

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA

IAN MOREIRA CAVALCANTE
VINICIUS DA MAIA FELCHACK

**MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO
ACÚSTICO DE INCIDÊNCIA ALEATÓRIA EM CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

IAN MOREIRA CAVALCANTE
VINICIUS DA MAIA FELCHACK

**MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO
ACÚSTICO DE INCIDÊNCIA ALEATÓRIA EM CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos o Projeto de Pesquisa “MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO ACÚSTICO DE INCIDÊNCIA ALEATÓRIA EM CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA”, realizado pelos alunos Ian Moreira Cavalcante e Vinícius da Maia Felchack, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes
DAMEC, UTFPR
Orientador

Profa. Dra. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira
DAMEC, UTFPR
Avaliadora

Profa. MSc. Rosemara Santos Deniz Amarilla
DACOC, UTFPR
Avaliadora

Prof. Dr. William D’Andrea Fonseca
EAC, UFSM
Avaliador

Curitiba, 30 de novembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho de conclusão de curso a todas as pessoas que nos apoiaram ao longo de nossa trajetória acadêmica e de alguma forma colaboraram para que esse projeto se tornasse realidade. Em especial nossos pais, que tanto nos ensinaram e dos quais temos muito orgulho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos pais, que nos deram suporte ilimitado neste longo desafio de nos tornarmos engenheiros mecânicos.

Às pessoas que contribuíram para nosso crescimento intelectual, os professores. Talvez a mais nobre das profissões, obrigado por todos os ensinamentos e por nos inspirarem. Vocês nos deram algo de valor incalculável, o seu tempo, obrigado por investi-lo em nós, alunos.

Agradecemos profundamente ao professor Márcio Avelar, uma das referências em acústica de salas no Brasil, obrigado pelas discussões e paciência ao longo deste ano, seu auxílio foi de vital importância para o sucesso deste trabalho de conclusão de curso.

Eu, Ian, faço um agradecimento especial à arquiteta que, além de desenhar incontáveis sonhos comigo, têm me ajudado a tirá-los do papel. Obrigado, Rafinha, pelo companheirismo e amadurecimento ao longo dos 8 anos vividos juntos até então.

Eu, Vinicius, agradeço especialmente à minha família e aos amigos, que me deram apoio e suporte incondicional nessa jornada. Dedico este trecho às minhas avós (in memoriam), que alimentaram o sonho de me tornar o primeiro engenheiro da família.

E por fim, um agradecimento à comunidade da UTFPR como um todo, pelo apoio financeiro para realização deste trabalho e também pela infraestrutura aproveitada por nós. Neste modelo de educação gratuita e de excelência que recebemos, prometemos honrar cada centavo dos contribuintes deste país, pensando globalmente e agindo localmente.

EPÍGRAFE

"We shouldn't be looking for heroes, we should be looking for good ideas."

Noam Chomsky

*"Everyone here has the sense that right now is one of those moments when we are
influencing the future."*

Steve Jobs

RESUMO

CAVALCANTE, Ian Moreira; FELCHACK, Vinícius da Maia. MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO ACÚSTICO DE INCIDÊNCIA ALEATÓRIA EM CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O coeficiente de espalhamento acústico é uma propriedade acústica vinculada à forma de uma superfície e mede quanto da energia sonora está sendo espalhada de maneira especular e não-especular. O resultado da medição do coeficiente de espalhamento acústico se faz necessário principalmente para softwares de simulação acústica de modo a aproximar os resultados das simulações numéricas aos resultados empíricos. O presente estudo avalia o coeficiente de espalhamento acústico devido à incidência aleatória em superfícies amostrais em gesso e madeira através da medição em câmara reverberante em escala reduzida. A técnica de medição utilizada é baseada na norma ISO 17497-1 (2004) sendo a construção e dimensionamento do aparato de medição parte do escopo desta pesquisa. Amostras utilizadas em estudos anteriores a este foram replicadas, analisadas e os resultados discutidos de forma a ratificar a confiabilidade do experimento. Após a realização das medições, os resultados mostraram que a câmara reverberante em escala reduzida construída através deste trabalho está qualificada de acordo com a norma ISO 17497-1 (2004).

Palavras-chave: Acústica, Coeficiente de Espalhamento, Medição, Difusores.

ABSTRACT

CAVALCANTE, Ian Moreira; FELCHACK, Vinícius da Maia. MEASUREMENT OF THE RANDOM-INCIDENCE SCATTERING COEFFICIENT IN SCALE REVERBERATION CHAMBER. 96 f. Final Year Research Project – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2016.

The acoustic scattering coefficient is an acoustic property related to the shape of the surface and it quantifies how much of the sound energy is being scattered specularly and non-specularly. The result of the acoustic scattering coefficient measurement is mainly necessary for acoustics simulations in order to approximate the numerical simulations results to the empirical results. The present study evaluates the random incidence scattering coefficient in a scale reverberation chamber of sample surfaces on plaster and wood. The measurement technique used is based on the international standard ISO 17497-1 (2004) and the construction and dimensioning of the measuring apparatus is part of the scope. The samples used in previous studies were replicated, analyzed and the results discussed in order to ratify the reliability of the experiment. After the measurements, the results demonstrated that the scale reverberation chamber constructed is qualified according to the ISO 17497-1 (2004).

Keywords: Acoustics. Scattering Coefficient. Measurement. Diffusers.

LISTA DE SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
GBR	Grã-Bretanha
EUA	Estados Unidos da América
ITA	<i>Institute of Technical Acoustics</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MDF	Fibra de média densidade
DACOC	Departamento de Construção Civil

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição de energia sonora em uma superfície	17
Figura 2.2 – Zona especular devido ao fenômeno de reflexão	18
Figura 2.3 – Estúdio de gravação: <i>The Hit Factory, New York</i>	19
Figura 2.4 – Espalhamento em superfícies rígidas (modificada).	19
Figura 2.5 – Medição do coeficiente de difusão de um difusor de Schroeder.	20
Figura 2.6 – Representação de um sistema com função de entrada e função de saída.	21
Figura 2.7 – Medição genérica de uma resposta impulsiva de sala com <i>sweep</i> e deconvolução circular.	22
Figura 2.8 – Fonte Omnidirecional: Brüel & Kjær <i>OmniPower Sound Source – Type 4292-L</i>	23
Figura 2.9 – Câmara reverberante: Laboratório de Acústica, <i>The University of Sydney</i>	24
Figura 2.10 – Resposta ao impulso de um diafragma no domínio do tempo, $h(t)$, e curva de decaimento sonoro no domínio do tempo, $R(t)$ (modificada).	25
Figura 2.11 – Arduino Uno	26
Figura 3.1 – Diagrama de variações de posição de fonte sonora e microfone.	31
Figura 3.2 – Medição do tempo de reverberação sem amostra.	32
Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para medição do coeficiente de espalhamento acústico	33
Figura 3.4 – Diagrama de medição do coeficiente de espalhamento sonoro.	34
Figura 4.1 – Modelo 3D destacando o ângulo de 80 graus nas paredes laterais e difusores distribuídos na chapa superior	36
Figura 4.2 – Modelo 3D da mesa giratória e pista de atrito por rolamento	37
Figura 4.3 – Mesa giratória e pista de atrito por rolamento	38
Figura 4.4 – Modelo 3D do sistema de acoplamento entre mesa giratória e motor de passo	38
Figura 4.5 – Modelo 3D da estrutura metálica de apoio à câmara reverberante em escala reduzida	39
Figura 4.6 – Modelo 3D do aparato de medição juntamente à estrutura metálica	39
Figura 4.7 – Detalhe da vedação entre chapa frontal e chapa superior, com perfil de borracha	40
Figura 4.8 – Câmara reverberante em escala reduzida após etapa de parafusamento das chapas	40
Figura 5.1 – Comparação entre coeficiente de espalhamento acústico da mesa giratória em relação aos limites recomendáveis pela norma ISO 17497-1 (2004)	41

Figura 5.2 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 25% da área da mesa giratória	43
Figura 5.3 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 13% da área da mesa giratória	44
Figura 5.4 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 6% da área da mesa giratória	45
Figura 5.5 – Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de gesso de 40 mm de diâmetro	45
Figura 5.6 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 25% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000)	46
Figura 5.7 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 13% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000)	46
Figura 5.8 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 6% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000)	47
Figura 5.9 – Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 40 milímetros	47
Figura 5.10–Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 20 milímetros	48
Figura 5.11–Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 10 milímetros	48
Figura 5.12–Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de madeira em configuração periódica simples com espaçamento 10, 20 e 40 milímetros	49
Figura 5.13–Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de madeira em configuração periódica simples com espaçamento 10 e 40 milímetros e incertezas de medição	49
Figura 6.1 – Custos relativos de cada subconjunto	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estimativa de correlação	27
Tabela 3.1 – Tabela de resultados da câmara reverberante em escala	30
Tabela 3.2 – Coeficiente de espalhamento máximo para a mesa giratória	31
Tabela 5.1 – Condições de medição para quatro tempos de reverberação	41
Tabela 5.2 – Parâmetros do sinal de entrada	42
Tabela 6.1 – Custos de projeto para construção de Câmara em escala reduzida . . .	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Justificativas	15
1.4	Estruturação	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Acústica	17
2.1.1	Zona especular	17
2.1.2	Difusores	18
2.1.3	Coefficiente de espalhamento	18
2.1.4	Campo difuso	20
2.1.5	Função de transferência	21
2.1.6	Varredura de senos	22
2.1.7	Fonte sonora	22
2.1.8	Campo reverberante	23
2.1.9	Câmara reverberante	23
2.1.10	Integral inversa de Schroeder	24
2.2	Automação	26
2.2.1	Arduino	26
2.2.2	Motor de Passo	26
2.2.3	Institute of Technical Acoustics Toolbox	27
2.3	Metrologia	27
2.3.1	Medição indireta	27
2.3.2	Incerteza de medição	28
2.3.3	Repetitividade	28
2.3.4	Reprodutibilidade	28
3	METODOLOGIA	29
4	MODELAGEM E FABRICAÇÃO	36
5	RESULTADOS	41
6	CUSTOS DO PROJETO	50
7	CONCLUSÃO	52

Referências	53
Apêndice A – Dimensionamento do motor	55
Apêndice B – Vistas de montagem	57
Apêndice C – Desenhos de Fabricação	61
Apêndice D – Resultados das medições	72
Apêndice E – Rotinas de cálculo	81
Apêndice F – Roteiro para medição do coeficiente de espalhamento . . .	90

1 INTRODUÇÃO

O estudo do som em ambientes fechados é complexo e seu escopo extrapola à simples medição, propagação e distribuição da energia sonora no espaço. Um ambiente com uma boa qualidade sonora muitas vezes é avaliado através da percepção subjetiva do indivíduo e é esta que deve guiar os estudos em acústica de salas, de forma a satisfazer as necessidades de quem utiliza esta ciência para condicionamento acústico de ambientes e meio de expressão da arquitetura.

A interação entre onda sonora e superfície pode provocar três fenômenos: absorção, transmissão e reflexão (LONG, 2014). Todos os fenômenos ocorrem simultaneamente e caracterizam a resposta do ambiente.

Segundo Cox e D'Antonio (2009), a qualidade acústica de um ambiente pode ser avaliada através do som emitido por uma fonte sonora em combinação à resposta ao impulso do ambiente.

O coeficiente de espalhamento acústico é um parâmetro fundamental para a qualidade acústica de um ambiente, pois quantifica a energia refletida das superfícies, as quais podem ser dimensionadas para este propósito e denominadas difusores acústicos.

Os difusores acústicos caracterizam uma tendência para o funcionalismo na arquitetura contemporânea devido a possibilidade de aliar a forma ao conforto ambiental, ou mais especificamente, o condicionamento acústico de ambientes.

O coeficiente de espalhamento acústico se faz mais útil em acústica de salas se comparado ao coeficiente de difusão sonora, pois na maioria das aplicações a combinação das ondas sonoras e ondas refletidas não incidirá com um ângulo de incidência específico.

Visto que muitas vezes o trabalho do profissional em acústica está sujeito à subjetividade do seu cliente, Cox e D'Antonio (2009) conclui que não há um coeficiente ideal que satisfaz a demanda de todos os grupos interessados — engenheiros de simulação, fabricantes de difusores e consultores em acústica.

O processo de medição engloba as ações de monitorar, controlar e/ou investigar fenômenos físicos e a quantificação dos erros atrelados a estas ações é inevitável, pois condições perfeitas de medição são utópicas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Neste estudo, as incertezas de medição de todo o processo que engloba a aquisição do coeficiente de espalhamento acústico são avaliadas, desde a preparação do experimento — como por exemplo a calibração do microfone, à resposta ao impulso da câmara reverberante em escala.

Este projeto de pesquisa tem o propósito de gerar um banco de dados acerca da medição do coeficiente de espalhamento acústico e construção da câmara reverberante em escala, ambos de acordo com a norma ISO 17497-1 (2004).

1.1 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se através deste trabalho o estudo do fenômeno de reflexão através do coeficiente de espalhamento acústico. A norma ISO 17497-1 (2004) será implementada compreendendo desde a construção do aparato de medição à avaliação metrológica dos coeficientes de espalhamento acústico de 6 superfícies de interesse.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Projetar, fabricar e validar o aparato de medição;
- Medir o coeficiente de espalhamento sonoro de diferentes amostras;
- Comparar os resultados obtidos da bibliografia com o do presente trabalho;
- Calcular as incertezas de medição.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A medição do coeficiente de espalhamento acústico se faz necessária pois a maioria dos programas de simulação acústica necessitam de tal informação para garantir uma simulação mais precisa e acurada. Segundo Vorländer (1995), o negligenciamento do coeficiente de espalhamento acústico e coeficiente de absorção sonora nos algoritmos trás uma baixa confiabilidade do modelo simulado em comparação ao modelo empírico. Ainda de acordo com Vorländer (1995), é afirmado que os resultados entre simulação numérica e experimento real se tornam piores quando a distância entre fonte e receptor são aumentadas de tal forma que pode ser atribuído a este problema, a não contabilização da absorção e reflexão das ondas sonoras – em medição realizada no auditório da Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Sob o ponto de vista de produtos, difusores serão avaliados de forma a criar uma base de dados destas superfícies. Uma característica de interesse na construção civil para estas superfícies é o aumento na inteligibilidade da fala pois essas promovem uma diminuição no tempo de reverberação do ambiente Cox e D'Antonio (2009). Portanto, os estudos apresentados no presente trabalho aliados a estudos em psicoacústica têm o potencial de revelar ferramentas para a melhoria da construção civil no âmbito do conforto ambiental.

Diante destes enfoques pretende-se, através deste trabalho, fomentar estudos a respeito da otimização de materiais e design para difusores acústicos na UTFPR e demais instituições interessadas. Embora hajam estudos sólidos como os apresentados por Vorländer e Mommertz (2000) e Gomes (2002), a normalização do método de medição foi concebida recentemente através da norma ISO 17497-1 (2004), e portanto trata-se de um tema ainda pouco explorado em acústica de salas, principalmente no Brasil.

1.4 ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso está subdividido em sete capítulos. O primeiro apresenta as motivações e delimita os objetivos do projeto, o segundo capítulo apresenta uma contextualização e conceitos a serem discutidos para a compreensão do trabalho, e no terceiro é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa. A modelagem 3D no software Solidworks, a fabricação do aparato de medição e o dimensionamento das amostras são abordadas no quarto capítulo. No quinto capítulo os resultados das medições deste trabalho são apresentados e comparados aos resultados de estudos anteriores a fim de garantir a confiabilidade do experimento. No sexto e sétimo capítulos são apresentados os custos de projeto e as conclusões desta pesquisa, respectivamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de revisar conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho. Para uma exposição mais clara das definições, o capítulo foi subdividido em três áreas: acústica, automação e metrologia. A acústica engloba o fenômeno físico em estudo, a automação compreende os elementos eletrônicos fundamentais para realização da medição e a metrologia abrange a análise das incertezas dos resultados.

2.1 ACÚSTICA

Este item apresenta os conceitos fundamentais relativos ao fenômeno físico em estudo.

2.1.1 ZONA ESPECULAR

A incidência de uma onda sonora numa superfície pode resultar em três fenômenos: absorção, transmissão e reflexão (LONG, 2014). A Figura 2.1 ilustra estes fenômenos sob a forma energética.

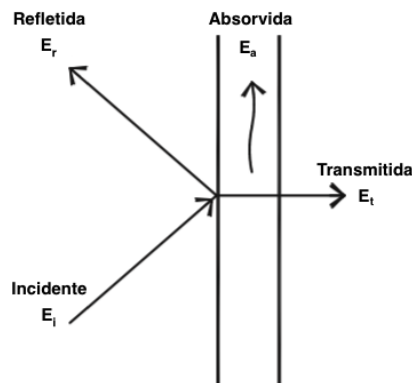


Figura 2.1 – Distribuição de energia sonora em uma superfície.

Fonte: (LONG, 2014).

A Eq. 2.1 relaciona a energia sonora incidente com os demais fenômenos:

$$E_i = E_a + E_t + E_r \quad (2.1)$$

Para a medição do coeficiente de espalhamento acústico segundo a norma ISO 17497-1 (2004), somente as parcelas de reflexão e absorção são consideradas nos cálculos. Isto ocorre devido à hipótese da câmara reverberante em escala não possuir vazamentos sonoros significativos que caracterizariam a transmissão através das paredes.

Cox e D'Antonio (2009) propõem que o fenômeno de reflexão pode ser dividido em duas zonas: especular e não especular. A zona especular é a região onde a maior parte da energia sonora é refletida pela superfície e, toda energia que não encontra-se nesta zona é considerada não-especular (COX; D'ANTONIO, 2009). A Figura 2.2 ilustra o fenômeno de reflexão devido à incidência de ondas sonoras provocadas por uma fonte e interagindo com uma superfície de interesse.

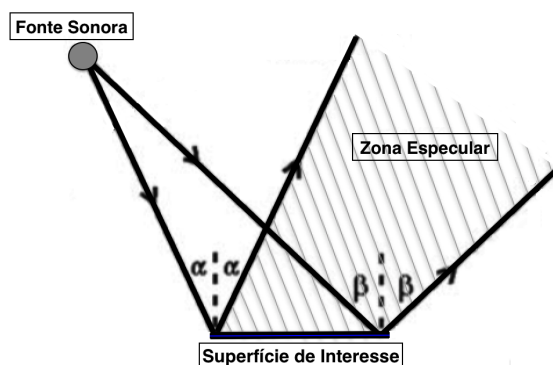


Figura 2.2 – Zona especular devido ao fenômeno de reflexão (modificada).

Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009).

Apesar da zona especular ser mais claramente observada em altas frequências, este conceito é amplamente utilizado em design de difusores.

2.1.2 DIFUSORES

Os difusores podem ser entendidos como superfícies irregulares que promovem a dispersão, ou espalhamento, de ondas sonoras (HENRIQUE, 2002). Os difusores comerciais mais conhecidos e utilizados em acústica de salas são os difusores de Schroeder, algumas salas de concerto como a *Glasgow Royal Concert Hall* (GBR) e estúdios de gravação como o *The Hit Factory* (EUA) são estabelecimentos conhecidos pela qualidade acústica e têm os Difusores de Schroeder como elemento para o tratamento acústico. Na Figura 2.3 é possível visualizar os difusores de Schroeder ao fundo.

O objetivo dos difusores acústicos é justamente evitar a concentração de energia na região especular e refleti-la da forma mais uniforme possível ao longo da área revestida.

2.1.3 COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

O coeficiente de espalhamento é a divisão entre a energia sonora refletida em uma superfície de forma não especular pela energia sonora refletida total, o objetivo de obter o coeficiente de espalhamento é caracterizar superfícies de modo a utilizá-las em programas de modelagem e simulação acústica (COX; D'ANTONIO, 2009). A Figura 2.4 ilustra o comportamento da reflexão de uma onda sonora ao incidir numa superfície rígida.



Figura 2.3 – Estúdio de gravação: *The Hit Factory, New York*.

Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009).

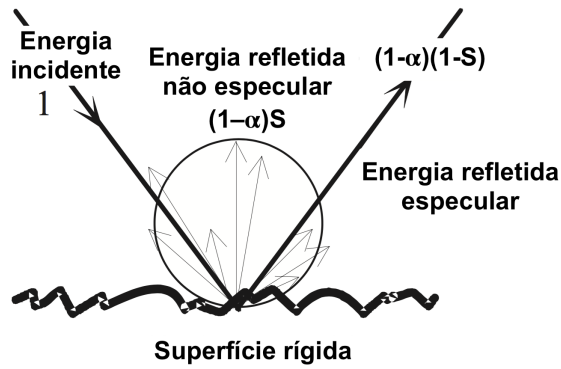


Figura 2.4 – Espalhamento em superfícies rígidas (modificada).

Fonte: (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000)

O cálculo do coeficiente de espalhamento (S) é definido através da Eq. 2.2, onde há uma relação entre o coeficiente de absorção especular aparente (α_{spec}), o coeficiente de absorção sonora de incidência aleatória (α_s), a energia refletida especular (E_{spec}) e a energia refletida total (E_{total}).

$$S = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (2.2)$$

O cálculo dos coeficientes de absorção são apresentados através das Eq. 2.3 e 2.4.

$$\alpha_{spec} = 55.3 \cdot \frac{V}{A} \cdot \left(\frac{1}{c_2 \cdot T_2} - \frac{1}{c_1 \cdot T_1} \right) - \frac{4 \cdot V}{A} \cdot (m_2 - m_1) \quad (2.3)$$

$$\alpha_s = 55.3 \cdot \frac{V}{A} \cdot \left(\frac{1}{c_4 \cdot T_4} - \frac{1}{c_3 \cdot T_3} \right) - \frac{4 \cdot V}{A} \cdot (m_4 - m_3) \quad (2.4)$$

sendo V o volume da câmara de reverberação; A a área da amostra; c a velocidade do som;

T o tempo de reverberação; m o coeficiente de atenuação do ar; E o índice das variáveis c, T e m dizem respeito ao número da medição.

Os números das medições representam as quatro condições de medição para o tempo de reverberação. O primeiro tempo de reverberação (T_1) é medido com a mesa giratória parada com a ausência da amostra, o segundo tempo de reverberação (T_2) é medido com a mesa giratória parada e presença da amostra, o terceiro tempo de reverberação (T_3) é medido com a mesa giratória funcionando com ausência da amostra e por fim, o quarto tempo de reverberação (T_4) é medido com a mesa giratória funcionando com a presença da amostra.

Estudos de Vorländer e Mommertz (2000) sugerem que o valor do coeficiente de espalhamento acústico varia em função da frequência e do ângulo de incidência sonora. Uma das razões para se calcular o coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória é a desconsideração do fator de direcionalidade, ou seja, o método de medição simula o comportamento da superfície com ondas sonoras incidindo de todas as direções.

O coeficiente de difusão mede a uniformidade do som refletido por uma superfície (COX; D'ANTONIO, 2009). e o resultado pode ser avaliado numa distribuição polar, diferentemente do coeficiente de espalhamento que é plotado de maneira cartesiana. A método de medição do coeficiente de difusão é ilustrado na Figura 2.5 e não deve ser confundido com o coeficiente de espalhamento acústico.

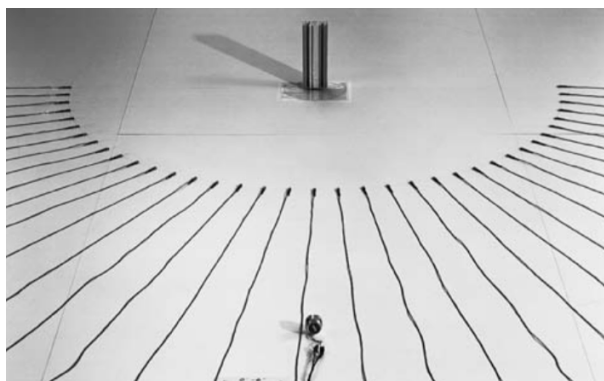


Figura 2.5 – Medição do coeficiente de difusão de um difusor de Schroeder.

Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009)

2.1.4 CAMPO DIFUSO

Um campo difuso é caracterizado quando há uma densidade de energia sonora igual em todos os pontos do volume, e estatisticamente existe uma mesma probabilidade do som ser observado vindo de qualquer direção em qualquer ponto deste volume de controle (LONG, 2014).

