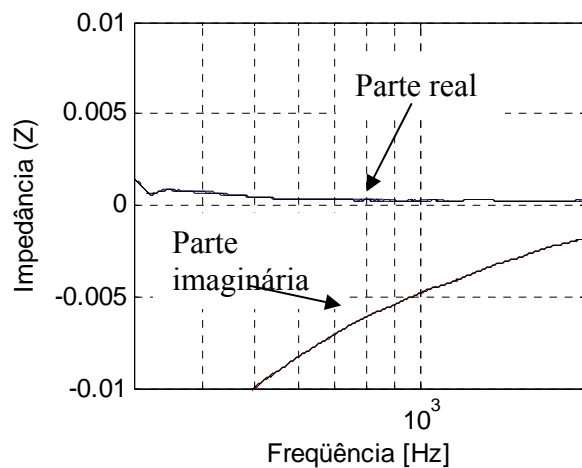


Figura A6.11 - Resultado da incerteza impedância acústica para o material Tipo E. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

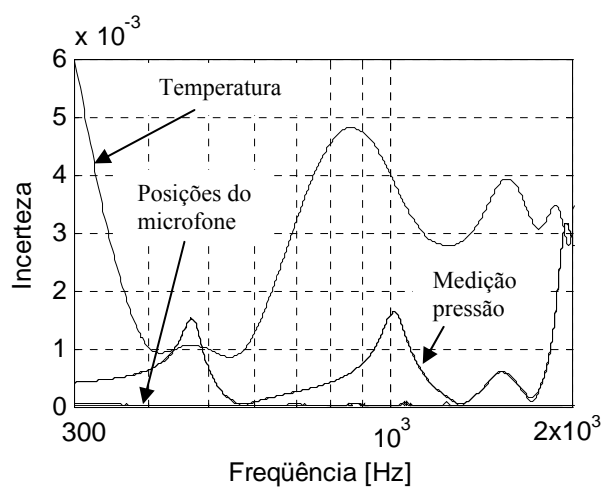


Figura A6.12 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o material Tipo E.

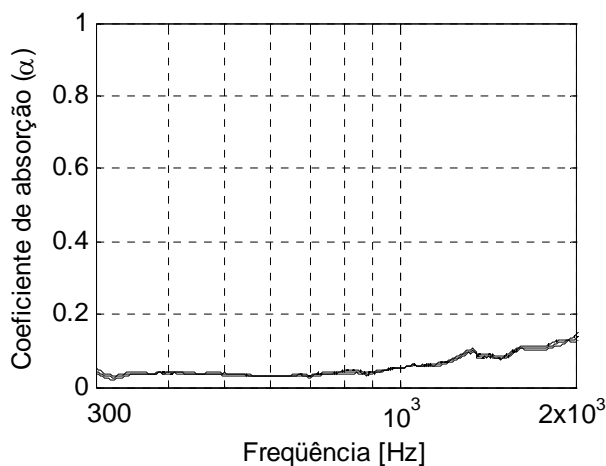


Figura A6.13 - Resultado da incerteza do coeficiente de absorção para o material Tipo F. A linha central é o valor medido para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão

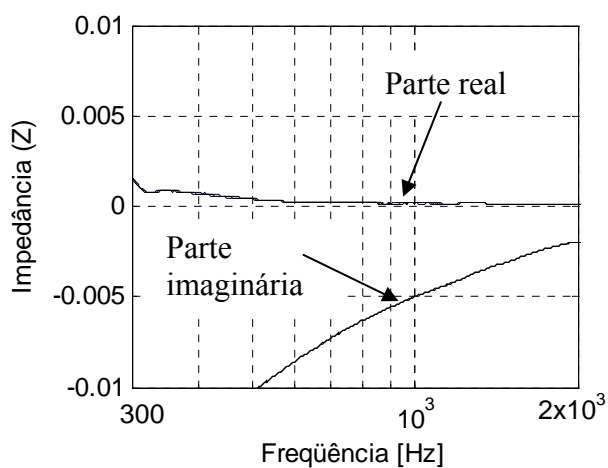


Figura A6.14 - Resultado da incerteza impedância acústica para o material Tipo F. As linhas centrais são os valores medidos para uma amostra e as linhas pretas ao redor são a média  $\pm$  o desvio padrão.

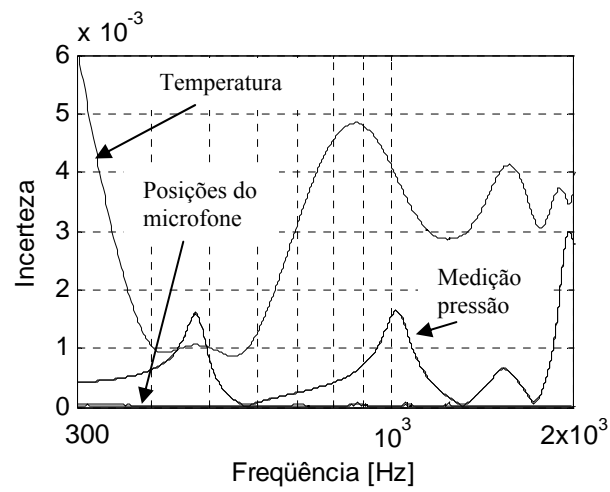


Figura A6.15 – Comparação da influência das fontes de incerteza para o material Tipo F.