O campo difuso é garantido através da avaliação da densidade de modos após uma determinada frequência de transição, conhecida como frequência de Schroeder. Segundo Long (2014) a frequência de Schroeder é calculada através da Eq. 2.5:

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.5)$$

onde T representa o tempo de reverberação e V o volume da sala. Acima da frequência de Schroeder a análise pode ser realizada sem a necessidade de avaliar o comportamento dos modos normais da câmara (LONG, 2014). Cox e D'Antonio (2009) afirma que o valor da frequência de Schroeder é a mínima frequência necessária para assegurar a aplicabilidade das formulações que usam algum resultado do fenômeno de absorção como parâmetro.

2.1.5 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Dado um sistema, a função de transferência pode ser definida como a razão entre a transformada de Laplace da função de saída pela função de entrada (NISE, 2007). A Figura 2.6 ilustra a representação de um sistema de interesse, onde $c(t)$ representa a função de saída e $r(t)$ a função de entrada, ambos no domínio do tempo.

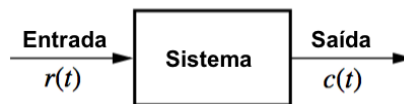


Figura 2.6 – Representação de um sistema com função de entrada e função de saída.

Fonte: (NISE, 2007)

Ao aplicar a transformada de Laplace nas funções $c(t)$ e $r(t)$, serão obtidas duas funções no domínio da frequência, onde $C(s)$ representa a função de saída e $R(s)$ a função de entrada. A divisão destas duas funções no domínio da frequência é chamada de função de transferência $T(s)$, como pode ser observado através da Eq. 2.6.

$$T(s) = \frac{\mathcal{L}\{c(t)\}}{\mathcal{L}\{r(t)\}} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (2.6)$$

De forma mais geral, um sistema no domínio no tempo pode ser transformado no domínio da frequência através da transformada de Fourier, pois a transformada de Laplace pode ser considerada como o caso particular de uma transformada de Fourier amortecida (TONIDANDEL; ARAÚJO, 2012).

2.1.6 VARREDURA DE SENOS

Varredura de senos, também conhecido por *sine sweep*, é o sinal de excitação mais adequado para qualquer medição acústica (MULLER; MASSARANI, 2002). A Figura 2.7 de Muller e Massarani (2002) ilustra uma medição genérica de uma resposta impulsiva de sala com sweep e deconvolução circular, as distorções aparecem no fim do intervalo da resposta impulsiva e podem ser excluídas com uma janela (*win*).

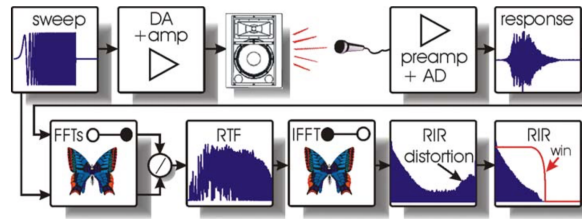


Figura 2.7 – Medição genérica de uma resposta impulsiva de sala com *sweep* e deconvolução circular.

Fonte: (MULLER; MASSARANI, 2002)

Na varredura de senos o cálculo da resposta impulsiva revela um acúmulo de energia em tempos negativos o que caracteriza uma distorção harmônica, logo é fácil identificar os componentes espúrios à informação útil, pois só interessam os valores em tempos positivos (MULLER; MASSARANI, 2002). Ainda segundo Muller e Massarani (2002), um incremento no volume da pressão sonora em uma medição com MLS (*Maximum Length Sequence*) poderia piorar a relação sinal-ruído, o que não ocorre na varredura de senos a qual embora a distorção seja aumentada, estas podem ser excluídas com facilidade por uma janela.

2.1.7 FONTE SONORA

Em acústica de salas, a fonte sonora pode ser definida como qualquer sistema que consiga gerar uma diferença de pressão nas moléculas do ar de forma a ser perceptível pelo ser humano. Neste trabalho a fonte sonora utilizada é um alto falante o qual possui um diafragma que é excitado através de um sinal elétrico advindo do computador. Segundo Bistafa (2008) este diafragma gera uma vibração das moléculas de ar ao seu redor que se propaga pelo ambiente.

Caso a fonte sonora não tenha uma direção preferencial de propagação – como uma esfera pulsante, esta é chamada de fonte omnidirecional, caso contrário – como os alto falantes de uma caixa acústica comum, é chamada de fonte direcional (BISTAFA, 2008). A Figura 2.8 ilustra uma fonte omnidirecional utilizada para ensaios laboratoriais em câmaras reverberantes reais.



Figura 2.8 – Fonte Omnidirecional: Brüel & Kjær *OmniPower Sound Source – Type 4292-L*.

Fonte: (BRÜEL & KJÆR, 2016).

2.1.8 CAMPO REVERBERANTE

De acordo com Henrique (2002), o campo reverberante é um campo sonoro onde coexistem o som direto e o som reverberante. O resultado do som direto refletido por obstáculos em um ambiente fechado, sejam eles paredes, teto, chão ou qualquer outro objeto na trajetória da onda sonora são chamados de sons reverberantes.

A partir de uma distância crítica da fonte sonora, o campo reverberante e o campo direto são praticamente iguais (HENRIQUE, 2002). A Eq. 2.7 quantifica esta distância para uma fonte sonora omnidirecional:

$$D_c = 0.14 \cdot \sqrt{S_s \cdot \bar{\alpha}} \quad (2.7)$$

onde D_c é a distância crítica, S_s é a área das superfícies e $\bar{\alpha}$ é o coeficiente médio de absorção.

Em outras palavras, acima da distância crítica da fonte sonora a sala apresenta um comportamento reverberante, e quanto menor for a distância crítica, maior será o campo difuso (HENRIQUE, 2002).

2.1.9 CÂMARA REVERBERANTE

Segundo Bistafa (2008), uma câmara reverberante é um recinto onde se deseja maximizar o som refletido pelas paredes de forma a gerar um campo difuso. Ensaios para determinação do coeficiente de absorção sonora, coeficiente de transmissão sonora e coeficiente de espalhamento sonoro são realizados em câmaras reverberantes (BISTAFA, 2008). A Figura 2.9 ilustra uma câmara reverberante real com superfícies suspensas:

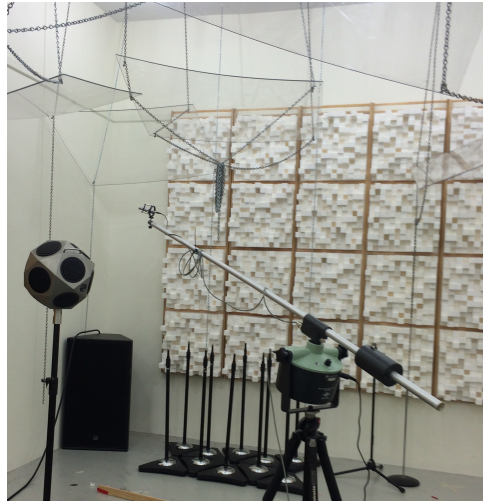


Figura 2.9 – Câmara reverberante: Laboratório de Acústica, *The University of Sydney*

Fonte: Acervo pessoal (2014).

É natural que o tempo de reverberação de uma câmara reverberante assuma valores altos devido ao fato das paredes serem altamente refletoras, no entanto, um fenômeno que não se deseja obter são ondas estacionárias, por isso são acoplados painéis suspensos como estratégia para evitar o paralelismo entre superfícies (HENRIQUE, 2002). As ondas estacionárias fazem com que a densidade de energia sonora se distribua de forma desigual, com o posicionamento destes difusores nos caminhos da propagação modal, novos modos serão formados o que tornará o campo sonoro mais uniforme com relação às frequências (COX; D'ANTONIO, 2009).

2.1.10 INTEGRAL INVERSA DE SCHROEDER

A integral inversa de Schroeder é uma operação matemática necessária para a obtenção da função de decaimento sonoro a qual é obtida após a aquisição de um sinal elétrico de um microfone. De maneira simplificada, um microfone pode ser definido como um transdutor eletroacústico que converte vibrações mecânicas em sinais elétricos através das deflexões de um diafragma (FRADEN, 2004).

Estes sinais elétricos são então processados através da integral inversa de Schroeder, representada pela Eq. 2.8.

$$R_{(t)} = \int_t^{\infty} h^2_{(t)} \cdot dt = \int_0^{\infty} h^2_{(t)} \cdot dt - \int_0^t h^2_{(t)} \cdot dt \quad (2.8)$$

sendo $h_{(t)}$ a resposta ao impulso de um diafragma no domínio do tempo e $R_{(t)}$ o nível de pressão sonora (dB) no domínio do tempo.

A função $R_{(t)}$ é entendida como a função de decaimento sonoro na qual é possível

aferir o valor do tempo de reverberação. A Figura 2.10 ilustra um exemplo de aquisição da função $h(t)$, e após a operação da integral de Schroeder, a função $R(t)$ (HAK et al., 2012).

Analisando a Eq. 2.8 juntamente à Figura 2.10 é possível observar que embora a função $h(t)$ seja iniciada no valor zero, o intervalo de interesse não o é. A integral de Schroeder propõe que a resposta ao impulso seja elevada ao quadrado com os limites de integração de t à infinito. Isto ocorre devido ao fato do intervalo de 0 a t ser um tempo “ocioso” de medição e portanto deve ser suprimido do sinal completo, que varia de 0 à infinito. Desta forma, t e infinito se tornam os limite de integração inferior e superior, respectivamente. Como o decaimento sonoro é um sinal discreto, cada ponto irá variar em função dos incrementos infinitesimais (Δt), de forma que, ao atingirem o ruído de fundo (região estabilizada) a função decaimento assumirá valores convergentes dentro de uma tolerância. A Eq. 2.9 exemplifica o cálculo de cada ponto da função decaimento com incrementos infinitesimais.

$$R_{(t+\Delta t)} = \int_{t+\Delta t}^{\infty} h^2_{(t+\Delta t)} \cdot dt \quad (2.9)$$

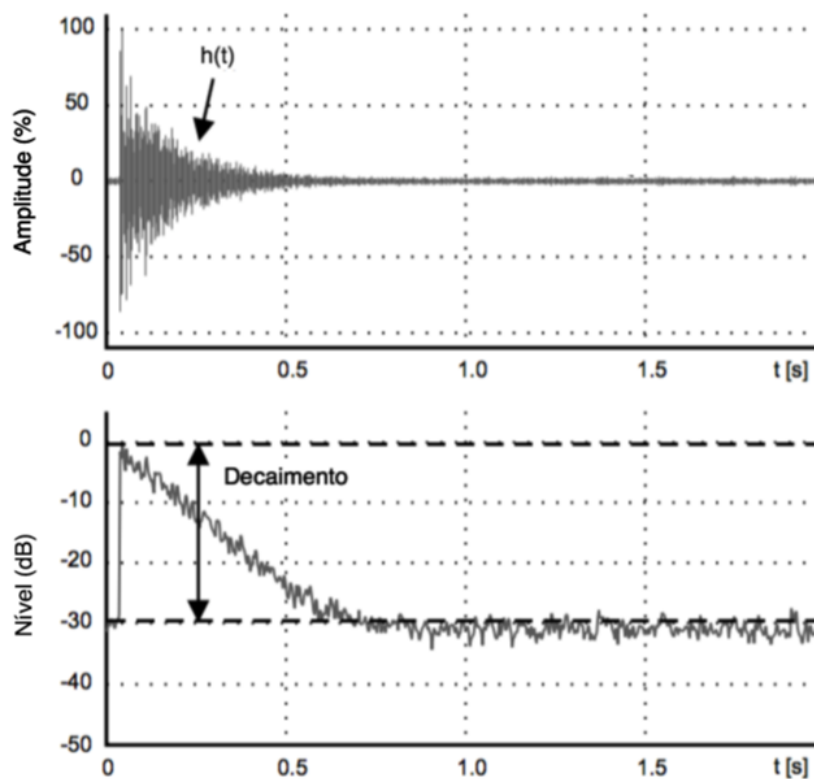


Figura 2.10 – Resposta ao impulso da membrana no domínio do tempo, $h(t)$, e curva de decaimento sonoro no domínio do tempo, $R(t)$ (modificada).

Fonte: (HAK et al., 2012)

O método é chamado de integral inversa pois o limite superior de integração tende ao infinito (tempo infinito) e durante a aquisição do sinal, essa condição é necessária pois não se sabe o exato momento em que a medição será iniciada.

2.2 AUTOMAÇÃO

2.2.1 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de computação física ou embarcada, onde o sistema interage com o ambiente por meio de hardware e software (MCROBERTS, 2011). Segundo Cavalcante et al. (2011), o Arduino consiste em uma placa de circuitos para um micro-controlador AVR, que é constituído de um micro-processador, memória e periféricos de entrada e saída. A Figura 2.11 ilustra o modelo Arduino Uno.

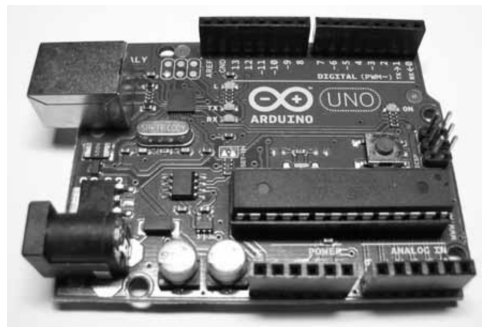


Figura 2.11 – Arduino Uno.

Fonte: (MCROBERTS, 2011).

A escolha do Arduino se fez necessária devido ao fato de haver uma relação inversa entre a qualidade das medições e o tempo total de medição. Com o auxílio do Arduino é possível criar um sistema mais rápido de medição e conseqüentemente aumentar a qualidade da medição.

Apesar de existirem outras plataformas para micro-controladores, o Arduino se destaca no cenário mundial pela facilidade de programação, versatilidade e baixo custo (CAVALCANTE et al., 2011).

2.2.2 MOTOR DE PASSO

De acordo com Santos (2008), motores de passo são dispositivos eletro-mecânicos que convertem pulsos elétricos em variação angular discreta de um eixo, os pequenos incrementos angulares são denominados passos. O motor de passo é utilizado quando há a necessidade de movimentos precisos com relação ao ângulo de rotação, velocidade de rotação, posição e sincronismo (SANTOS, 2008).

Além disso, o motor de passo possui interface integrada ao Arduino com possibilidade de ser controlado via Matlab.

2.2.3 INSTITUTE OF TECHNICAL ACOUSTICS TOOLBOX

O ITA *toolbox* consiste em uma *toolbox* que permite o usuário fazer operações matemáticas, aquisição e processamento de sinais, simulação e edição de resultados no ambiente MATLAB. Trata-se de um projeto *open source* e portanto, uma *toolbox* gratuita desenvolvida pelo *Institute of Technical Acoustics* da *RWTH Aachen University*, localizada na Alemanha.

2.3 METROLOGIA

2.3.1 MEDIÇÃO INDIRETA

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a medição indireta pode ser definida quando o valor do mensurando é calculado através de uma equação matemática envolvendo duas ou mais medidas.

Como as medições indiretas envolvem mais de uma medida, estas podem ser divididas em variáveis aleatórias correlacionadas e não-correlacionadas, onde são definidas como variáveis que variam de forma sincronizada e completamente dessincronizada, respectivamente (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). A Eq. 2.10 estima o coeficiente de correlação ao analisar “n” pares de dados experimentais.

$$r_{(X,Y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.10)$$

sendo $r_{(X,Y)}$ a estimativa do coeficiente de correlação para as variáveis X e Y, x_i e y_i o i-ésimo par de valores das variáveis X e Y, \bar{x} e \bar{y} os valores médios das variáveis X e Y, e n o número total de pares de pontos das variáveis X e Y.

O valor da estimativa do coeficiente de correlação varia entre -1 e +1. A interpretação dos valores é apresentada na Tabela 2.1. De um modo geral, Albertazzi e Sousa (2008) recomenda que valores com módulo acima de 0,8 sejam considerados como correlação plena e valores com módulo abaixo de 0,2 podem ser considerados como sem correlação.

Tabela 2.1 – Estimativa de correlação

Coeficiente de correlação	Tipo de correlação
$r_{(X,Y)} = -1$	Correlação inversa
$-1 < r_{(X,Y)} < 0$	Correlação inversa parcial
$r_{(X,Y)} = 0$	Sem correlação
$0 < r_{(X,Y)} < 1$	Correlação direta parcial
$r_{(X,Y)} = 1$	Correlação direta

Fonte: Autoria própria (2016).

2.3.2 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Segundo a definição da ABNT et al. (2003), a incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que são atribuídos ao mensurando. O resultado de uma medição pode ser uma boa estimativa do valor do mensurado, e os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos não-aleatórios, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão (ABNT et al., 2003).

As incertezas de medição são influenciadas pelo tipo de correlação existente: direta ou indireta. Deve-se levar em conta o sincronismo entre os erros aleatórios associados às medições e é razoável assumir que estes erros apresentem valores extremos dentro de suas respectivas faixas de variação (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Caso não exista correlação, as incertezas de medição são calculadas de outra maneira. Como não há sincronismo entre os erros aleatórios associados às medições, a forma de avaliar estas quantidades é baseada na lei de combinação das variâncias, válida para variáveis estatisticamente independentes (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

2.3.3 REPETITIVIDADE

Repetitividade é um intervalo o qual os resultados do processo de medição são esperados para um mesmo operador, medindo uma mesma variável e em condições operacionais idênticas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

2.3.4 REPRODUTIBILIDADE

Reprodutibilidade corresponde ao intervalo o qual os resultados do processo de medição são esperados para diferentes operadores, medindo uma mesma variável em condições operacionais idênticas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada a este trabalho é baseada na norma ISO 17497-1 (2004) por se tratar do único método válido para a medição do coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória até o momento. Uma descrição mais detalhada do processo de medição pode ser encontrada através da norma ISO 17497-1 (2004).

Optou-se por propor um sistema mais rápido de medição com o uso da mesa giratória acoplada ao Arduino, com isso, uma melhor qualidade nas medições pode ser observada.

A medição do coeficiente de espalhamento acústico pode ser realizada em câmara reverberante real ou em escala reduzida, devidamente validada de acordo com a norma ISO 354 (2003). É concluído através de Vorländer et al. (2004) que apesar das diferenças de *set-up*, técnica de medição e escala, os dois tipos de câmaras obtêm resultados convergentes para o coeficiente de espalhamento sonoro.

Primeiramente dois parâmetros são definidos com o uso da ISO 17497-1 (2004): o fator de escala e a área equivalente de absorção, calculados através das Eq. 3.1 e 3.2, respectivamente.

$$V \geq 200 \cdot N^{-3} \quad (3.1)$$

$$A_{abs} \leq 0,30 \cdot V^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

onde V representa o volume interno da câmara reverberante em escala, N o fator de escala e A_{abs} a área equivalente de absorção. Uma modelagem inicial da câmara reverberante em escala foi necessária a fim de adquirir o valor do volume interno e também para estimar o preço/número de chapas de MDF necessárias para a construção da câmara.

O volume interno da câmara proposta é de $1,48 \text{ m}^3$ e portanto obteve-se N maior ou igual a 5,13 e A_{abs} igual ou menor que $0,39 \text{ m}^2$. Além disso, a distância mínima entre a mesa giratória e as paredes da câmara deve ser maior ou igual a N^{-1} , logo, 0,195 m.

Algumas especificações devem ser cumpridas para a mesa giratória e tamanho da amostra segundo a norma ISO 17497-1 (2004). Segundo Vorländer et al. (2004) embora seja possível fazer a medição com a amostra com formato quadrangular, a pesquisa recomenda amostras circulares devido ao fato de evitar ou diminuir os efeitos de borda causados pela difração do som. Portanto, a amostra de formato circular foi selecionada.

O diâmetro mínimo (d_{min}) para a amostra é calculado através da Eq. 3.3 que relaciona o diâmetro mínimo com o fator de escala.

$$\frac{\pi \cdot d_{min}^2}{4} \geq \frac{3}{N} \quad (3.3)$$

A altura da amostra é limitada através da Eq. 3.4, pois é preciso garantir que a espessura da amostra seja suficientemente pequena se comparada ao diâmetro.

$$h_{max} \leq \frac{d}{16} \quad (3.4)$$

sendo h_{max} a altura máxima permitida e d o diâmetro da amostra.

Finalmente, a amostra não deve possuir um coeficiente de absorção (α_{sab}) maior que 0,5, que segundo Bistafa (2008) pode ser calculado através da equação 3.5.

$$\alpha_{sab} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.5)$$

onde V é o volume da câmara, A a área da amostra, T_2 o tempo de reverberação com amostra e T_1 o tempo de reverberação sem amostra.

Na Tabela 3.1 é mostrado os resultados encontrados dos cálculos dos parâmetros da câmara reverberante em escala, sendo V um parâmetro especificado do projeto e d especificado após cálculo do d_{min} .

Tabela 3.1 – Tabela de resultados da câmara reverberante em escala

Parâmetro	Equação	Valor
V	—	1,48 m^3
N	3.1	5,13
A_{abs}	3.2	0,39 m^2
d_{min}	3.3	0,58 m
d	—	0,80 m
h_{max}	3.4	0,05 m

Fonte: Autoria própria (2016).

Para quantificar a qualidade da construção da mesa giratória faz-se necessário calcular o coeficiente de espalhamento sonoro. Os valores recomendados segundo a norma ISO 17497-1 (2004) são apresentados na Tabela 3.2.

O sinal de teste utilizado é a varredura de senos (ou *sine sweep*). A escolha foi baseada na pesquisa de Muller e Massarani (2002) onde é justificado que a varredura de

Tabela 3.2 – Coeficiente de espalhamento máximo para a mesa giratória

Frequência (f/N), Hz	100	125	160	200	250	315
Coeficiente de espalhamento, s_{base}	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Frequência (f/N), Hz	400	500	630	800	1000	1250
Coeficiente de espalhamento, s_{base}	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15
Frequência (f/N), Hz	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Coeficiente de espalhamento, s_{base}	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,25

Fonte: ISO 17497-1 (2004).

senos apresenta melhor relação sinal-ruído, insensibilidade à variância no tempo, melhor resolução, melhor exatidão e maior confiabilidade, quando comparada à técnica MLS.

A norma ISO 17497-1 (2004) recomenda ao menos seis medições para o tempo de reverberação. É necessária a variação da posição da fonte sonora assim como a posição do microfone. A Figura 3.1 ilustra as 6 medições a serem realizadas para o cálculo do tempo de reverberação.

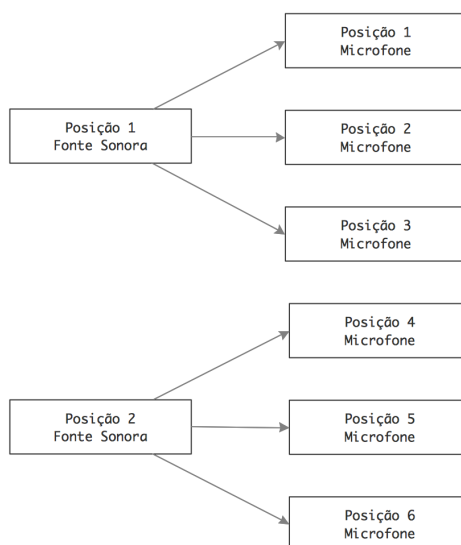


Figura 3.1 – Diagrama de variações de posição de fonte sonora e microfone.

Fonte: Autoria própria (2016).

Vale ressaltar que as posições 1 e 2 da fonte sonora são necessariamente diferentes. As posições 1, 2 e 3 do microfone são diferentes entre si, e podem ser igualadas as posições 4, 5 e 6 do microfone para a segunda posição da fonte sonora.

A Figura 3.2 ilustra os equipamentos devidamente posicionados para a medição do tempo de reverberação onde não há presença da amostra de teste.

Para os ensaios propostos para esta pesquisa serão necessários os seguintes equipamentos:

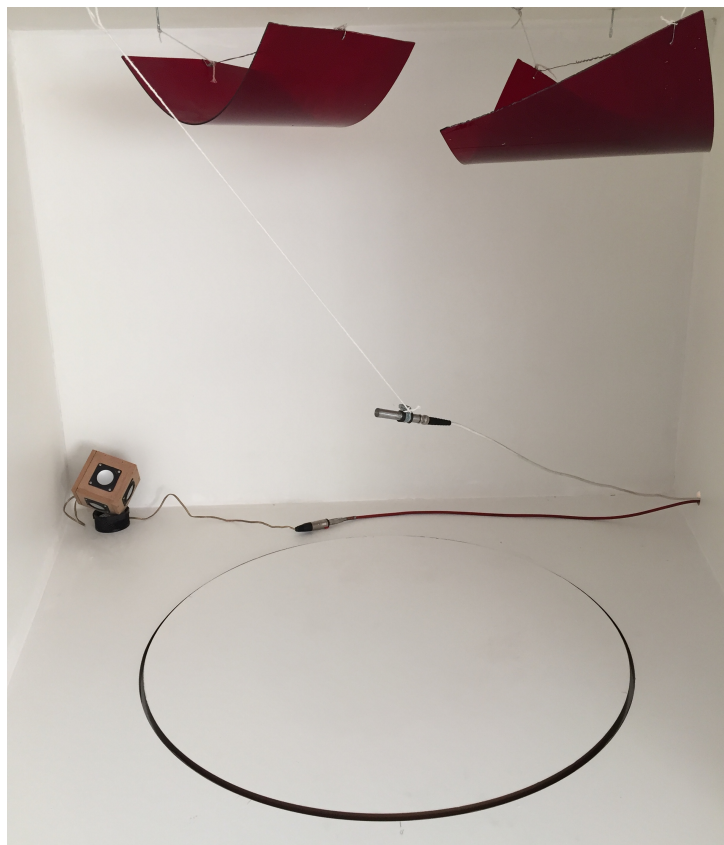


Figura 3.2 – Medição do tempo de reverberação sem amostra.

Fonte: Autoria própria (2016).

- Notebook com software Matlab e *ITA-toolbox*;
- Placa conversora AD/DA Roland Quad-capture usb 2.0;
- Microfone capacitivo de meia polegada da marca G.R.A.S. junto ao seu pré-amplificador;
- Fonte sonora cúbica construída por Gomes et al. (2011);
- Amplificador de potência da marca Alesis RA-100;

A Figura 3.3 ilustra os equipamentos utilizados para medição do coeficiente de espalhamento acústico em escala reduzida.

De forma mais ampla é apresentada a Figura 3.4 para mostrar todo o procedimento de medição do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em escala.

Vale evidenciar que durante o processo de medição podem ocorrer falhas como um ruído de fundo mais acentuado e não esperado, falseio na rotação da mesa giratória, falha na sincronia entre sinal de teste e rotação da mesa giratória, e também qualquer agente externo que provoque um distúrbio significativo na resposta ao impulso que não possa ser suprimido. A norma ISO 17497-1 (2004) ainda especifica que para uma confiabilidade nos



Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para medição do coeficiente de espalhamento acústico.

Fonte: Autoria própria (2016).

resultados, deve ser realizada a média aritmética simples das seis medições do tempo de reverberação para então ser executado o cálculo do coeficiente de espalhamento acústico.

Após obter os resultados das medições, é necessária a avaliação das incertezas de medição. As equações necessárias para fazer esta avaliação são apresentadas na norma ISO 17497-1 (2004).

Primeiramente calcula-se a média simples dos tempos de reverberação através da Eq. 3.6.

$$\bar{T} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.6)$$

sendo \bar{T} a média aritmética das medições, M o número de medições e T_i o valor de cada medição.

Após o cálculo da média aritmética das medições, é calculado o desvio padrão (δ) através da Eq. 3.7.

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(T_i - \bar{T})^2}{M \cdot (M - 1)}} \quad (3.7)$$

As incertezas de medição correspondentes aos coeficientes de absorção das Eq.

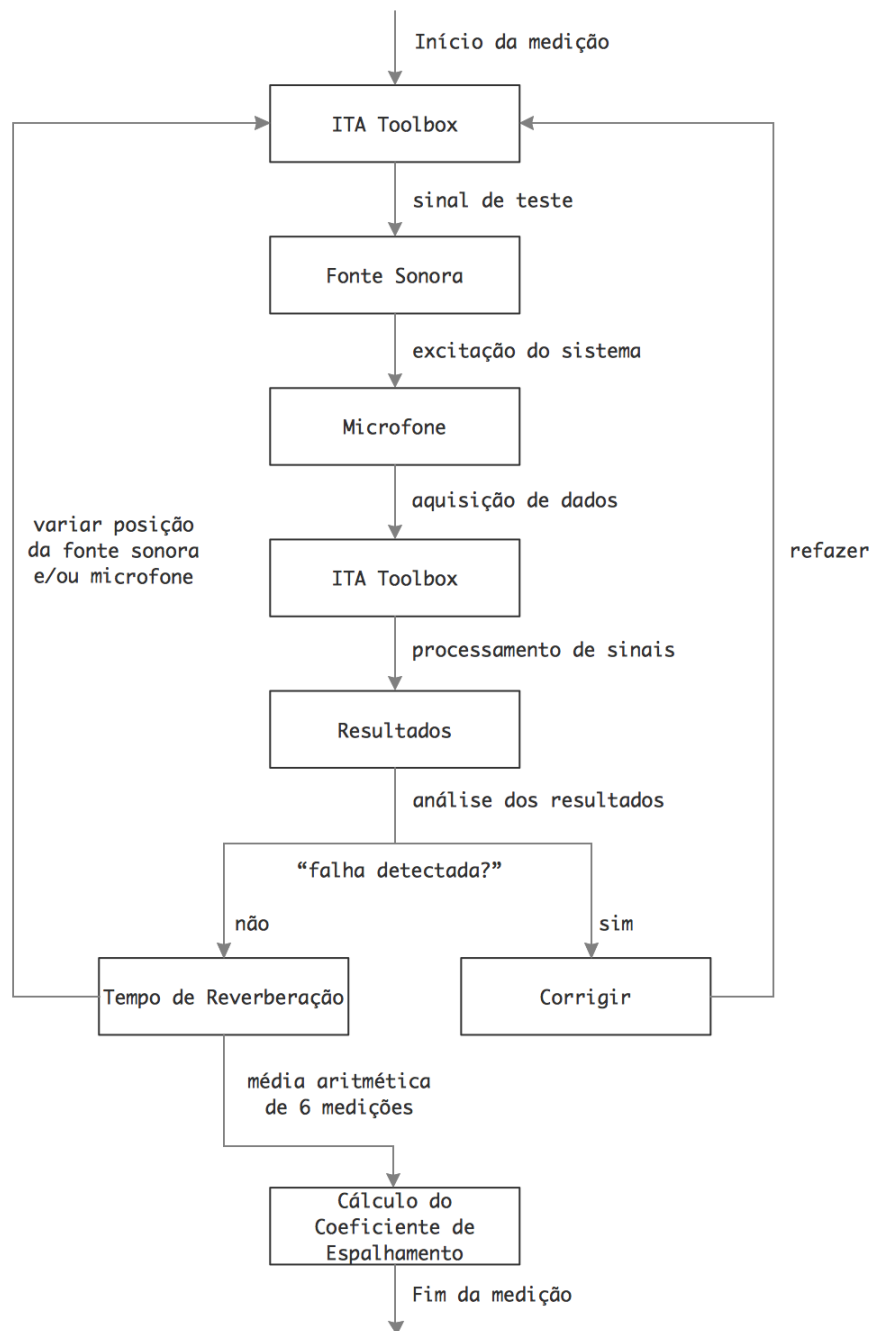


Figura 3.4 – Diagrama de medição do coeficiente de espalhamento sonoro.

Fonte: Autoria própria (2016).

2.3 e 2.4 são calculados através das Eq. 3.8 e 3.9, respectivamente.

$$\delta_{\alpha_{spec}} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot A} \cdot \sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{T_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_2}{T_2^2}\right)^2} \quad (3.8)$$

sendo $\delta_{\alpha_{spec}}$ o desvio padrão relativo ao coeficiente de absorção especular aparente e os

índices das variáveis correspondem às condições de medição apresentadas na tabela 5.1.

$$\delta_{\alpha_s} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot A} \cdot \sqrt{\left(\frac{\alpha_3}{T_3^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_4}{T_4^2}\right)^2} \quad (3.9)$$

sendo δ_{α_s} o desvio padrão relativo ao coeficiente de absorção sonora de incidência aleatória.

Para calcular o desvio padrão relativo ao coeficiente de espalhamento sonoro devido à incidência aleatória (δ_s) é utilizada a Eq. 3.10.

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{spec} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{\alpha_{spec}}}{\alpha_{spec} - 1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\alpha_s}}{1 - \alpha_s}\right)^2} \quad (3.10)$$

sendo δ_s o desvio padrão do coeficiente de espalhamento sonoro.

Segundo Magalhães e Lima (2000), para garantir 95% de confiabilidade em uma medição, o valor do seu desvio padrão deve ser multiplicado por 1.96 – encontrado na tabela de distribuição normal, ou aproximadamente 2, segundo recomendação da norma ISO 17497-1 (2004) para a medição do coeficiente de espalhamento sonoro.

Por fim, um roteiro para executar a medição do coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória em câmara reverberante em escala reduzida é apresentado no apêndice F.

4 MODELAGEM E FABRICAÇÃO

A modelagem da câmara reverberante em escala reduzida foi realizada no software Solidworks e foi concebida de forma a aliar os requisitos de projeto à minimização dos custos de fabricação.

Segundo a norma ISO 17497-1 (2004), ao dimensionar a câmara reverberante em escala é recomendado evitar o paralelismo das paredes. Para tal, uma angulação das paredes laterais foi proposta assim como o uso de difusores na superfície superior de forma a diminuir a probabilidade de ondas estacionárias no interior da câmara e aumentar o número de modos da sala (SANTOS, 2011). Os difusores ficam distribuídos aleatoriamente e suspensos ao longo da chapa superior, além disso, eles são compostos de material termoplástico rígido e foram modelados no formato semicilíndrico. A Figura 4.1 ilustra a estratégia para evitar o paralelismo: angulação das chapas laterais juntamente aos difusores na chapa superior.

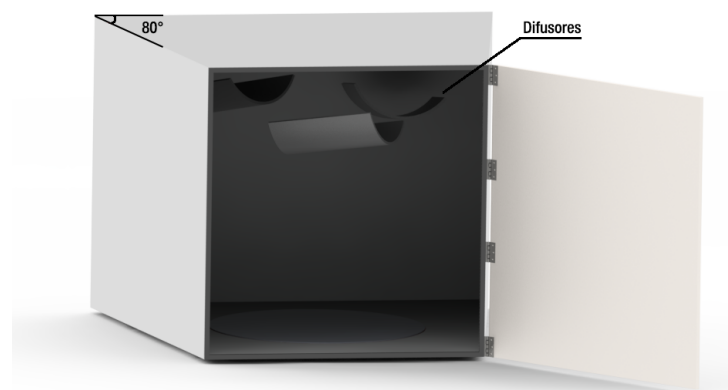


Figura 4.1 – Modelo 3D destacando o ângulo de 80 graus nas paredes laterais e difusores distribuídos na chapa superior.

Fonte: Autoria própria (2016).

Para a mesa giratória, é proposta uma mesa circular no material MDF acoplada a um motor de passo para realizar as rotações com maior precisão. Este motor é controlado pelo Arduino.

A escolha do modelo de motor de passo foi realizada com base no cálculo do torque necessário para a mesa giratória superar a força de atrito por deslizamento causada pela força peso de uma amostra com peso máximo. Em outras palavras, um disco sólido de diâmetro da mesa giratória, com material de alta densidade (1000 kg/m^3) e altura máxima

previamente dimensionada através da norma ISO 17497-1 (2004). O método de cálculo comentado foi realizado através do software Matlab e é apresentado no apêndice A.

O torque mínimo encontrado foi de $12,88 N \cdot m$ ou $131,33 Kgf \cdot cm$. Apesar do cálculo para o dimensionamento do motor ter sido efetuado com a hipótese de atrito por deslizamento, a construção do projeto final foi realizada de tal forma que a mesa giratória esteja sob atrito de rolamento. Esta nova configuração foi concebida para evitar qualquer problema operacional durante os experimentos e é ilustrada nas Figuras 4.2 e 4.3. O coeficiente de atrito por rolamento é observado através de Norton (2013) como um valor que varia entre 0,005 e 0,00005, no entanto, estes valores são válidos para contato entre superfícies metálicas rígidas, como neste projeto a esfera de precisão é de aço e as superfícies de contato são de MDF cru, a hipótese de atrito por rolamento não foi adotada para o cálculo do dimensionamento do motor de passo.

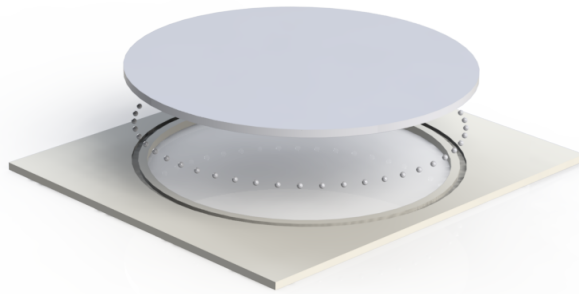


Figura 4.2 – Modelo 3D da mesa giratória e pista de atrito por rolamento.

Fonte: Autoria própria (2016).

Visto que as lojas na cidade de Curitiba apresentavam as opções de motores de passo com caixa de redução de $50 Kgf \cdot cm$, $100 Kgf \cdot cm$ e $300 Kgf \cdot cm$, o motor de passo de $300 Kgf \cdot cm$ foi selecionado. O sistema de acoplamento entre mesa giratória e motor de passo é apresentada na Figura 4.4.

Uma estrutura metálica apoiada por rodas de poliuretano foi modelada e fabricada com o intuito de facilitar a mobilidade do aparato de medição. A Figura 4.5 ilustra o modelo 3D da estrutura metálica de apoio à câmara reverberante em escala reduzida.

O modelo completo do aparato de medição juntamente à estrutura metálica de suporte é ilustrada na Figura 4.6.

O material da câmara reverberante em escala reduzida é composta por chapas de MDF de 18 milímetros de espessura, todas as junções foram parafusadas com parafusos M5 de 50 milímetros de comprimento e um acabamento em massa acrílica nas junções



Figura 4.3 – Mesa giratória e pista de atrito por rolamento.

Fonte: Autoria própria (2016).

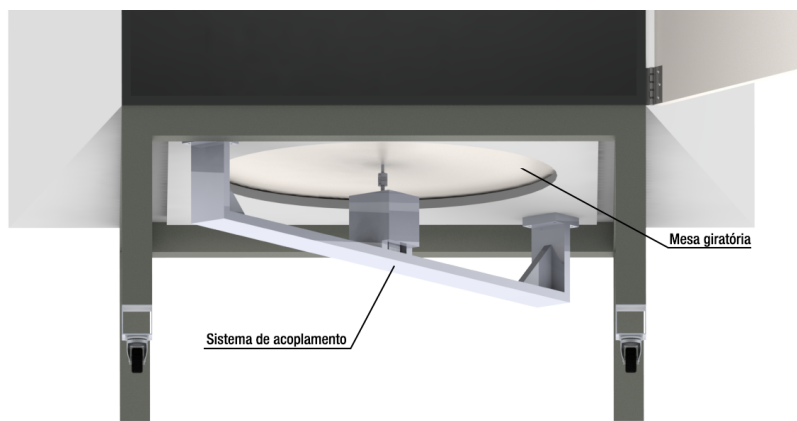


Figura 4.4 – Modelo 3D do sistema de acoplamento entre mesa giratória e motor de passo.

Fonte: Autoria própria (2016).

foi realizado para garantir a vedação completa da câmara. Para a completa vedação da chapa frontal, um perfil de borracha de 3 milímetros conforme ilustrado na Figura 4.7 foi selecionado para que a vedação no movimento de abrir e fechar seja alcançada.

A Figura 4.8 ilustra o final da etapa de montagem das chapas laterais, frontal, superior, inferior e posterior realizado no laboratório de construção do DACOC. Os desenhos de fabricação de todas as partes assim como os desenhos de montagem deste projeto são apresentados no apêndice B.

As amostras utilizadas para validação da câmara reverberante em escala reduzida foram fabricadas de acordo com o estudo apresentado por Vorländer e Mommertz (2000),

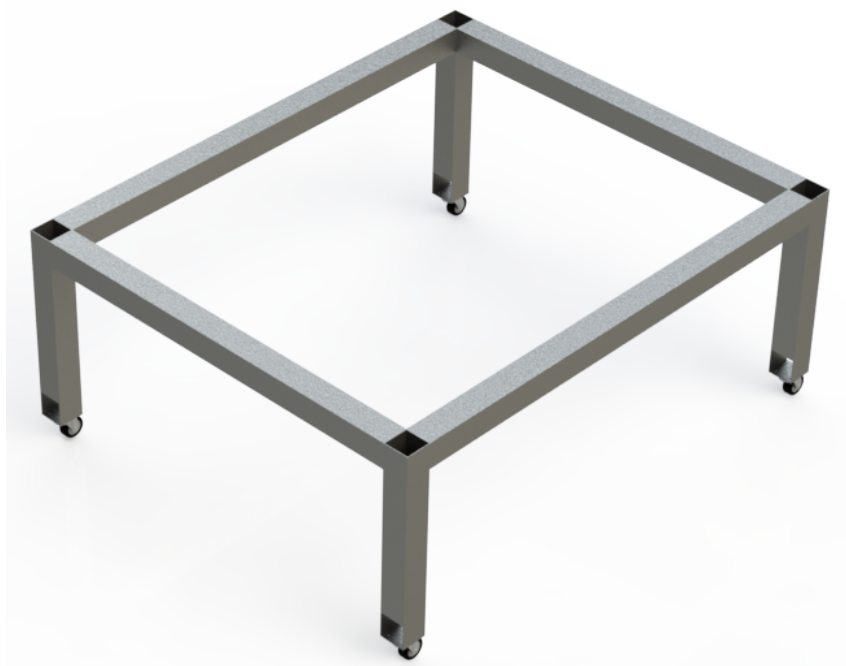


Figura 4.5 – Modelo 3D da estrutura metálica de apoio à câmara reverberante em escala reduzida.

Fonte: Autoria própria (2016).



Figura 4.6 – Modelo 3D do aparato de medição juntamente à estrutura metálica.

Fonte: Autoria própria (2016).

que deu origem à norma ISO 17497-1 (2004). Portanto, semiesferas de 40 milímetros de diâmetro em gesso, assim como hexaedros em madeira de 20 milímetros de lado e 600 milímetros de comprimento foram confeccionados.

A modelagem, fabricação e montagem da câmara foi realizada em um intervalo de 30 dias com um tempo efetivo de trabalho de aproximadamente 100 horas. Sendo 80 horas para a modelagem 3D e 20 horas para a fabricação e montagem.

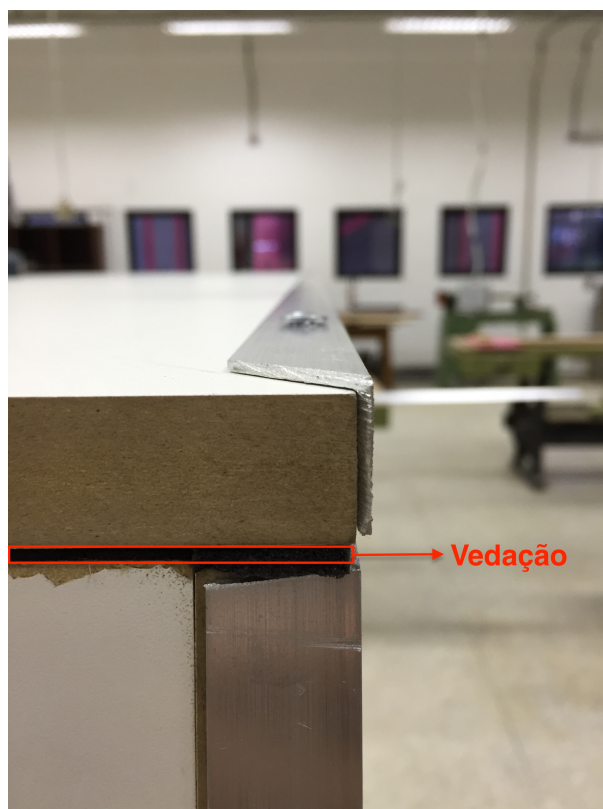


Figura 4.7 – Detalhe da vedação entre chapa frontal e chapa superior, com perfil de borracha.

Fonte: Autoria própria (2016).



Figura 4.8 – Câmara reverberante em escala reduzida após etapa de parafusamento das chapas.

Fonte: Autoria própria (2016).

5 RESULTADOS

Para realizar os ensaios do coeficiente de espalhamento sonoro são necessárias quatro medições do tempo de reverberação. Estas condições foram apresentadas no capítulo 2 e podem ser resumidas através da tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Condições de medição para quatro tempos de reverberação

Tempo de reverberação	Amostra de superfície	Mesa giratória
T_1	Sem amostra	Parada
T_2	Com amostra	Parada
T_3	Sem amostra	Rotacionando
T_4	Com amostra	Rotacionando

Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009)

Após as medições dos quatro tempos de reverberação, primeiramente realiza-se o cálculo do coeficiente de espalhamento sonoro da mesa giratória através dos tempos T_1 e T_3 . Esta análise é necessária para avaliar qual a faixa de frequências que o experimento será válido. A Figura 5.1 ilustra a comparação entre o coeficiente de espalhamento acústico obtido pela mesa giratória e os limites recomendáveis pela norma ISO 17497-1 (2004) na forma gráfica. Os valores limite recomendáveis foram previamente apresentados através da Tabela 3.2.

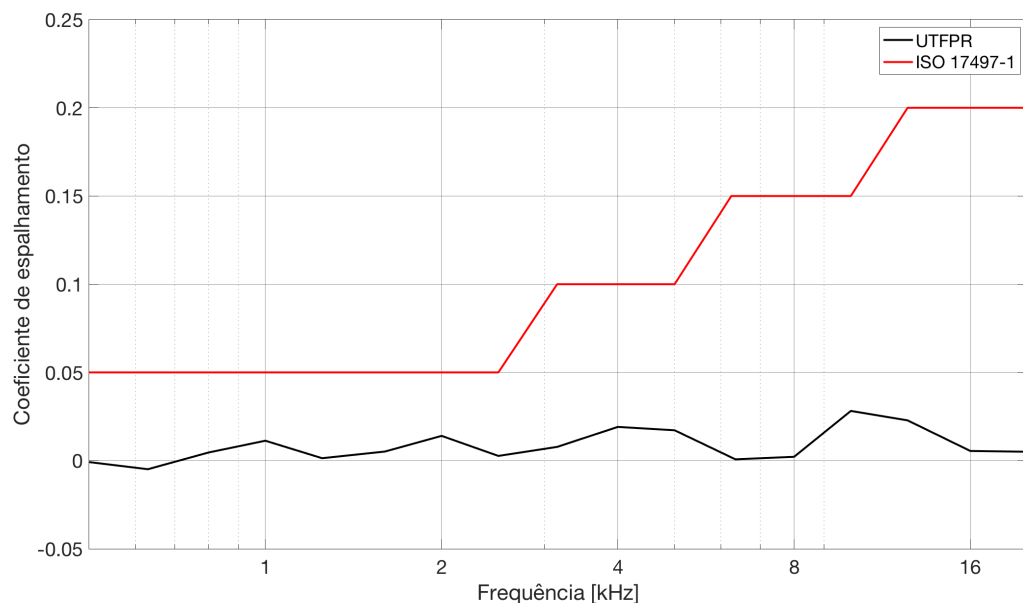


Figura 5.1 – Comparação entre coeficiente de espalhamento acústico da mesa giratória em relação aos limites recomendáveis pela norma ISO 17497-1 (2004).

Fonte: Autoria própria (2016).

Observa-se que a mesa giratória foi qualificada pois a curva do coeficiente de espalhamento acústico está abaixo do limite recomendável para todo espectro de frequência do microfone que está sendo utilizado. Ainda, vale ressaltar a boa qualidade do aparato construído pois este se aproximou da condição ideal, a qual resulta no coeficiente de espalhamento da mesa giratória igual a zero.

Para cada medição do coeficiente de espalhamento acústico são apresentados os parâmetros do sinal de entrada através da Tabela 5.2, estes parâmetros são inseridos nos seus devidos campos da aba *Transferfunction* da ferramenta *ITA-Toolbox* antes da realização de cada medição na condição da mesa giratória parada e rotacionando. Estes valores são recomendações devido as características do equipamento de medição – fonte sonora e microfone utilizado no experimento.

Tabela 5.2 – Parâmetros do sinal de entrada

Campo	Mesa parada	Mesa rotacionando
Frequência de amostragem	48000	48000
Grau FFT	17	17
Limites de frequência [Hz]	20 20000	20 20000
Tipo de sinal	expsweep*	expsweep*
Margem de parada [s]	0	0
Amplificação de saída [dBFS]	0	0
Pausa entre medições	0	0
Número de médias	10	72

Fonte: Autoria própria (2016).

O trabalho que deu origem à norma foi realizado por Vorländer e Mommertz (2000) no qual duas amostras foram analisadas. A primeira foi confeccionada em madeira, em formato semiesférico com 40 milímetros de diâmetro e a segunda foi confeccionada também em madeira, em formato hexaédrico de lados 20 milímetros e comprimento de 600 milímetros. As medições foram realizados em uma câmara reverberante com fator de escala igual a 5.

Para o presente trabalho, semiesferas de gesso de 40 milímetros e hexaedros de madeira de 20 milímetros de lado e 600 milímetros de comprimento foram confeccionadas e os valores do coeficiente de espalhamento comparados ao estudo acima mencionados.

Uma variação na densidade de preenchimento da mesa giratória pelas semiesferas de gesso foi realizada para que fosse possível apresentar comparações com estudos de Vorländer e Mommertz (2000). As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 ilustram as variações de densidade as quais representam 25%, 13% e 6% de preenchimento, respectivamente.

A Figura 5.5 apresenta o coeficiente de espalhamento acústico das amostras de gesso maciças em formato semiesférico de diâmetro 40 milímetros em função da frequência.

Após as medições do coeficiente de espalhamento acústico das duas amostras

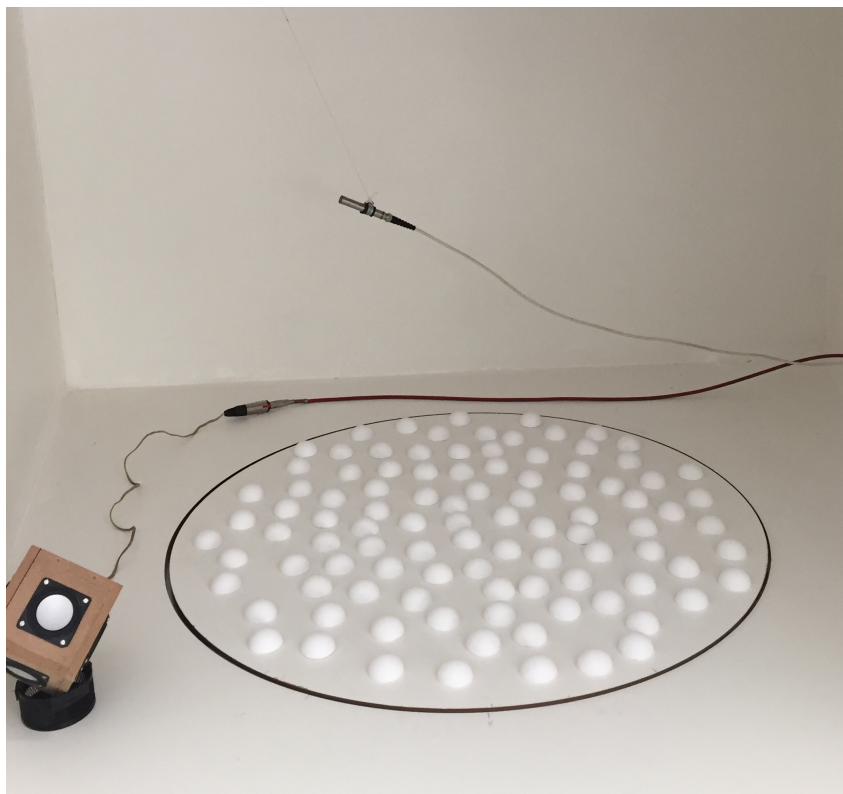


Figura 5.2 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 25% da área da mesa giratória.

Fonte: A autoria própria (2016).

mencionadas, uma comparação foi realizada com os estudos já existentes apresentados por Vorländer e Mommertz (2000).

A Figura 5.6 ilustra a comparação dos valores do coeficiente de espalhamento acústico obtidos com a amostra semiesférica de densidade 25% do estudo de Vorländer e Mommertz (2000) em relação aos valores obtidos no presente trabalho.

De forma análoga, as Figuras 5.7 e 5.8 ilustram a comparação dos valores do coeficiente de espalhamento acústico obtidos com as amostras semiesféricas de densidade 13% e 6%, respectivamente, do estudo de Vorländer e Mommertz (2000) em relação aos valores obtidos no presente trabalho.

É possível observar através das Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 que os valores convergiram para boa parte das bandas de frequência, levando-se em conta as incertezas das medições. Vale lembrar que existem incertezas de medição no estudo de Vorländer e Mommertz (2000), no entanto, estes dados não estão explícitos em seu trabalho.

De forma análoga, foram realizadas medições com amostras de madeira de formato hexaédrico. As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 ilustram as configurações periódicas simples utilizadas para a realização das medições, onde há um espaçamento entre ripas de 40, 20 e 10 milímetros, respectivamente.



Figura 5.3 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 13% da área da mesa giratória.

Fonte: A autoria própria (2016).

Como resultado das medições da amostra de madeira em configuração periódica simples, é apresentada a Figura 5.12.

É possível observar que não há uma diferença significativa no coeficiente de espalhamento acústico ao mudar o espaçamento entre ripas. Mesmo multiplicando por 4 o espaçamento com consequente subtração de 7 ripas de madeira, o coeficiente de espalhamento oscila pouco e pode até mesmo ser considerado equivalente ao levar-se em conta as incertezas de medição como é possível observar na Figura 5.13.

As tabelas referentes aos tempos de reverberação das medições assim como os resultados das incertezas de medição são apresentadas no Apêndice D.

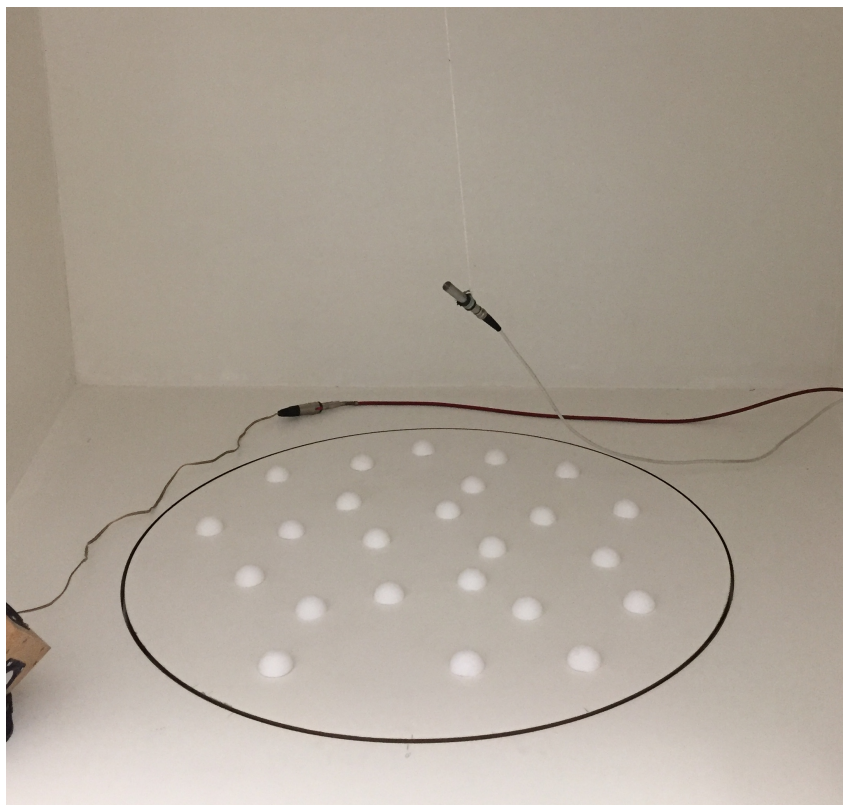


Figura 5.4 – Amostras de gessos com densidade de preenchimento de 6% da área da mesa giratória.

Fonte: Autoria própria (2016).

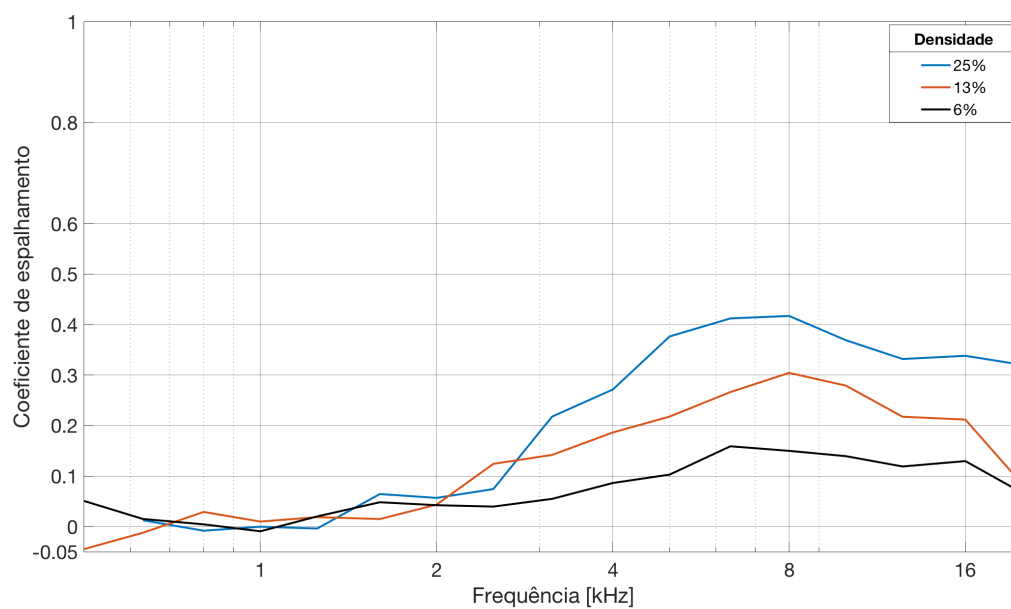


Figura 5.5 – Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de gesso de 40 mm de diâmetro.

Fonte: Autoria própria (2016).

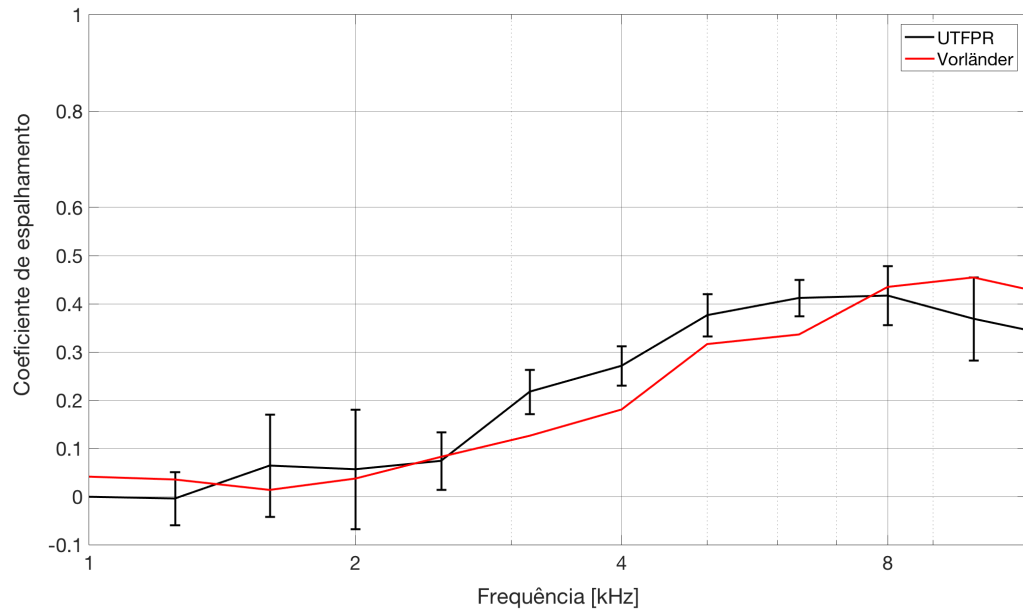


Figura 5.6 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 25% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000).

Fonte: Autoria própria (2016).

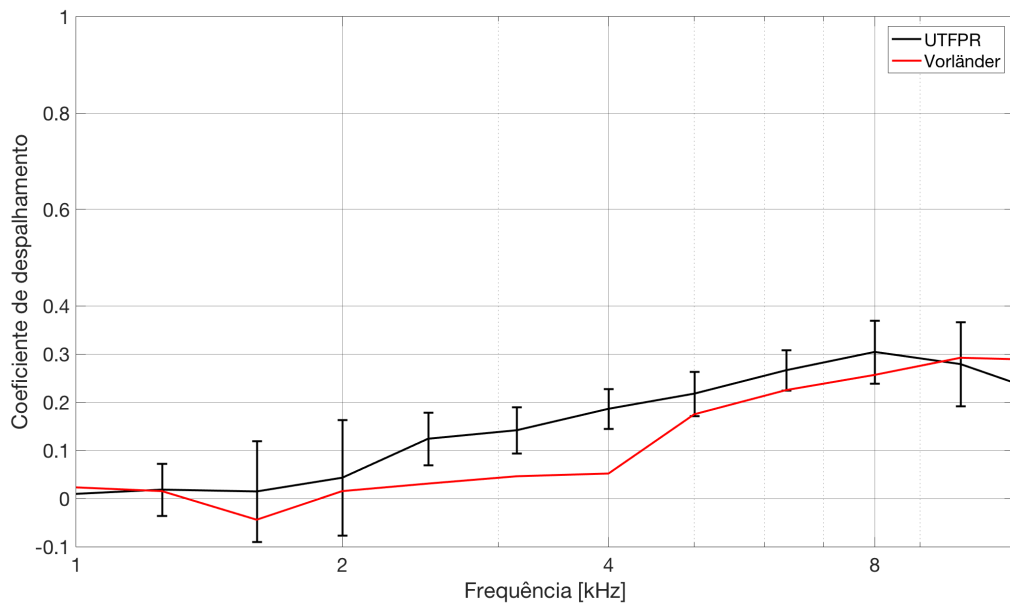


Figura 5.7 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 13% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000).

Fonte: Autoria própria (2016).

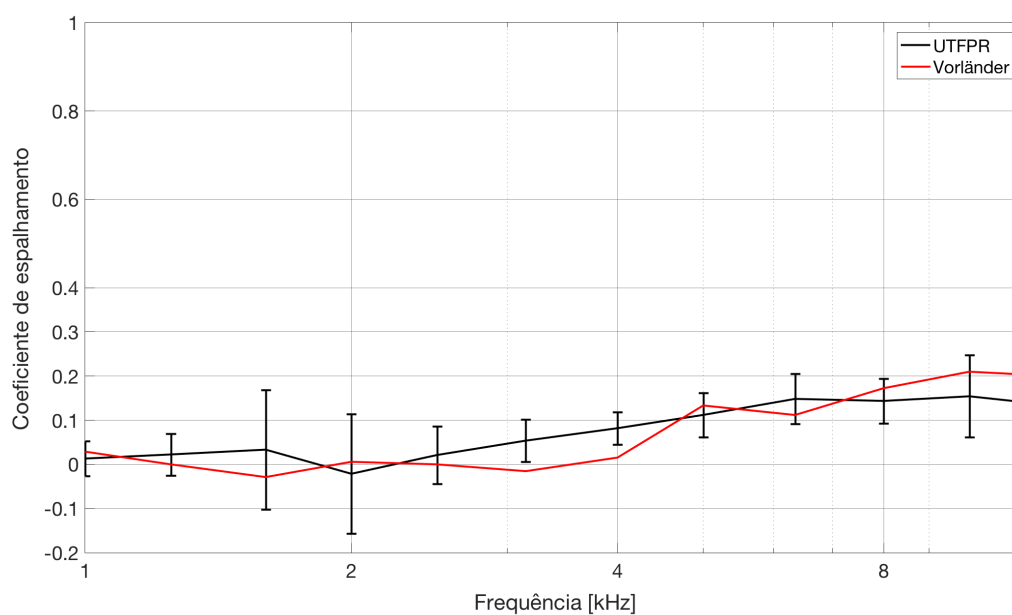


Figura 5.8 – Comparação do coeficiente de espalhamento acústico da amostra semiesférica com densidade de preenchimento de 6% medido na câmara reverberante em escala reduzida da UTFPR com o estudo de Vorländer e Mommertz (2000).

Fonte: Autoria própria (2016).

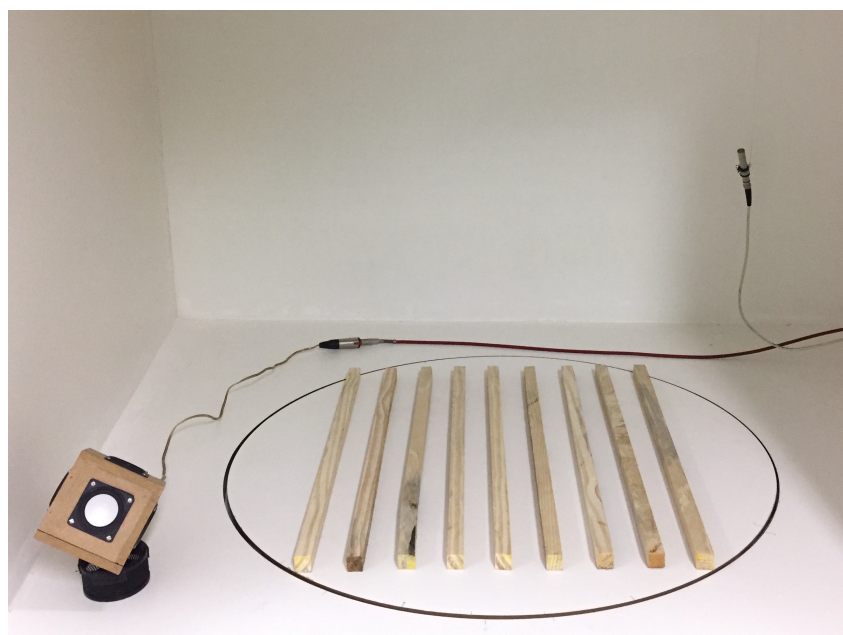


Figura 5.9 – Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 40 milímetros.

Fonte: Autoria própria (2016).

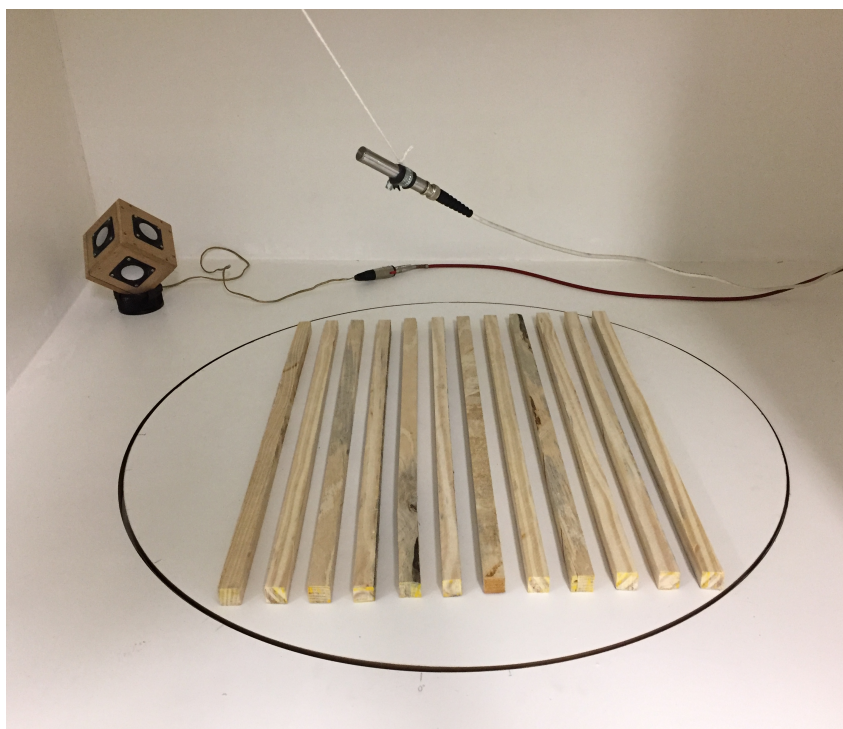


Figura 5.10 – Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 20 milímetros.

Fonte: Autoria própria (2016).

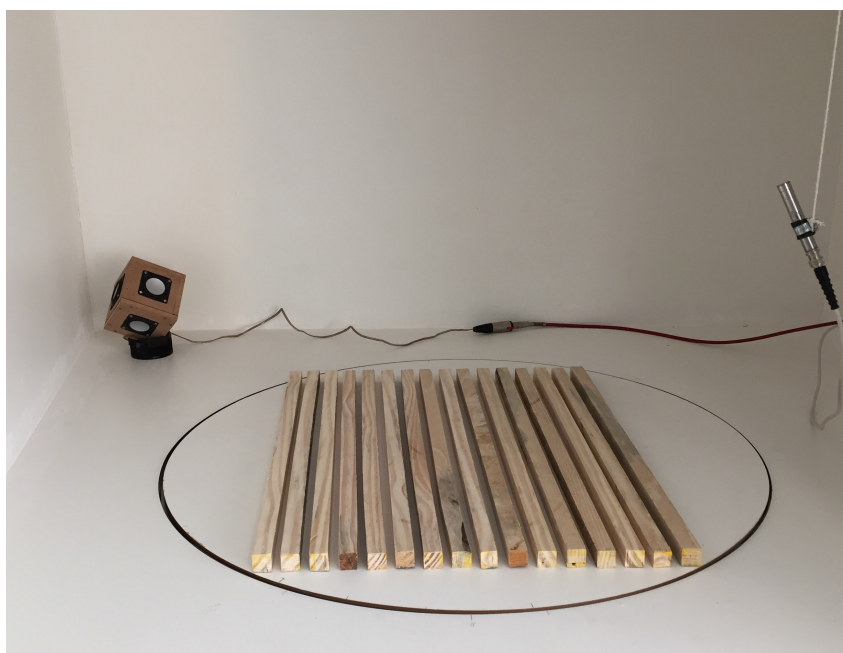


Figura 5.11 – Amostra de madeira em configuração periódica com espaçamento de 10 milímetros.

Fonte: Autoria própria (2016).

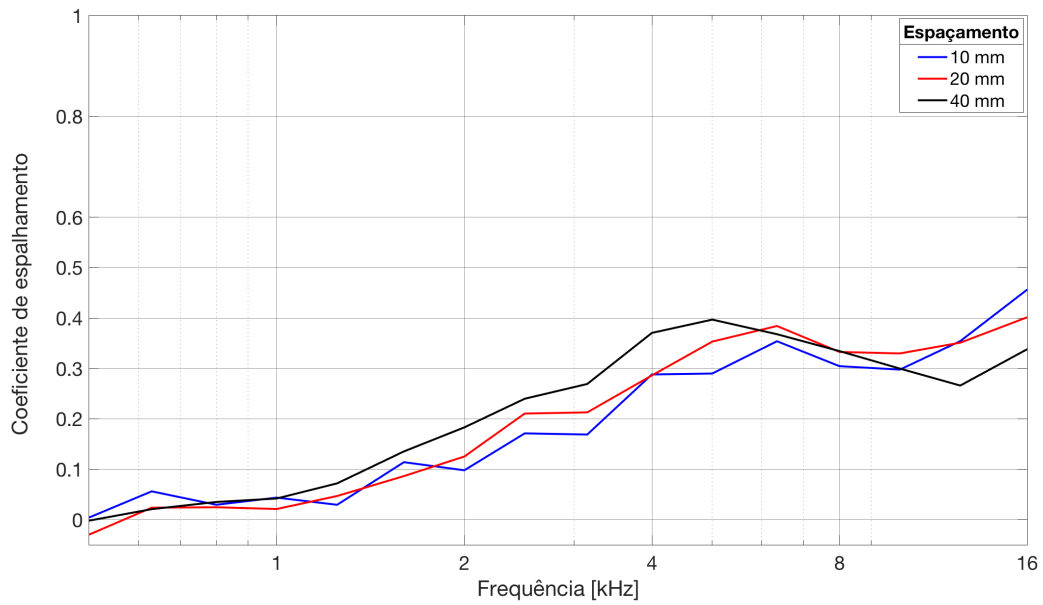


Figura 5.12 – Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de madeira em configuração periódica simples com espaçamento 10, 20 e 40 milímetros.

Fonte: Autoria própria (2016).

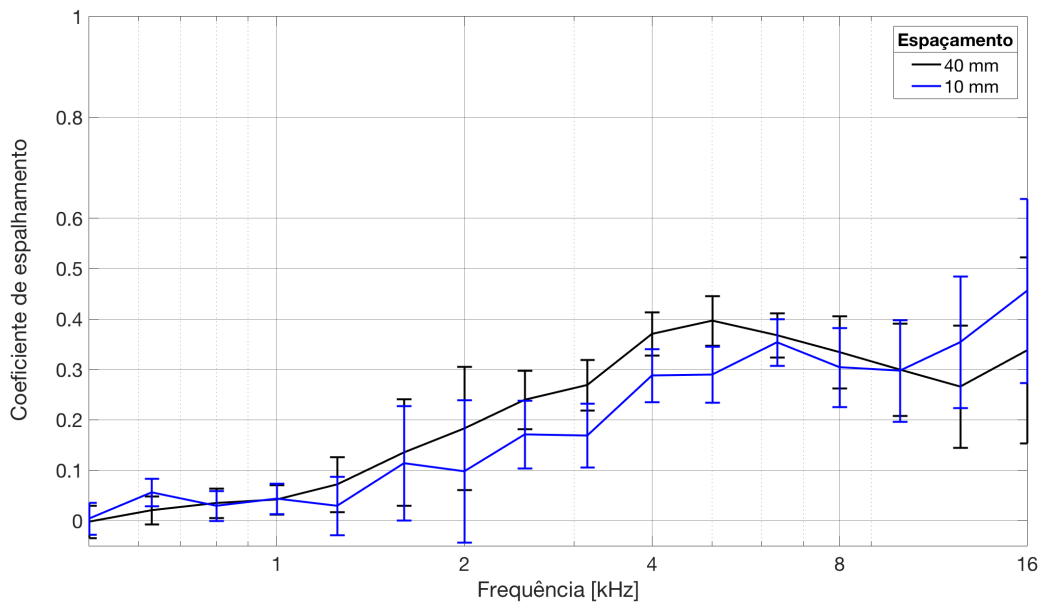


Figura 5.13 – Coeficiente de espalhamento acústico das amostras de madeira em configuração periódica simples com espaçamento 10 e 40 milímetros e incertezas de medição.

Fonte: Autoria própria (2016).

6 CUSTOS DO PROJETO

Os custos do projeto são detalhados na Tabela 6.1. É importante observar que os custos relativos ao transporte entre a marcenaria terceirizada à UTFPR não foram contabilizados pois os próprios alunos o fizeram, assim como a soldagem dos perfis metálicos, a qual foi executada por profissionais da UTFPR com material de consumo da instituição.

Tabela 6.1 – Custos de projeto para construção de Câmara em escala reduzida

Descrição	Categoria	Qtde	Custo	Total
Motor NEMA 300 kgf.cm	Mesa giratória	1	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Chapa padrão MDF	Câmara	2	R\$ 180,00	R\$ 360,00
Cantoneira	Câmara	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Tubo de aço (6000 mm)	Estrutura	1	R\$ 95,00	R\$ 95,00
Rodízio industrial	Estrutura	4	R\$ 18,90	R\$ 75,60
Pacote parafuso M5	Câmara	2	R\$ 22,90	R\$ 45,80
Arduino	Mesa giratória	1	R\$ 45,00	R\$ 45,00
Fita de teflon	Mesa giratória	1	R\$ 44,96	R\$ 44,96
Dobradiça	Câmara	4	R\$ 11,15	R\$ 44,60
Kit jumper	Mesa giratória	2	R\$ 21,00	R\$ 42,00
Corte CNC	Câmara	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Esferas de precisão	Mesa giratória	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Conjunto Parafuso-Porca	Estrutura	1	R\$ 31,11	R\$ 31,11
Acoplamento eixo	Mesa giratória	1	R\$ 29,90	R\$ 29,90
Borracha de vedação	Câmara	1	R\$ 22,50	R\$ 22,50
Cola para madeira	Câmara	1	R\$ 12,90	R\$ 12,90
Massa acrílica	Câmara	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Cola para borracha	Câmara	1	R\$ 9,59	R\$ 9,59
Lixa	Câmara	5	R\$ 1,10	R\$ 5,50
Total				R\$ 2249,56

Uma análise que relaciona o custo de cada subconjunto em comparação ao projeto como um todo é ilustrada através da Figura 6.1. Pode-se concluir que apesar do principal subconjunto do projeto ser a câmara reverberante em escala reduzida, a automação da mesa giratória assume o caráter preponderante sob o ponto de vista de recursos.

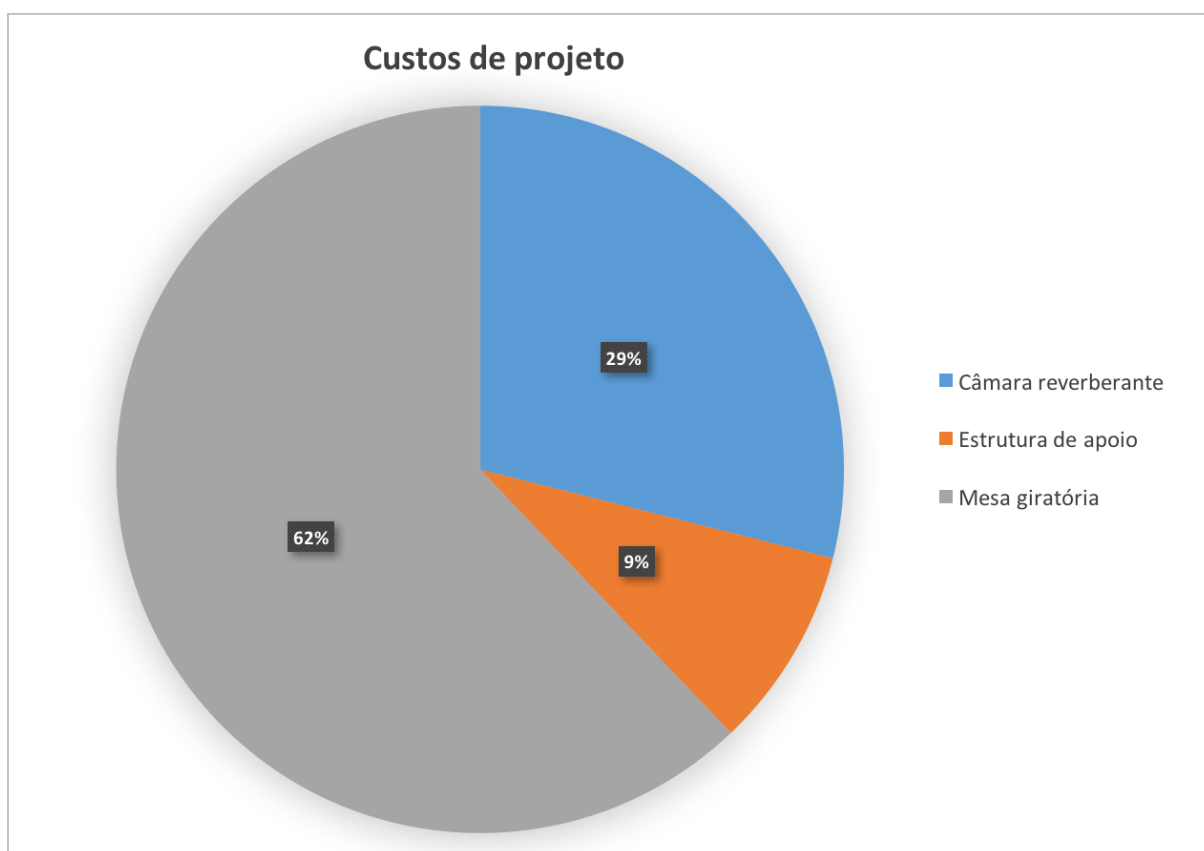


Figura 6.1 – Custos relativos de cada subconjunto.

Fonte: Autoria própria (2016).

7 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o método para avaliação da propriedade acústica que quantifica o espalhamento sonoro de superfícies, o coeficiente de espalhamento acústico. Para avaliação de tal propriedade foi realizada a construção do aparato de medição assim como a comparação com trabalhos realizados anteriormente.

Entende-se que houve o cumprimento dos objetivos propostos. A câmara reverberante em escala reduzida construída através deste trabalho está de acordo com a norma ISO 17497-1 (2004) e está apta a estudos futuros relativos ao coeficiente de espalhamento acústico.

As comparações dos resultados deste trabalho em relação a estudos realizados anteriormente se mostraram satisfatórias mesmo sem a contabilização das incertezas das pesquisas comparadas.

Recomenda-se para trabalhos futuros a implementação de sensores de umidade e temperatura posicionados internamente à câmara e acoplados ao Arduino com o intuito de diminuir as incertezas dos resultados. Além disto, pode-se explorar o design de superfícies complexas através da manufatura aditiva com o intuito de gerar um banco de dados do coeficiente de espalhamento acústico.

Por fim, é importante observar que através deste trabalho abre-se um campo de atuação e intercâmbio de conhecimento para a UTFPR com relação à acústica de salas. Este aparato se torna útil não somente para a avaliação do coeficiente de espalhamento acústico, mas também para análise de outras propriedades e parâmetros acústicos que são avaliados em câmaras reverberantes.

REFERÊNCIAS

- ABNT; INMETRO; SBM. Guia para a expressão da incerteza de medição. **3^a Edição brasileira, Rio de Janeiro, 2003.**
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial.** [S.l.]: Editora Manole, 2008.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** [S.l.]: Edgard Blücher, 2008.
- BRÜEL & KJÆR. **Product Data: OmniPower™ Type 4292-L.** [S.l.], 2016. BP1689.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Physics with arduino for beginners. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 4503–4503, 2011.
- COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application.** [S.l.]: CRC Press, 2009.
- FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004.
- GOMES, M. H. A. **Determination of the acoustical random-incidence scattering coefficient.** Tese (Doutorado) — Federal University of Santa Catarina, 2002.
- GOMES, M. H. A.; TOURINHO, A. M. C.; OLIVEIRA, A. B. S. Replication and first measurements of a reference enclosure to be used in vibro-acoustic studies. **Forum Acusticum Aalborg Denmark**, p. 6, 2011.
- HAK, C.; WENMAEKERS, R.; LUXEMBURG, L. V. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 98, n. 6, p. 907–915, 2012.
- HENRIQUE, L. L. **Acústica musical.** [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- ISO 17497-1. **Acoustics – Sound scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.** [S.l.], 2004.
- ISO 354. **Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room.** [S.l.], 2003.
- LONG, M. **Architectural Acoustics.** 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. de. **Noções de probabilidade e estatística.** [S.l.]: IME-USP, 2000.
- MCROBERTS, M. **Arduino básico.** [S.l.]: Novatec Editora, 2011.
- MULLER, S. E.; MASSARANI, P. M. Medições da resposta em frequência de sistemas de sonorização. 2002.

- NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas -: Uma Abordagem**. [S.l.]: Artmed, 2013.
- SANTOS, C. dos. **Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços: métodos e desenvolvimentos**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- SANTOS, V. P. A. Motor de passo. **Seminário de Iniciação Científica**, 2008.
- TONIDANDEL, D.; ARAÚJO, A. Conectando transformadas: Fourier e laplace. In: **Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, PB**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1, p. 32–36.
- VORLÄNDER, M. International round robin on room acoustical computer simulations. In: **Proceedings of the 15th International Congress of Acoustics**. [S.l.: s.n.], 1995.
- VORLÄNDER, M. et al. Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients. **Acta Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 90, n. 5, p. 858–867, 2004.
- VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 60, n. 2, p. 187–199, 2000.

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DO MOTOR


```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% DIMENSIONAMENTO DO MOTOR DA MESA GIRATORIA %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Estimativa de torque para o motor de passo
```

```
%Densidade do gesso em [kg/m^3]
```

```
d_gesso = 1000;
d_mdf = 650;
```

```
%Volumes estimados [m^3]
```

```
Diam_s = 0.80;
Esp_gesso = 0.05; %Espessura do gesso, maximo 5 cm.
V_s = (pi * Diam_s^2/4) * Esp_gesso; %Volume da amostra.
V_mesa = (pi * Diam_s^2/4) * 0.018; %Volume da mesa.
```

```
%Peso em [kg]
```

```
P_mesa = V_mesa * d_mdf; %Peso da mesa giratoria.
P_s = V_s * d_gesso; %Peso da amostra.
```

```
%Momento de inercia disco solido em [kg.m^2]
```

```
I_s = (V_s*d_gesso)*(Diam_s/2)^2;
```

```
%Aceleracao angular em [rad/s^2]
```

```
alpha = 0.026179939; %Rotacao de 0.25 rpm.
```

```
%Torque necessario devido a inercia em [N.m]
```

```
T_inercia = I_s * alpha;
```

```
%Peso total em [N]
```

```
P_t = (P_mesa + P_s) * 9.81; %Peso da amostra + Peso da mesa.
```

```
%Pressao distribuida em TODO disco em [N/m^2]
```

```
A_contato = pi*Diam_s^2/4;
P_D = P_t/A_contato;
```

```
%Area de contato real em [m^2]
```

```
Parede_apoio = 0.10;
Diam_int = Diam_s - 2 * Parede_apoio;
A_contato_real = (pi/4) * (Diam_s^2-Diam_int^2);
```

```
%Forca distribuida na area de contato em [N]
```

```
F_dist_real = P_D * A_contato_real;
```

```
%Forca de atrito [N]
```

```
Mi = 0.12; %Coeficiente de atrito estatico.
F_at = F_dist_real * Mi; %Hipotese: atrito de deslizamento.
```

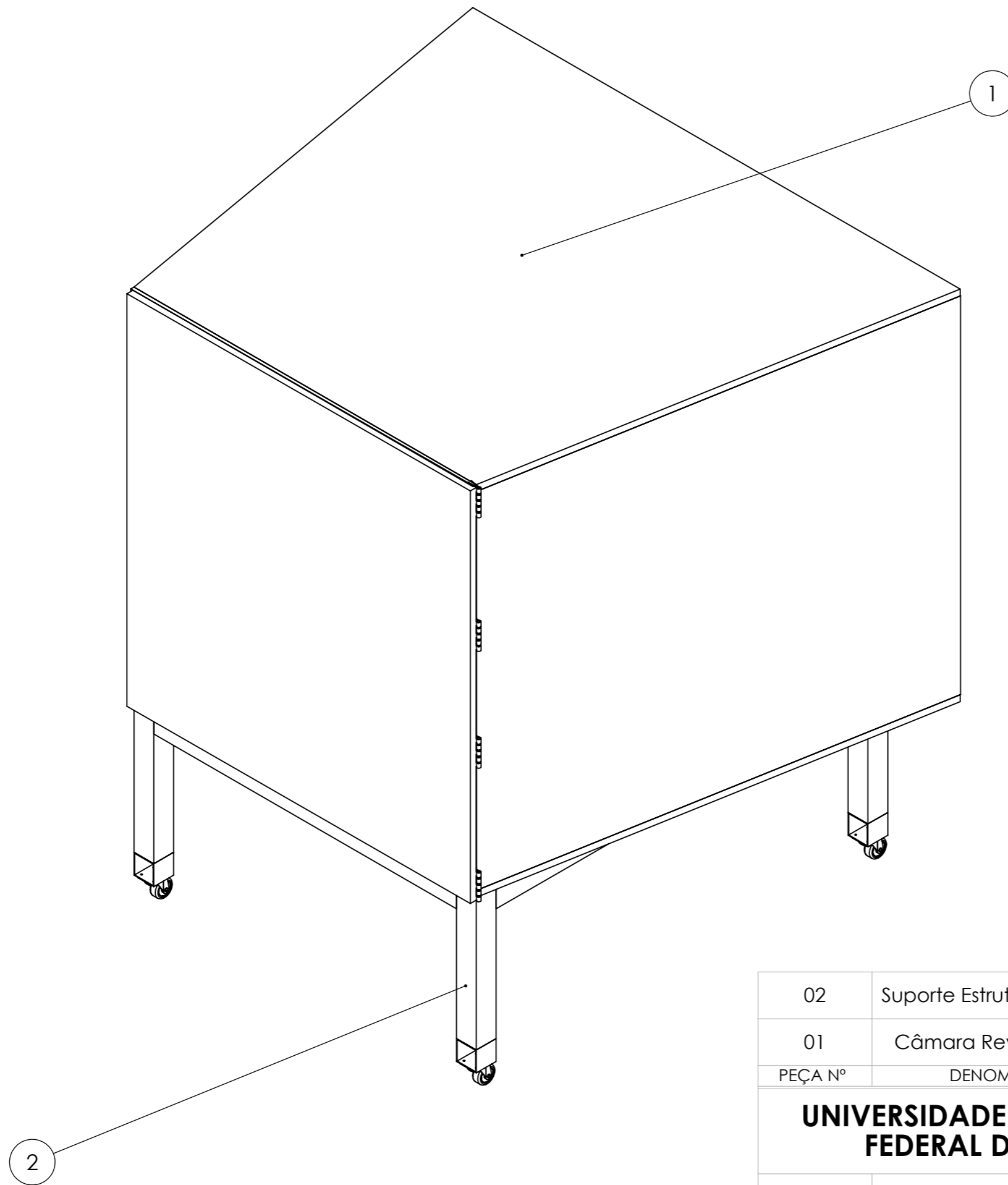
```
%Torque requisitado em [N.m]
```

```
T_req_Nm = (F_at * Diam_s) + T_inercia;
```

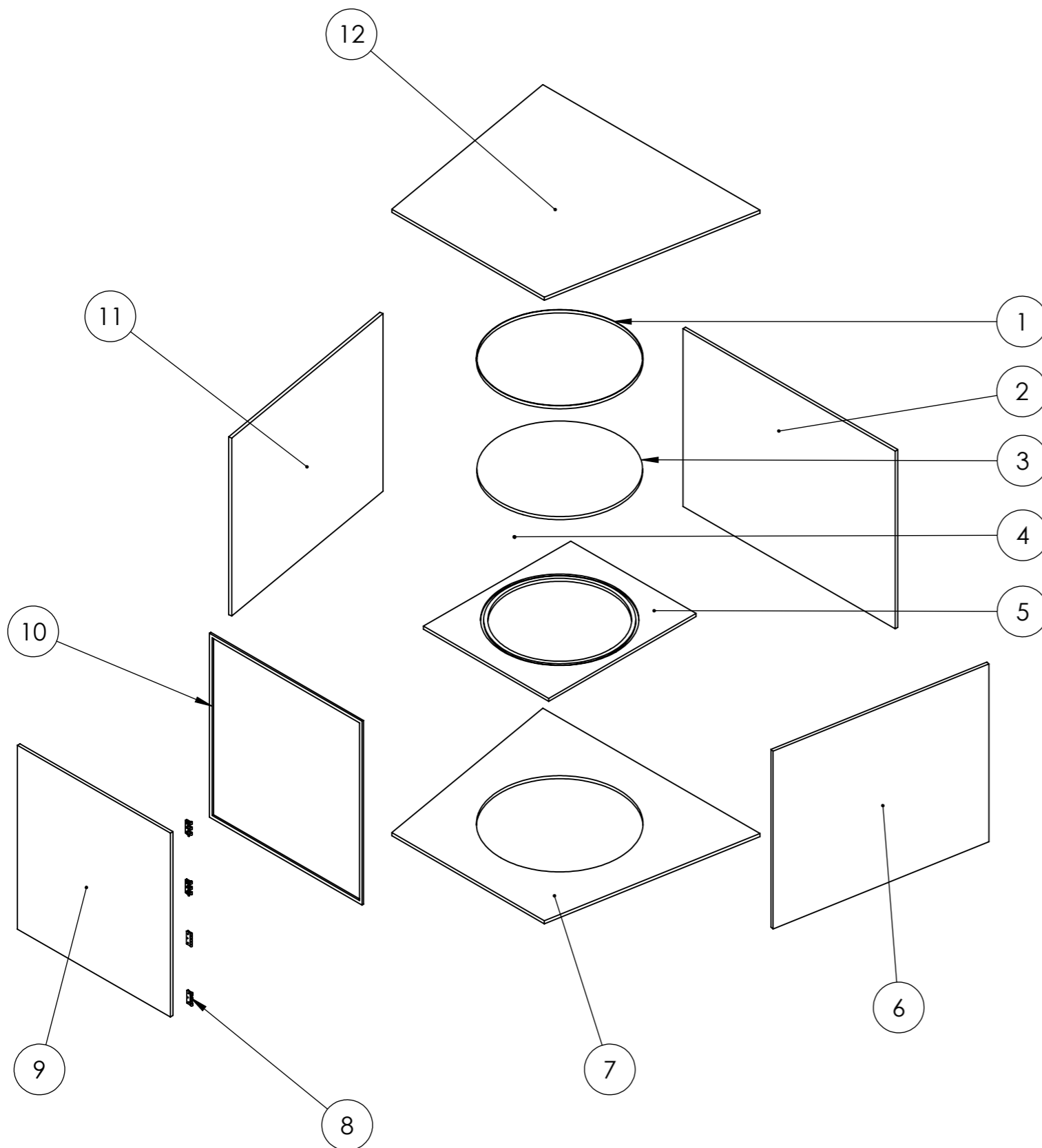
```
%Torque requisitado em [Kgf.cm]
```

```
T_req_Kgfc = T_req_Nm/(9.81*10^-2);
```

APÊNDICE B – VISTAS DE MONTAGEM



02	Suporte Estrutura Metálica	01		
01	Câmara Reverberante	01		
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 15.08.16
			DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1:5	FOLHA
	Aparato de Medição		A3	



12	CR Chapa Superior	01	MDF	
11	CR Chapa Lateral	01	MDF	
10	Perfil de vedação 4 x 19	01	Borracha EPDM	Comercial
09	CR Chapa Frontal	01	MDF	
08	Dobradiça	04	Aço Cromo	Comercial
07	CR Chapa Inferior	01	MDF	
06	CR Chapa Lateral	01	MDF	
05	CR Pista de atrito	01	MDF	
04	Esfera de precisão 1/2"	50	Aço Cromo	Comercial
03	CR Mesa Giratória	01	MDF	
02	CR Chapa Posterior	01	MDF	
01	Fita antiaderente	01	Teflon	Comercial
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA
FEDERAL DO PARANÁ**



CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA

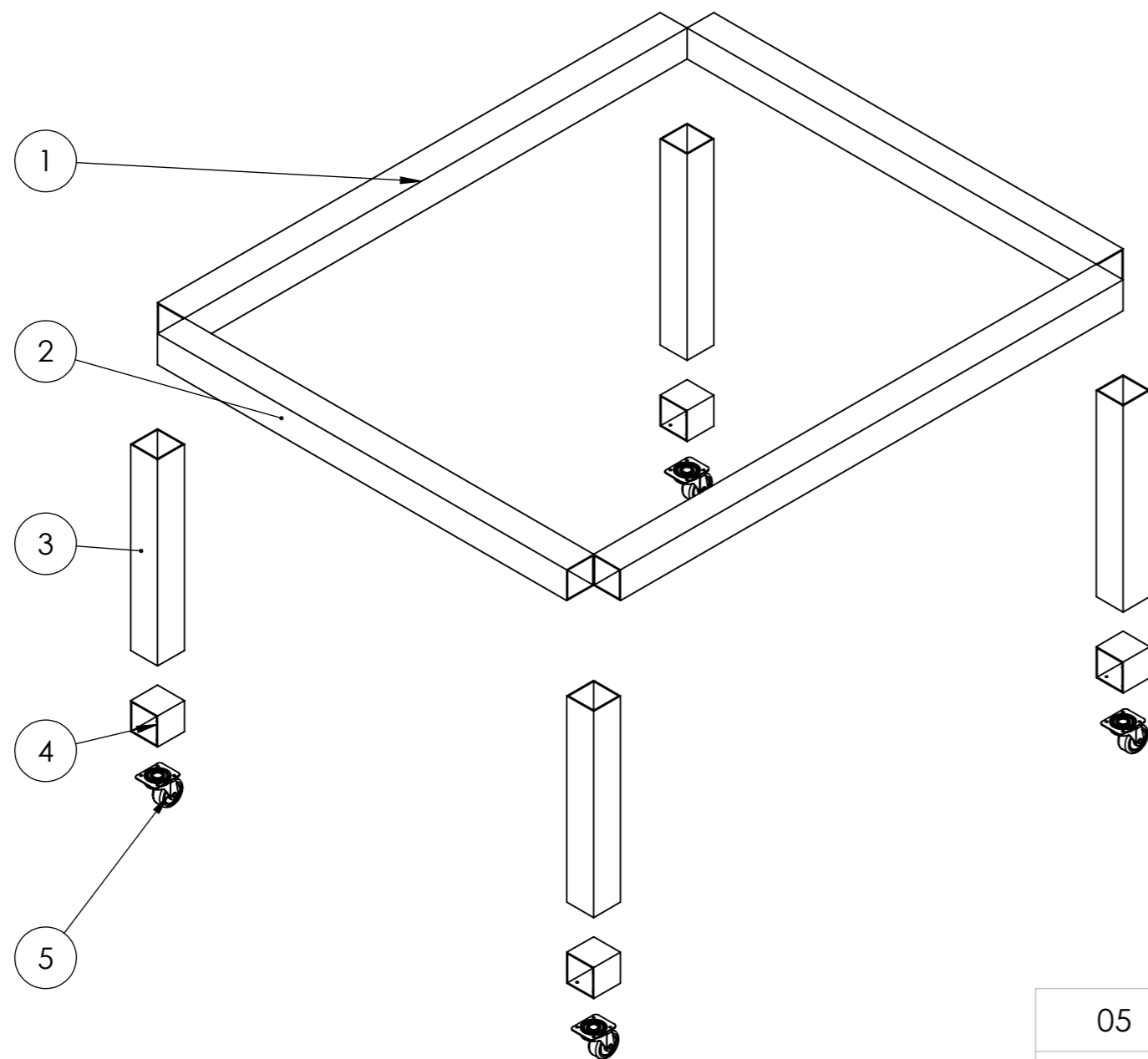
Câmara Reverberante

UNIDADE: mm DATA: 15.08.16
 DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante
 VERIFICADO:
 APROVADO:

ESCALA 1:25 FOLHA

A3





05	Roda 45 mm	04	Poliuretano	Comercial
04	Suporte Roda	04	Aço SAE 1045	
03	Suporte Barra 400	04	Aço SAE 1045	
02	Suporte Barra 916	02	Aço SAE 1045	
01	Suporte Barra 1125	02	Aço SAE 1045	
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA
FEDERAL DO PARANÁ**

UNIDADE: mm DATA: 11.08.16
 DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante
 VERIFICADO:
 APROVADO:



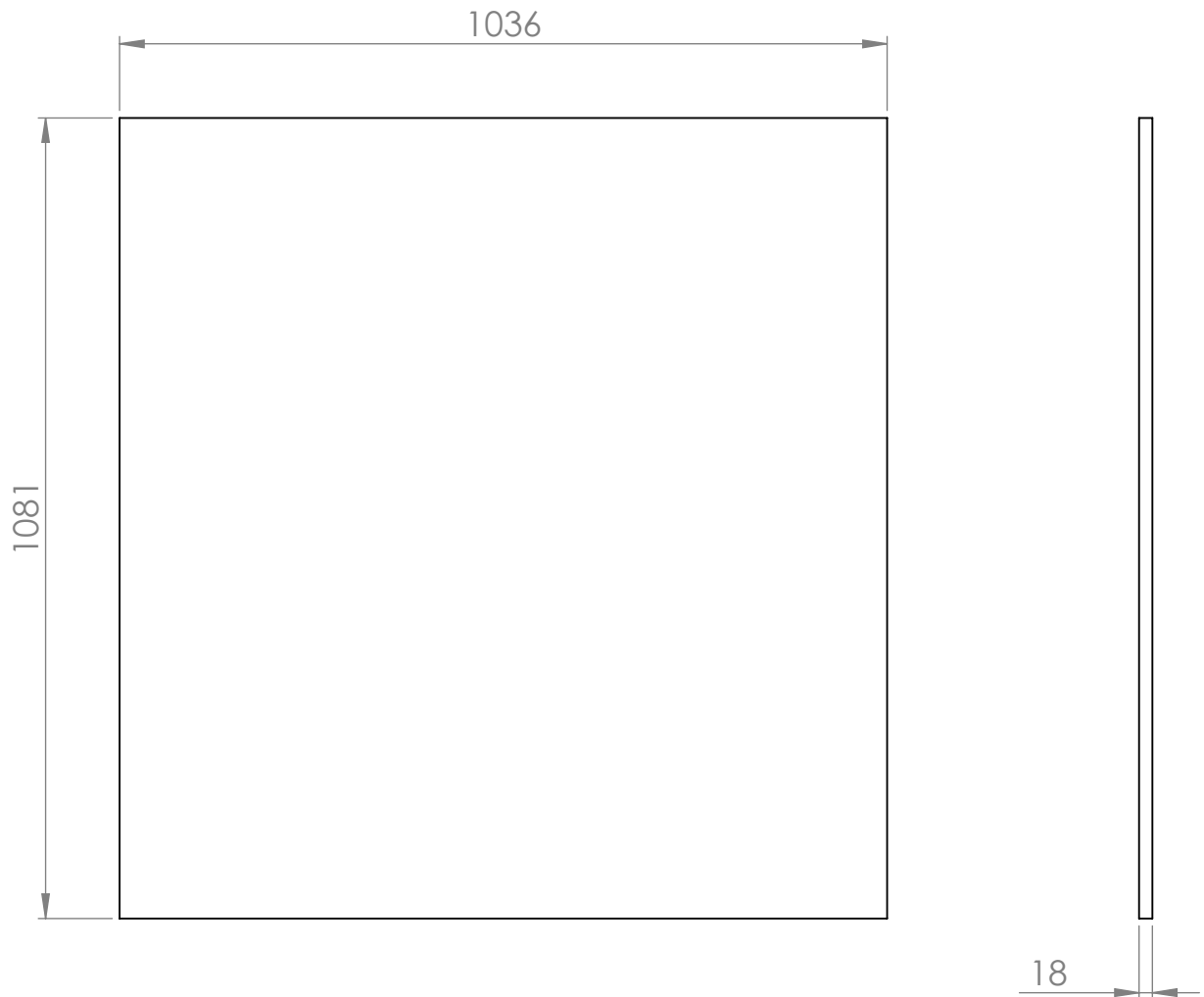
CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA
 Subconjunto Estrutura Metálica

ESCALA 1:10 FOLHA

A3

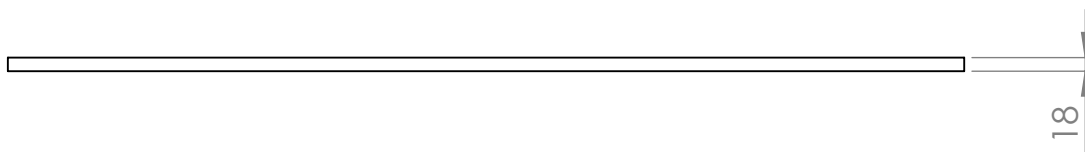
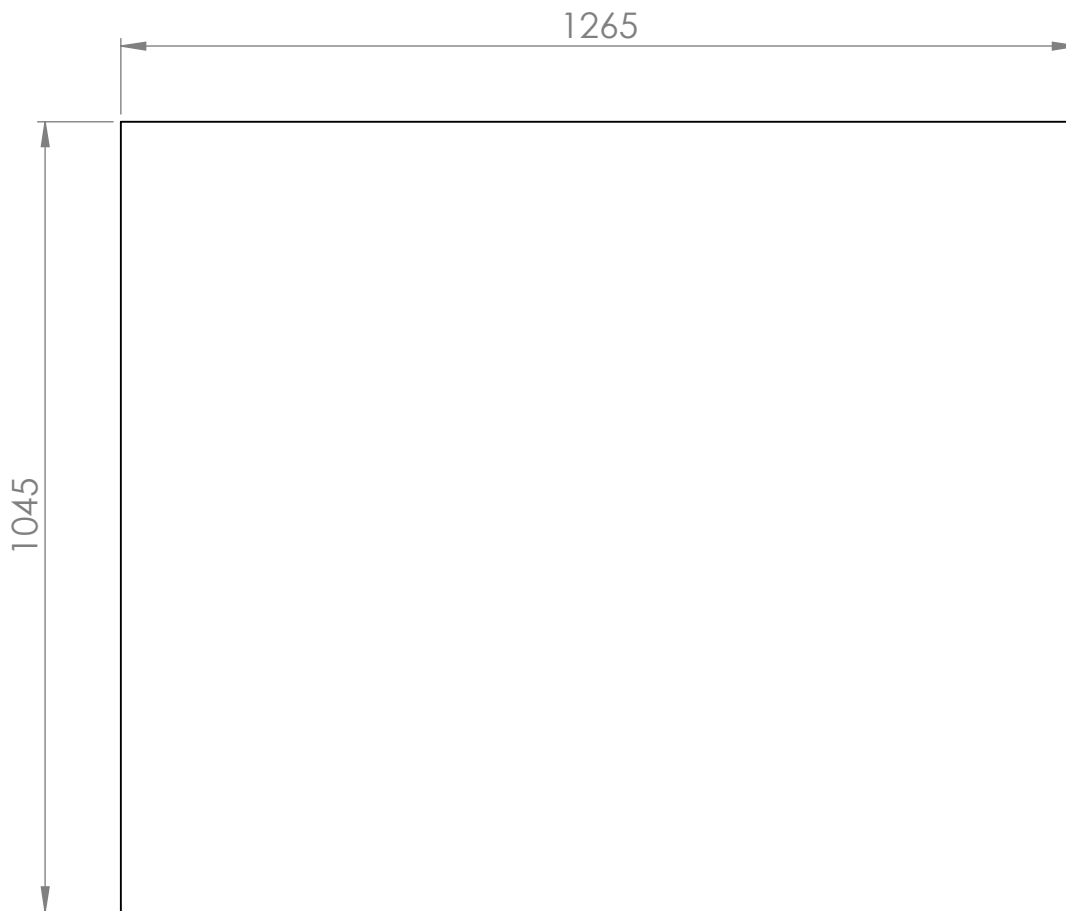


APÊNDICE C – DESENHOS DE FABRICAÇÃO



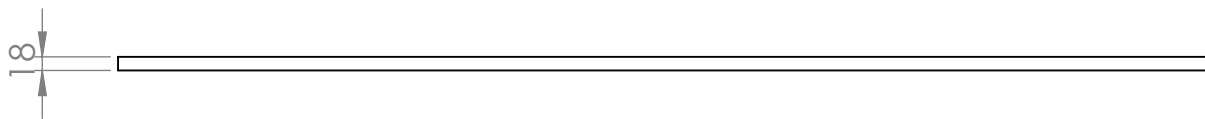
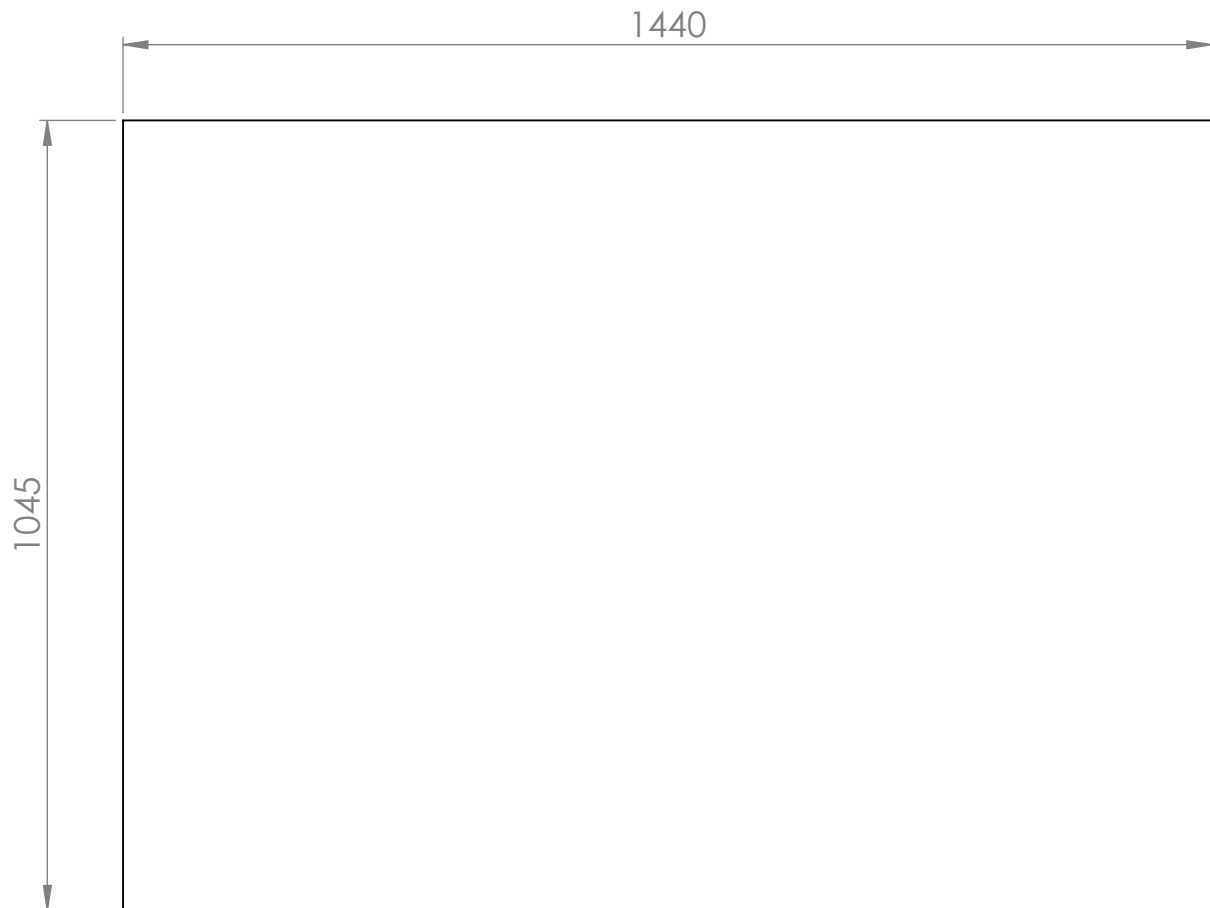
Tolerância Geral: 1 mm

01	Chapa Frontal	1	MDF	Pintado
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 10.04.2016
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA	ESCALA 1 : 10	FOLHA	
	CR Chapa Frontal	A4		


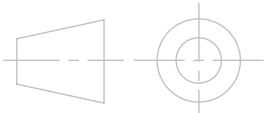


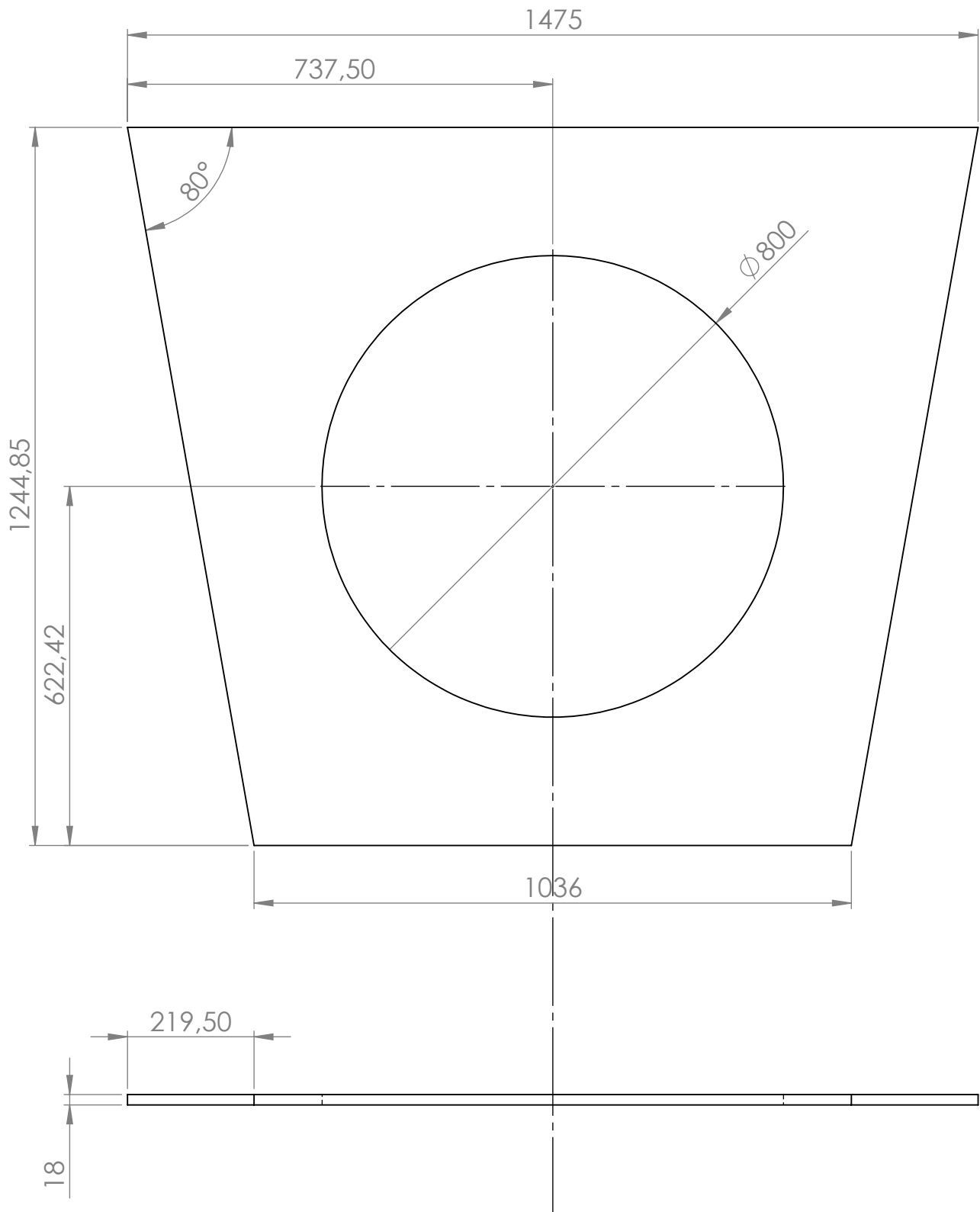
Tolerância Geral: 1 mm

03	Chapa Lateral	2	MDF	Pintado
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 10.04.2016
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA	ESCALA 1 : 10	FOLHA	
	CR Chapas Laterais	A4		



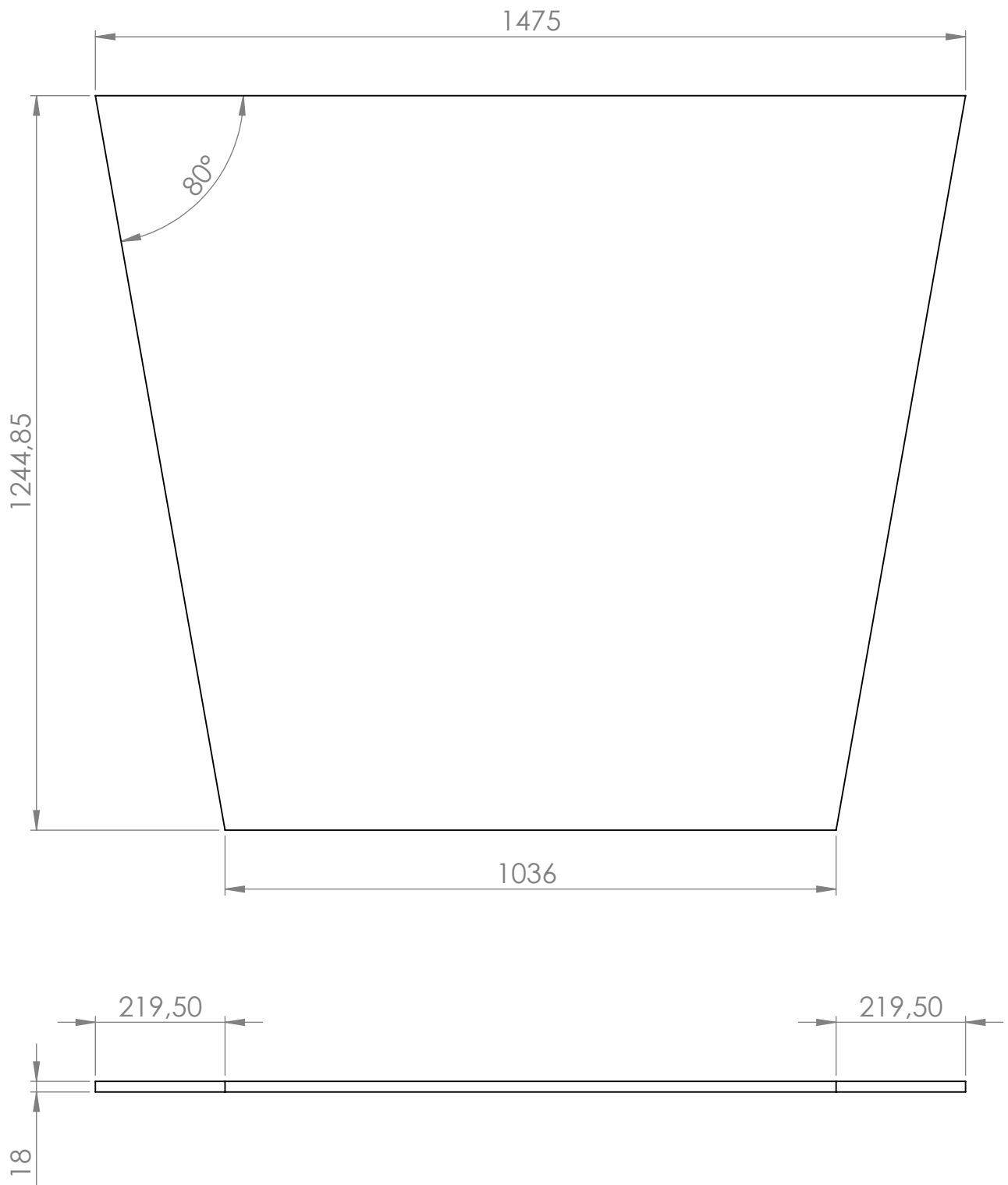
Tolerância Geral: 1 mm

04	Chapa Posterior	1	MDF	Pintado
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 10.04.2016
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1:10	FOLHA
	CR Chapa Posterior		A4	
				



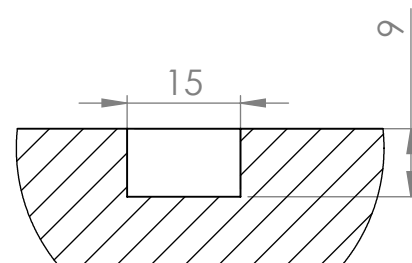
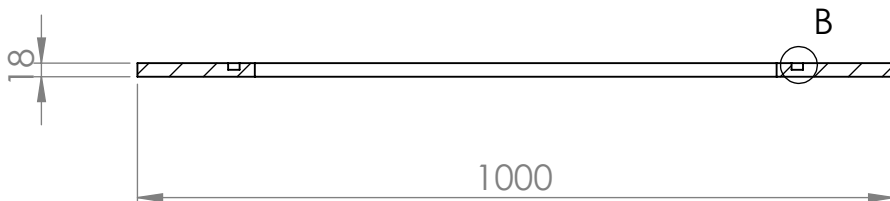
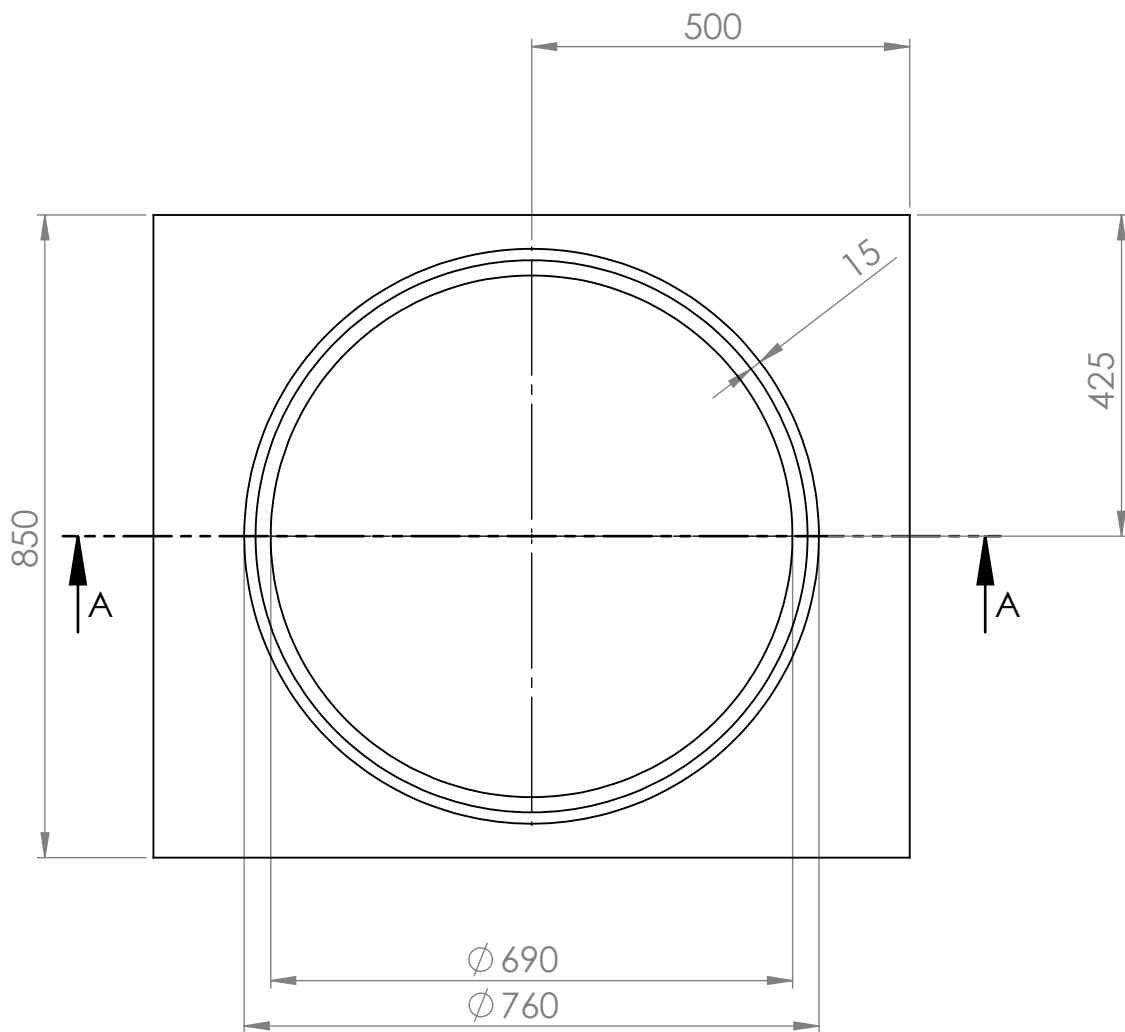
Tolerância Geral: 1 mm

02	Chapa Inferior	1	MDF	Pintado
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 10.04.2016
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1 : 10	FOLHA
	CR Chapa Inferior		A4	



Tolerância Geral: 1 mm

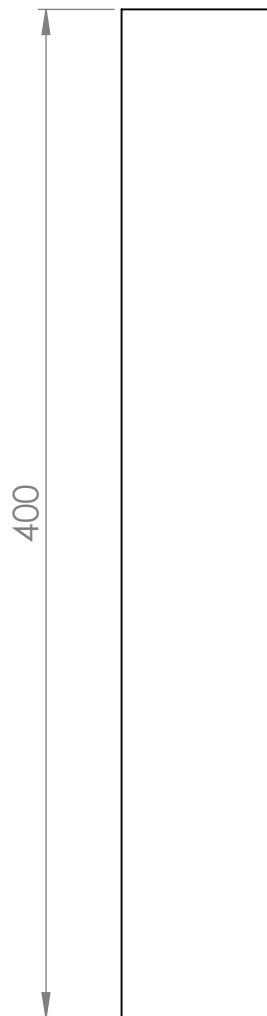
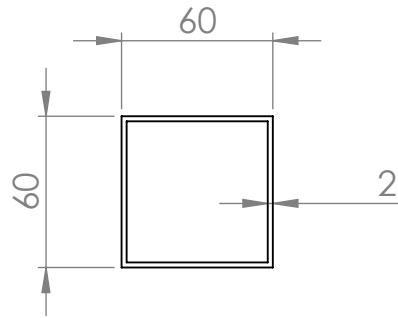
05	Chapa Superior	1	MDF	Pintado
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 10.04.2016
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1 : 10	FOLHA
	CR Chapa Superior		A4	




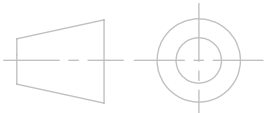
DETALHE B
ESCALA 1 : 1

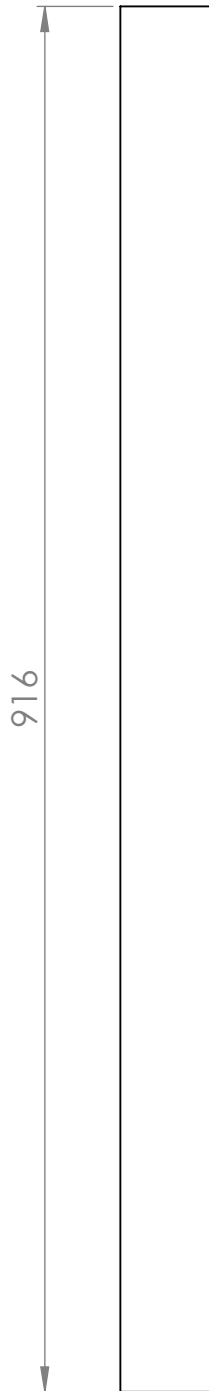
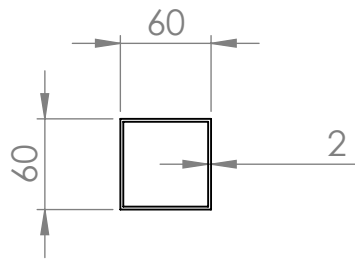
Tolerância Geral: 1 mm

06	CR Pista de atrito	01	MDF		
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 25.07.2016	
			DESENHADO: Ian M. Cavalcante		
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			VERIFICADO:		
			APROVADO:		
UTFPR <small>UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ</small>	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1 : 10	FOLHA	
	CR Pista de atrito		A4		


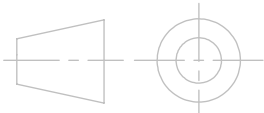


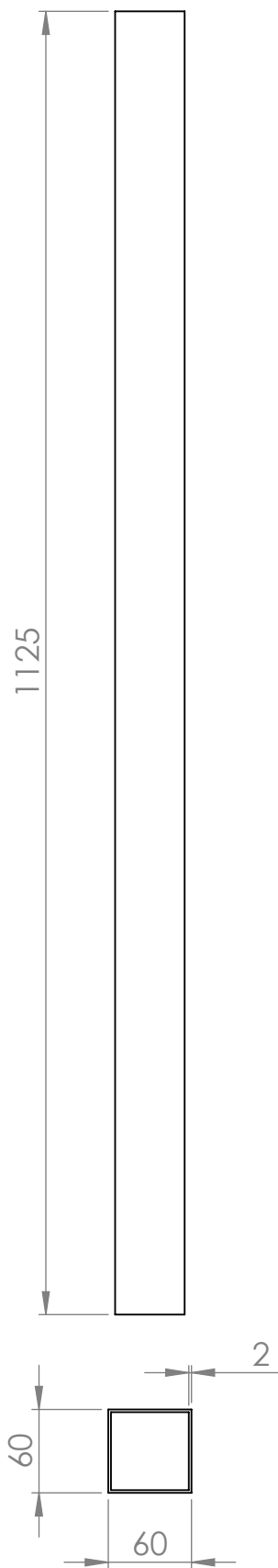
Tolerância Geral: 1 mm

07	Suporte Barra 400	02	Aço SAE 1045	
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 11.08.16
			DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA	ESCALA 1 : 3	FOLHA	
	Suporte Barra 400	A4		


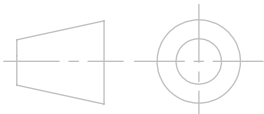


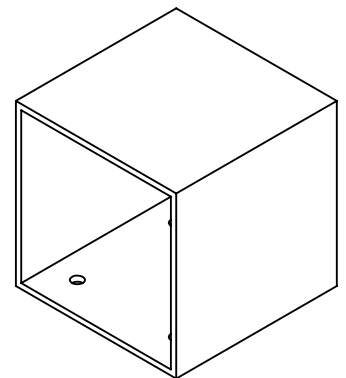
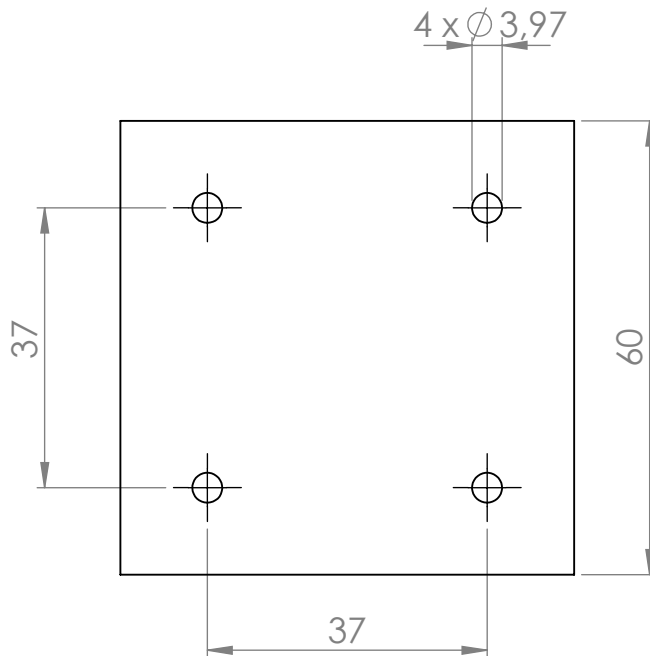
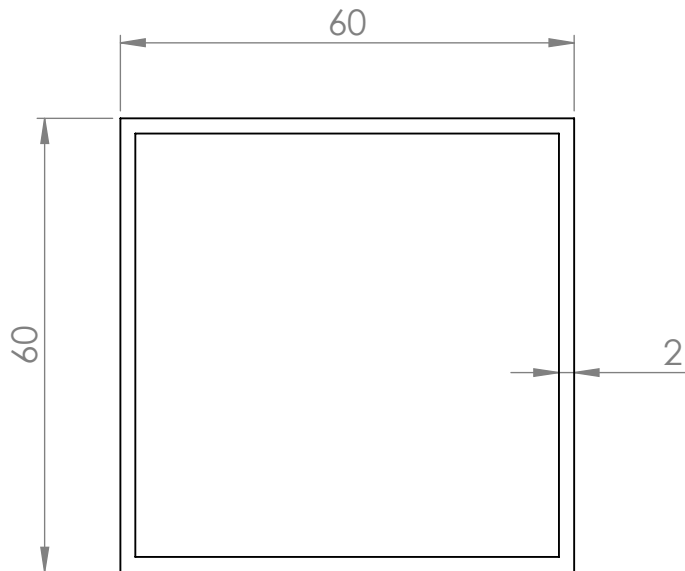
Tolerância Geral: 1 mm

08	Suporte Barra 916	02	Aço SAE 1045	
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 11.08.16
			DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA	ESCALA 1 : 5	FOLHA	
	Suporte Barra 916	A4		


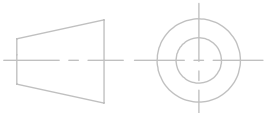


Tolerância Geral: 1 mm

09	Suporte Barra 1125	02	Aço SAE 1045	
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 11.08.16
			DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA	ESCALA 1 : 6	FOLHA	
	Suporte Barra 1125	A4		



Tolerância Geral: 1 mm

10	Suporte da roda	04	Aço SAE 1045	
PEÇA N°	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE: mm	DATA: 11.08.16
			DESENHADO: Ian Moreira Cavalcante	
			VERIFICADO:	
			APROVADO:	
	CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA		ESCALA 1 : 1	FOLHA
	Suporte da roda		A4	
				

APÊNDICE D – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Tabela D.1: Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa parada (T_1).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_1	δ_1
500	NaN	NaN	1.877	1.620	1.627	1.548	1.668	0.0035
630	1.653	NaN	1.715	NaN	1.971	1.708	1.761	0.0035
800	NaN	NaN	1.430	1.560	1.606	1.507	1.526	0.0019
1000	NaN	1.503	1.542	1.402	1.489	1.368	1.461	0.0020
1250	1.199	1.111	1.214	1.032	0.995	1.071	1.104	0.0024
1600	0.646	0.759	0.631	0.612	0.687	0.706	0.674	0.0015
2000	0.597	0.670	0.672	0.554	0.630	0.562	0.614	0.0014
2500	0.774	0.798	0.727	0.730	0.719	0.756	0.751	0.0008
3150	0.821	0.809	0.809	0.829	0.846	0.792	0.818	0.0005
4000	0.809	0.796	0.795	0.789	0.783	0.807	0.797	0.0003
5000	0.790	0.746	0.782	0.784	0.796	0.789	0.781	0.0004
6350	0.743	0.704	0.691	0.705	0.709	0.721	0.712	0.0004
8000	0.596	0.619	0.634	0.619	0.627	0.665	0.627	0.0005
10000	0.528	0.530	0.557	0.546	0.518	0.543	0.537	0.0004
12500	0.380	0.390	0.380	0.396	0.395	0.393	0.389	0.0002
16000	0.325	0.326	0.319	0.317	0.341	0.328	0.326	0.0002
20000	0.156	0.136	0.146	0.178	0.163	0.145	0.154	0.0004

Tabela D.2: Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa rotacionando (T_3).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_3	δ_3
500	1.464	1.667	1.637	1.924	NaN	NaN	1.673	0.0042
630	1.743	2.061	NaN	1.795	NaN	1.577	1.794	0.0045
800	1.544	1.578	1.614	1.341	NaN	1.440	1.503	0.0030
1000	1.365	1.472	1.372	1.483	1.445	1.333	1.412	0.0018
1250	1.053	0.984	1.034	1.130	1.196	1.204	1.100	0.0026
1600	0.688	0.656	0.618	0.610	0.730	0.711	0.669	0.0014
2000	0.566	0.612	0.541	0.617	0.666	0.618	0.603	0.0011
2500	0.743	0.727	0.768	0.758	0.733	0.757	0.748	0.0004
3150	0.790	0.832	0.823	0.793	0.771	0.832	0.807	0.0007
4000	0.790	0.776	0.789	0.754	0.742	0.779	0.772	0.0005
5000	0.766	0.777	0.767	0.777	0.714	0.758	0.760	0.0005
6350	0.716	0.696	0.719	0.719	0.712	0.706	0.711	0.0002
8000	0.660	0.618	0.615	0.615	0.628	0.612	0.625	0.0004
10000	0.540	0.513	0.510	0.509	0.537	0.512	0.520	0.0004
12500	0.391	0.383	0.378	0.391	0.378	0.370	0.382	0.0002
16000	0.325	0.336	0.326	0.333	0.328	0.302	0.325	0.0003
20000	0.137	0.167	0.155	0.147	0.156	0.160	0.154	0.0003

Tabela D.3: Coeficiente de espalhamento da mesa giratória.

Frequência	T₁	T₃	S_{base}	Espalhamento máximo ISO 17497-1
500	1.668	1.673	-0.001	0.050
630	1.761	1.794	-0.005	0.050
800	1.526	1.503	0.005	0.050
1000	1.461	1.412	0.011	0.050
1250	1.104	1.100	0.001	0.050
1600	0.674	0.669	0.005	0.050
2000	0.614	0.603	0.014	0.050
2500	0.751	0.748	0.003	0.050
3150	0.818	0.807	0.008	0.100
4000	0.797	0.772	0.019	0.100
5000	0.781	0.760	0.017	0.100
6350	0.712	0.711	0.001	0.150
8000	0.627	0.625	0.002	0.150
10000	0.537	0.520	0.028	0.150
12500	0.389	0.382	0.023	0.200
16000	0.326	0.325	0.005	0.200
20000	0.154	0.154	0.005	0.200

Tabela D.4: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 6% de densidade de preenchimento e mesa parada (T_2).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_2	δ_2
500	NaN	NaN	NaN	NaN	1.900	1.490	1.695	0.0068
630	NaN	NaN	1.820	1.680	1.866	1.643	1.752	0.0030
800	NaN	1.486	1.515	1.603	NaN	1.718	1.581	0.0027
1000	1.579	1.247	1.510	1.370	1.552	1.322	1.430	0.0039
1250	1.211	1.154	1.074	1.108	1.165	1.077	1.132	0.0015
1600	0.809	0.779	0.720	0.671	0.748	0.666	0.732	0.0016
2000	0.740	0.641	0.607	0.665	0.681	0.702	0.673	0.0012
2500	0.772	0.794	0.756	0.738	0.729	0.771	0.760	0.0006
3150	0.887	0.782	0.868	0.819	0.795	0.751	0.817	0.0014
4000	0.797	0.785	0.804	0.771	0.817	0.885	0.810	0.0009
5000	0.747	0.779	0.796	0.753	0.769	0.803	0.774	0.0006
6350	0.685	0.725	0.732	0.710	0.762	0.735	0.725	0.0006
8000	0.635	0.630	0.618	0.621	0.616	0.645	0.627	0.0003
10000	0.562	0.530	0.544	0.542	0.542	0.531	0.542	0.0003
12500	0.387	0.396	0.420	0.393	0.379	0.386	0.393	0.0003
16000	0.323	0.320	0.341	0.338	0.325	0.322	0.328	0.0002
20000	0.171	0.138	0.173	0.158	0.173	0.143	0.159	0.0004

Tabela D.5: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 6% de densidade de preenchimento e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_4	δ_4
500	NaN	NaN	1.439	NaN	NaN	NaN	1.439	0.0000
630	1.697	NaN	1.597	NaN	1.776	NaN	1.690	0.0021
800	1.702	1.448	1.537	1.412	1.578	NaN	1.536	0.0028
1000	1.504	1.316	1.312	1.317	1.529	1.556	1.422	0.0036
1250	1.074	1.023	1.025	1.111	1.087	1.139	1.076	0.0012
1600	0.746	0.643	0.600	0.673	0.666	0.715	0.674	0.0013
2000	0.626	0.582	0.629	0.613	0.614	0.661	0.621	0.0006
2500	0.758	0.704	0.714	0.700	0.707	0.688	0.712	0.0005
3150	0.773	0.733	0.726	0.693	0.708	0.794	0.738	0.0010
4000	0.697	0.659	0.683	0.689	0.726	0.659	0.686	0.0006
5000	0.641	0.643	0.664	0.633	0.652	0.655	0.648	0.0003
6350	0.602	0.575	0.581	0.575	0.595	0.562	0.581	0.0004
8000	0.537	0.524	0.521	0.520	0.512	0.520	0.522	0.0002
10000	0.482	0.465	0.437	0.437	0.454	0.450	0.454	0.0004
12500	0.360	0.352	0.350	0.345	0.339	0.362	0.352	0.0002
16000	0.313	0.300	0.320	0.288	0.277	0.301	0.300	0.0004
20000	0.154	0.157	0.150	0.136	0.169	0.166	0.155	0.0003

Tabela D.6: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 13% de densidade de preenchimento e mesa parada (T_2).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_2	δ_2
500	NaN	NaN	NaN	1.439	NaN	NaN	1.439	0.0000
630	NaN	NaN	NaN	1.490	1.868	NaN	1.679	0.0063
800	NaN	NaN	1.450	1.694	1.712	1.520	1.594	0.0036
1000	1.328	1.505	1.439	1.387	1.523	1.312	1.416	0.0024
1250	1.185	1.233	1.036	1.065	1.106	1.145	1.128	0.0020
1600	0.802	0.902	0.706	0.628	0.761	0.654	0.742	0.0027
2000	0.656	0.719	0.676	0.655	0.622	0.629	0.660	0.0008
2500	0.700	0.885	0.763	0.816	0.804	0.698	0.778	0.0019
3150	0.825	0.866	0.803	0.776	0.826	0.815	0.818	0.0007
4000	0.803	0.809	0.805	0.782	0.796	0.800	0.799	0.0002
5000	0.760	0.743	0.757	0.767	0.751	0.758	0.756	0.0002
6350	0.682	0.681	0.656	0.717	0.689	0.675	0.683	0.0004
8000	0.596	0.613	0.582	0.591	0.630	0.583	0.599	0.0005
10000	0.534	0.515	0.523	0.497	0.522	0.516	0.518	0.0003
12500	0.393	0.352	0.361	0.359	0.364	0.384	0.369	0.0004
16000	0.318	0.314	0.306	0.319	0.316	0.309	0.314	0.0001
20000	0.166	0.186	0.155	0.143	0.166	0.163	0.163	0.0003

Tabela D.7: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 13% de densidade de preenchimento e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_4	δ_4
500	1.747	1.570	NaN	NaN	NaN	NaN	1.659	0.0030
630	NaN	1.785	1.784	1.794	NaN	NaN	1.788	0.0001
800	1.433	1.413	1.339	1.541	NaN	NaN	1.432	0.0018
1000	1.333	1.237	1.279	1.446	1.405	1.296	1.333	0.0021
1250	1.023	1.008	1.036	1.087	1.182	1.127	1.077	0.0018
1600	0.739	0.680	0.673	0.710	0.763	0.747	0.719	0.0010
2000	0.614	0.605	0.552	0.592	0.655	0.636	0.609	0.0009
2500	0.624	0.649	0.624	0.668	0.689	0.596	0.642	0.0009
3150	0.614	0.691	0.646	0.641	0.648	0.664	0.650	0.0006
4000	0.610	0.583	0.617	0.550	0.620	0.580	0.593	0.0007
5000	0.537	0.547	0.541	0.574	0.578	0.540	0.553	0.0005
6350	0.527	0.489	0.480	0.473	0.496	0.520	0.497	0.0006
8000	0.445	0.438	0.407	0.441	0.442	0.442	0.436	0.0003
10000	0.378	0.393	0.376	0.395	0.419	0.383	0.391	0.0004
12500	0.322	0.330	0.290	0.303	0.320	0.318	0.314	0.0004
16000	0.263	0.283	0.268	0.280	0.281	0.283	0.276	0.0002
20000	0.170	0.154	0.152	0.159	0.153	0.157	0.158	0.0002

Tabela D.8: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 25% de densidade de preenchimento e mesa parada (T_2).

Frequência	F _{1P1}	F _{1P2}	F _{1P3}	F _{2P1}	F _{2P2}	F _{2P3}	T ₂	δ ₂
500	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
630	1.725	NaN	NaN	1.706	1.517	1.631	1.645	0.0024
800	1.489	1.602	1.435	1.559	1.330	1.615	1.505	0.0029
1000	1.456	1.449	1.305	1.503	1.412	1.330	1.409	0.0020
1250	1.039	1.161	1.047	0.989	1.079	1.137	1.075	0.0017
1600	0.647	0.788	0.713	0.693	0.645	0.707	0.699	0.0012
2000	0.634	0.638	0.657	0.616	0.576	0.604	0.621	0.0007
2500	0.719	0.696	0.710	0.762	0.699	0.714	0.717	0.0005
3150	0.851	0.848	0.830	0.821	0.815	0.846	0.835	0.0004
4000	0.798	0.799	0.786	0.797	0.746	0.769	0.782	0.0005
5000	0.755	0.748	0.699	0.777	0.755	0.738	0.746	0.0006
6350	0.735	0.690	0.697	0.693	0.690	0.686	0.698	0.0004
8000	0.595	0.623	0.609	0.608	0.598	0.585	0.603	0.0003
10000	0.538	0.505	0.512	0.507	0.471	0.511	0.507	0.0004
12500	0.381	0.382	0.355	0.378	0.368	0.359	0.371	0.0003
16000	0.307	0.310	0.322	0.322	0.325	0.317	0.317	0.0002
20000	0.153	0.140	0.164	0.156	0.154	0.161	0.155	0.0002

Tabela D.9: Tempos de reverberação da amostra de gesso com 25% de densidade de preenchimento e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F _{1P1}	F _{1P2}	F _{1P3}	F _{2P1}	F _{2P2}	F _{2P3}	T ₄	δ ₄
500	NaN	1.382	NaN	NaN	NaN	NaN	1.382	0.0000
630	1.618	1.524	1.576	1.720	NaN	1.587	1.605	0.0017
800	1.592	1.602	1.558	1.497	NaN	1.368	1.523	0.0024
1000	1.316	1.386	1.335	1.470	1.318	1.367	1.365	0.0014
1250	1.130	1.018	1.065	1.110	1.036	1.132	1.082	0.0014
1600	0.716	0.609	0.562	0.639	0.637	0.632	0.632	0.0010
2000	0.587	0.562	0.536	0.547	0.585	0.591	0.568	0.0007
2500	0.683	0.686	0.640	0.622	0.628	0.606	0.644	0.0009
3150	0.591	0.577	0.582	0.613	0.610	0.603	0.596	0.0004
4000	0.519	0.518	0.571	0.527	0.504	0.545	0.531	0.0006
5000	0.469	0.490	0.445	0.470	0.419	0.499	0.466	0.0007
6350	0.449	0.447	0.411	0.443	0.466	0.402	0.437	0.0007
8000	0.409	0.377	0.378	0.419	0.408	0.394	0.397	0.0005
10000	0.375	0.352	0.383	0.356	0.363	0.338	0.361	0.0004
12500	0.295	0.285	0.291	0.282	0.312	0.297	0.294	0.0003
16000	0.269	0.260	0.258	0.254	0.263	0.256	0.260	0.0001
20000	0.129	0.135	0.144	0.146	0.139	0.145	0.140	0.0002

Tabela D.10: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 10 milímetros e mesa parada (T_2).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_2	δ_2
500	1.295	NaN	1.520	NaN	NaN	NaN	1.407	0.0038
630	1.431	NaN	1.412	1.619	NaN	NaN	1.487	0.0029
800	1.503	1.478	1.361	1.301	1.379	1.375	1.399	0.0020
1000	1.146	1.240	1.157	1.339	1.326	1.105	1.219	0.0028
1250	0.872	1.023	0.898	1.002	0.945	0.960	0.950	0.0015
1600	0.644	0.608	0.645	0.551	0.606	0.642	0.616	0.0009
2000	0.510	0.555	0.493	0.521	0.528	0.530	0.523	0.0005
2500	0.543	0.558	0.621	0.571	0.584	0.574	0.575	0.0006
3150	0.554	0.581	0.555	0.583	0.571	0.581	0.571	0.0004
4000	0.578	0.582	0.573	0.580	0.567	0.540	0.570	0.0004
5000	0.591	0.597	0.569	0.578	0.582	0.578	0.583	0.0003
6350	0.577	0.560	0.563	0.572	0.568	0.548	0.565	0.0003
8000	0.502	0.497	0.493	0.493	0.490	0.505	0.497	0.0002
10000	0.453	0.471	0.448	0.451	0.439	0.453	0.452	0.0002
12500	0.350	0.349	0.319	0.351	0.366	0.349	0.347	0.0003
16000	0.309	0.303	0.296	0.289	0.293	0.310	0.300	0.0002
20000	0.168	0.166	0.151	0.166	0.143	0.141	0.156	0.0004

Tabela D.11: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 10 milímetros e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_4	δ_4
500	1.356	NaN	1.433	NaN	NaN	NaN	1.394	0.0013
630	1.353	NaN	1.229	NaN	NaN	NaN	1.291	0.0021
800	1.308	1.216	1.339	1.292	1.267	1.225	1.274	0.0013
1000	1.144	1.067	1.143	1.062	1.043	0.990	1.075	0.0015
1250	0.909	0.896	0.933	0.966	0.825	0.862	0.898	0.0012
1600	0.551	0.529	0.537	0.527	0.555	0.530	0.538	0.0003
2000	0.494	0.441	0.470	0.484	0.455	0.486	0.472	0.0005
2500	0.505	0.473	0.526	0.499	0.451	0.492	0.491	0.0006
3150	0.503	0.507	0.460	0.486	0.511	0.481	0.491	0.0005
4000	0.432	0.424	0.453	0.436	0.446	0.465	0.443	0.0004
5000	0.441	0.430	0.462	0.474	0.421	0.453	0.447	0.0005
6350	0.410	0.429	0.416	0.407	0.413	0.437	0.419	0.0003
8000	0.402	0.398	0.405	0.387	0.378	0.400	0.395	0.0003
10000	0.366	0.360	0.352	0.353	0.339	0.378	0.358	0.0003
12500	0.290	0.284	0.262	0.291	0.293	0.263	0.281	0.0004
16000	0.251	0.246	0.225	0.241	0.247	0.223	0.239	0.0003
20000	0.153	0.159	0.148	0.155	0.158	0.149	0.154	0.0001

Tabela D.12: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 20 milímetros e mesa parada (T_2).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_2	δ_2
500	1.555	NaN	NaN	1.352	NaN	1.258	1.389	0.0037
630	1.545	NaN	1.606	1.546	NaN	1.186	1.471	0.0047
800	1.238	1.451	1.440	1.445	1.437	1.329	1.390	0.0024
1000	1.167	1.121	1.220	1.148	1.285	1.313	1.209	0.0021
1250	0.968	0.939	0.916	0.895	0.910	0.972	0.933	0.0009
1600	0.598	0.657	0.592	0.531	0.633	0.630	0.607	0.0011
2000	0.520	0.560	0.514	0.594	0.499	0.554	0.540	0.0010
2500	0.633	0.634	0.586	0.633	0.639	0.642	0.628	0.0005
3150	0.645	0.685	0.671	0.655	0.643	0.691	0.665	0.0006
4000	0.633	0.683	0.678	0.645	0.660	0.676	0.663	0.0006
5000	0.675	0.654	0.641	0.658	0.632	0.623	0.647	0.0005
6350	0.567	0.593	0.581	0.548	0.586	0.560	0.573	0.0005
8000	0.518	0.517	0.512	0.513	0.524	0.530	0.519	0.0002
10000	0.457	0.448	0.442	0.443	0.457	0.450	0.450	0.0002
12500	0.351	0.361	0.357	0.351	0.354	0.378	0.359	0.0002
16000	0.284	0.299	0.302	0.294	0.301	0.308	0.298	0.0002
20000	0.153	0.187	0.142	0.150	0.158	0.159	0.158	0.0003

Tabela D.13: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 20 milímetros e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F_1P_1	F_1P_2	F_1P_3	F_2P_1	F_2P_2	F_2P_3	T_4	δ_4
500	1.466	NaN	NaN	NaN	NaN	1.568	1.517	0.0017
630	NaN	1.463	NaN	NaN	NaN	1.327	1.395	0.0023
800	1.400	1.333	1.212	1.250	1.307	1.196	1.283	0.0021
1000	1.113	1.247	1.072	1.023	1.087	1.181	1.121	0.0021
1250	0.889	0.812	0.910	0.843	0.897	0.797	0.858	0.0014
1600	0.554	0.544	0.521	0.557	0.555	0.554	0.548	0.0003
2000	0.453	0.457	0.492	0.497	0.510	0.425	0.472	0.0009
2500	0.509	0.465	0.526	0.494	0.521	0.505	0.503	0.0005
3150	0.536	0.503	0.518	0.572	0.485	0.528	0.524	0.0007
4000	0.461	0.474	0.466	0.491	0.493	0.499	0.481	0.0005
5000	0.448	0.472	0.418	0.485	0.430	0.435	0.448	0.0007
6350	0.423	0.411	0.402	0.420	0.411	0.407	0.412	0.0002
8000	0.394	0.388	0.405	0.396	0.388	0.407	0.396	0.0002
10000	0.351	0.320	0.351	0.352	0.363	0.361	0.350	0.0003
12500	0.286	0.282	0.282	0.286	0.292	0.287	0.286	0.0001
16000	0.245	0.240	0.248	0.248	0.253	0.230	0.244	0.0002
20000	0.147	0.144	0.139	0.138	0.142	0.142	0.142	0.0001

Tabela D.14: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 40 milímetros e mesa parada (T_2).

Frequência	F _{1P1}	F _{1P2}	F _{1P3}	F _{2P1}	F _{2P2}	F _{2P3}	T ₂	δ ₂
500	1.319	NaN	1.383	NaN	NaN	NaN	1.351	0.0011
630	1.334	NaN	1.463	NaN	NaN	1.577	1.458	0.0028
800	1.389	1.586	1.539	1.297	NaN	1.365	1.435	0.0034
1000	1.305	1.350	1.195	1.218	1.401	1.266	1.289	0.0021
1250	1.004	0.978	0.994	1.085	1.176	1.016	1.042	0.0020
1600	0.650	0.704	0.588	0.701	0.735	0.626	0.667	0.0015
2000	0.528	0.521	0.643	0.616	0.598	0.577	0.580	0.0013
2500	0.713	0.628	0.658	0.624	0.658	0.588	0.645	0.0010
3150	0.744	0.683	0.710	0.742	0.724	0.683	0.714	0.0007
4000	0.726	0.696	0.713	0.676	0.675	0.734	0.703	0.0007
5000	0.636	0.654	0.642	0.615	0.644	0.636	0.638	0.0003
6350	0.607	0.577	0.586	0.601	0.589	0.640	0.600	0.0005
8000	0.528	0.544	0.546	0.535	0.542	0.517	0.535	0.0003
10000	0.487	0.480	0.505	0.471	0.498	0.503	0.491	0.0004
12500	0.373	0.374	0.358	0.379	0.392	0.369	0.374	0.0003
16000	0.319	0.308	0.288	0.288	0.319	0.309	0.305	0.0004
20000	0.168	0.159	0.148	0.164	0.157	0.153	0.158	0.0002

Tabela D.15: Tempos de reverberação da amostra de madeira com espaçamento de 40 milímetros e mesa rotacionando (T_4).

Frequência	F _{1P1}	F _{1P2}	F _{1P3}	F _{2P1}	F _{2P2}	F _{2P3}	T ₄	δ ₄
500	NaN	NaN	NaN	1.367	NaN	1.356	1.362	0.0002
630	NaN	NaN	NaN	1.420	1.427	1.339	1.395	0.0012
800	1.389	NaN	1.221	1.254	1.322	1.235	1.284	0.0019
1000	1.092	1.195	1.130	1.021	1.171	1.177	1.131	0.0017
1250	0.989	0.894	0.823	0.881	0.971	0.848	0.901	0.0018
1600	0.525	0.589	0.470	0.553	0.628	0.582	0.558	0.0014
2000	0.461	0.494	0.481	0.446	0.459	0.488	0.472	0.0005
2500	0.499	0.534	0.468	0.520	0.463	0.502	0.498	0.0007
3150	0.537	0.543	0.489	0.484	0.517	0.528	0.517	0.0007
4000	0.488	0.458	0.449	0.474	0.437	0.445	0.458	0.0005
5000	0.436	0.413	0.428	0.460	0.413	0.429	0.430	0.0004
6350	0.437	0.403	0.420	0.423	0.457	0.417	0.426	0.0005
8000	0.408	0.386	0.407	0.399	0.423	0.391	0.402	0.0003
10000	0.367	0.372	0.383	0.360	0.378	0.382	0.374	0.0002
12500	0.308	0.303	0.310	0.291	0.321	0.312	0.307	0.0002
16000	0.247	0.263	0.266	0.238	0.256	0.257	0.254	0.0003
20000	0.152	0.159	0.145	0.135	0.164	0.154	0.151	0.0003

APÊNDICE E – ROTINAS DE CÁLCULO


```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Calculo do coeficiente de espalhamento sonoro %%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Antes de executar, certificar que os 24 arquivos de audio (F1P1T1_MED  
% F1P2T1_MED ... F2P3T4_MED) estao no workspace.
```

```
%Volume da camara [m^3]  
V = 1.48;
```

```
%Coeficiente de atenuacao do som no ar  
m1 = 1;  
m2 = m1; %Hipotese: mesmas condicoes  
m3 = m1;  
m4 = m1;
```

```
%Velocidade do som no ar [m/s]  
TempK = 293; %Temperatura do ar no momento da medicao [K]  
c1 = 331.45*sqrt(TempK/273.15); %Hipotese: mesmas condicoes  
c2 = c1;  
c3 = c1;  
c4 = c1;
```

```
%Area da amostra [m^3]  
A = pi*(0.8/2)^2;
```

```
%VETOR_RT1 ==> Media tempo de reverberacao [s] (SEM AMOSTRA / PARADA)  
run T1_sem_amostra_parada
```

```
%VETOR_RT2 ==> Media tempo de reverberacao [s] (COM AMOSTRA / PARADA)  
run T2_com_amostra_parada
```

```
%VETOR_RT3 ==> Media tempo de reverberacao [s] (SEM AMOSTRA / ROTACIONANDO)  
run T3_sem_amostra_rotacionando
```

```
%VETOR_RT4 ==> Media tempo de reverberacao [s] (COM AMOSTRA / ROTACIONANDO)  
run T4_com_amostra_rotacionando
```

```
%alpha_spec ==> Coeficiente de absorcao sonora especular aparente  
alpha_spec = 55.3*(V/A)*(1./(c2*VETOR_RT4)-1./(c1*VETOR_RT3))-4*(V./A)*(m4-m3);
```

```
%alpha_s ==> Coeficiente de absorcao sonora de incidencia aleatoria  
alpha_s = 55.3*(V/A)*(1./(c4*VETOR_RT2)-1./(c3*VETOR_RT1))-4*(V./A)*(m2-m1);
```

```
%Coeficiente de espalhamento sonoro da base  
%S_base = 55.3*(V/A)*(1./(c3*VETOR_RT3)-1./(c1*VETOR_RT1))-4*(V./A)*(m3-m1);
```

```
%Coeficiente de espalhamento sonoro  
S = (alpha_spec-alpha_s)./(1-alpha_s);
```

```
%500 Hz ~ 20000 Hz  
x = RT1_F1P1.T20.freqVector;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% CALCULO DAS INCERTEZAS %%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Delta alpha s
```

```
Delta_alpha_s = 55.3*(V./(c1*A))*sqrt((VETOR_DELTA_2./(VETOR_RT2.^2)).^2+(VETOR_DELTA_1/  
(VETOR_RT1.^2).^2));
```

```
%Delta alpha spec
```

```
Delta_alpha_spec = 55.3*(V./(c1*A))*sqrt((VETOR_DELTA_4./(VETOR_RT4.^2)).^2+  
(VETOR_DELTA_3./(VETOR_RT3.^2).^2));
```

```
%Delta s
```

```
Delta_s = sqrt(((alpha_spec-1)./(1-alpha_s)).^2).*sqrt((Delta_alpha_spec./(alpha_spec-  
1)).^2+(Delta_alpha_s./(alpha_s-1)).^2);
```

```
%%% Para 95% de confiabilidade: multiplicar por (+/-) 2 %%%
```

```
err = Delta_s*2;
```

```
%Grafico x - S com barras de erro
```

```
h = errorbar(x,S,err);
```

```
set(gca,'xscale','log');
```

```
%plot(x,S)
```

```
hold on
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%% CALCULOS PARA CONDICAO SEM AMOSTRA E PARADA %%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%% Salvar os arquivos como: F1P1T1.ita F1P2T1.ita etc. %%%%%%%%%
```

```
%Ajuste do limite de frequencias  
ita_preferences('freqRange', [500 25000]);
```

```
%Ajuste para tercas de oitavas  
ita_preferences('bandsPerOctave', 3);
```

```
%Ajuste frequencia  
ita_preferences('samplingRate', 48000);
```

```
%Cortar em 7 segundos  
F1P1T1 = ita_time_crop(F1P1T1_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P2T1 = ita_time_crop(F1P2T1_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P3T1 = ita_time_crop(F1P3T1_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P1T1 = ita_time_crop(F2P1T1_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P2T1 = ita_time_crop(F2P2T1_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P3T1 = ita_time_crop(F2P3T1_MED, [0.02 1.12], 'time');
```

```
%Calcular T20  
RT1_F1P1 = ita_roomacoustics(  
(F1P1T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F1P1.T20.data  
RT1_F1P2 = ita_roomacoustics(  
(F1P2T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F1P2.T20.data  
RT1_F1P3 = ita_roomacoustics(  
(F1P3T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F1P3.T20.data  
RT1_F2P1 = ita_roomacoustics(  
(F2P1T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F2P1.T20.data  
RT1_F2P2 = ita_roomacoustics(  
(F2P2T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F2P2.T20.data  
RT1_F2P3 = ita_roomacoustics(  
(F2P3T1, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection)); %RT1_F2P3.T20.data
```

```
MATRIZ_RT1 = [RT1_F1P1.T20.data RT1_F1P2.T20.data RT1_F1P3.T20.data RT1_F2P1.T20.data  
RT1_F2P2.T20.data RT1_F2P3.T20.data];
```

```
VETOR_RT1 = nanmean(MATRIZ_RT1,2);
```

```
for i=1:length(MATRIZ_RT1)  
    for j=1:size(MATRIZ_RT1,2)  
        d1(i,j) = [(sqrt((MATRIZ_RT1(i,j)-VETOR_RT1(i,1))^2))./(size(MATRIZ_RT1,2)*(size  
(MATRIZ_RT1,2)-1))];  
    end  
end
```

```
%Delta ==> incerteza  
VETOR_DELTA_1 = nanmean(d1,2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% CALCULOS PARA CONDICAO COM AMOSTRA E PARADA %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Ajuste do limite de frequencias  
ita_preferences('freqRange', [500 25000]);
```

```
%Ajuste para tercas de oitavas  
ita_preferences('bandsPerOctave', 3);
```

```
%Ajuste frequencia  
ita_preferences('samplingRate', 48000);
```

```
%Cortar em 7 segundos  
F1P1T2 = ita_time_crop(F1P1T2_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P2T2 = ita_time_crop(F1P2T2_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P3T2 = ita_time_crop(F1P3T2_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P1T2 = ita_time_crop(F2P1T2_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P2T2 = ita_time_crop(F2P2T2_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P3T2 = ita_time_crop(F2P3T2_MED, [0.02 1.12], 'time');
```

```
RT2_F1P1 = ita_roomacoustics  
(F1P1T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F1P1.T20.data  
RT2_F1P2 = ita_roomacoustics  
(F1P2T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F1P2.T20.data  
RT2_F1P3 = ita_roomacoustics  
(F1P3T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F1P3.T20.data  
RT2_F2P1 = ita_roomacoustics  
(F2P1T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F2P1.T20.data  
RT2_F2P2 = ita_roomacoustics  
(F2P2T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F2P2.T20.data  
RT2_F2P3 = ita_roomacoustics  
(F2P3T2, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT2_F2P3.T20.data
```

```
MATRIZ_RT2 = [RT2_F1P1.T20.data RT2_F1P2.T20.data RT2_F1P3.T20.data RT2_F2P1.T20.data  
RT2_F2P2.T20.data RT2_F2P3.T20.data];
```

```
VETOR_RT2 = nanmean(MATRIZ_RT2,2);
```

```
for i=1:length(MATRIZ_RT2)  
    for j=1:size(MATRIZ_RT2,2)  
        d2(i,j) = [(sqrt((MATRIZ_RT2(i,j)-VETOR_RT2(i,1))^2))./(size(MATRIZ_RT2,2)*(size  
(MATRIZ_RT2,2)-1))];  
    end  
end
```

```
%Delta ==> incerteza  
VETOR_DELTA_2 = nanmean(d2,2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% CALCULOS PARA CONDICAO SEM AMOSTRA E ROTACIONANDO %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%% Salvar os arquivos como: F1P1T3.ita F1P2T3.ita etc. %%%
```

```
%Ajuste do limite de frequencias  
ita_preferences('freqRange', [500 25000]);
```

```
%Ajuste para tercas de oitavas  
ita_preferences('bandsPerOctave', 3);
```

```
%Ajuste frequencia  
ita_preferences('samplingRate', 48000);
```

```
%Cortar em 7 segundos  
F1P1T3 = ita_time_crop(F1P1T3_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P2T3 = ita_time_crop(F1P2T3_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P3T3 = ita_time_crop(F1P3T3_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P1T3 = ita_time_crop(F2P1T3_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P2T3 = ita_time_crop(F2P2T3_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P3T3 = ita_time_crop(F2P3T3_MED, [0.02 1.12], 'time');
```

```
%Calcular T20  
RT3_F1P1 = ita_roomacoustics  
(F1P1T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F1P1.T20.data  
RT3_F1P2 = ita_roomacoustics  
(F1P2T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F1P2.T20.data  
RT3_F1P3 = ita_roomacoustics  
(F1P3T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F1P3.T20.data  
RT3_F2P1 = ita_roomacoustics  
(F2P1T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F2P1.T20.data  
RT3_F2P2 = ita_roomacoustics  
(F2P2T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F2P2.T20.data  
RT3_F2P3 = ita_roomacoustics  
(F2P3T3, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT3_F2P3.T20.data
```

```
MATRIZ_RT3 = [RT3_F1P1.T20.data RT3_F1P2.T20.data RT3_F1P3.T20.data RT3_F2P1.T20.data  
RT3_F2P2.T20.data RT3_F2P3.T20.data];
```

```
VETOR_RT3 = nanmean(MATRIZ_RT3,2);
```

```
for i=1:length(MATRIZ_RT3)  
    for j=1:size(MATRIZ_RT3,2)  
        d3(i,j) = [(sqrt((MATRIZ_RT3(i,j)-VETOR_RT3(i,1))^2))./(size(MATRIZ_RT3,2)*(size  
(MATRIZ_RT3,2)-1))];  
    end  
end
```

```
%Delta ==> incerteza  
VETOR_DELTA_3 = nanmean(d3,2);
```



```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% CALCULOS PARA CONDICAO COM AMOSTRA E ROTACIONANDO %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%% Salvar os arquivos como: F1P1T4.ita F1P2T4.ita etc. %%%
```

```
%Ajuste do limite de frequencias  
ita_preferences('freqRange', [500 25000]);
```

```
%Ajuste para tercas de oitavas  
ita_preferences('bandsPerOctave', 3);
```

```
%Ajuste frequencia  
ita_preferences('samplingRate', 48000);
```

```
%Cortar em 7 segundos  
F1P1T4 = ita_time_crop(F1P1T4_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P2T4 = ita_time_crop(F1P2T4_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F1P3T4 = ita_time_crop(F1P3T4_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P1T4 = ita_time_crop(F2P1T4_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P2T4 = ita_time_crop(F2P2T4_MED, [0.02 1.12], 'time');  
F2P3T4 = ita_time_crop(F2P3T4_MED, [0.02 1.12], 'time');
```

```
%Calcular T20  
RT4_F1P1 = ita_roomacoustics  
(F1P1T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F1P1.T20.data  
RT4_F1P2 = ita_roomacoustics  
(F1P2T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F1P2.T20.data  
RT4_F1P3 = ita_roomacoustics  
(F1P3T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F1P3.T20.data  
RT4_F2P1 = ita_roomacoustics  
(F2P1T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F2P1.T20.data  
RT4_F2P2 = ita_roomacoustics  
(F2P2T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F2P2.T20.data  
RT4_F2P3 = ita_roomacoustics  
(F2P3T4, 'T20', 'edcMethod', 'subtractNoiseAndCutWithCorrection); %RT4_F2P3.T20.data
```

```
MATRIZ_RT4 = [RT4_F1P1.T20.data RT4_F1P2.T20.data RT4_F1P3.T20.data RT4_F2P1.T20.data  
RT4_F2P2.T20.data RT4_F2P3.T20.data];
```

```
VETOR_RT4 = nanmean(MATRIZ_RT4,2);
```

```
for i=1:length(MATRIZ_RT4)  
    for j=1:size(MATRIZ_RT4,2)  
        d4(i,j) = [(sqrt((MATRIZ_RT4(i,j)-VETOR_RT4(i,1))^2))./(size(MATRIZ_RT4,2)*(size  
(MATRIZ_RT4,2)-1))];  
    end  
end
```

```
%Delta ==> incerteza  
VETOR_DELTA_4 = nanmean(d4,2);
```

```

//Codigo para rotacao da mesa giratoria - camara reverberante em escala reduzida - UTFPR
//Autores: Ian Cavalcante e Vinicius Felchack
//Engenharia Mecanica

#define ENABLE 5
#define DIR 6
#define PULSE 7

#define MAXPULSE 8350 //Numero de ciclos de passo para 360 graus

int x=120; //0 x configura a velocidade, 1000 foi a velocidade inicial escolhida

void goAngle(int angle){
  float offset = MAXPULSE/360;
  int new_pulse = (int)offset*angle;
  for(int j=0; j<new_pulse; j++) {
    for(int i=0; i<4; i++) {
      digitalWrite(PULSE, HIGH);
      delayMicroseconds(x);
      digitalWrite(PULSE, LOW);
      delayMicroseconds(6000); //Velocidade de rotacao, 6000 equivalente a +- 0.31 rpm
    }
    if(x>85) x--; //Delay utilizado para a velocidade máxima
  }
}

void setup() {
  pinMode(ENABLE, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);
  pinMode(PULSE, OUTPUT);
  digitalWrite(ENABLE, LOW);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(DIR, LOW);
  delayMicroseconds(10);
  goAngle(360); //Angulo de rotacao
}

void loop() {

}

```

**APÊNDICE F – ROTEIRO PARA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE
ESPALHAMENTO**

SETUP SINAL DE TESTE

Passo 1.) Inicializar o ITA Toolbox com o comando:

ita_toolbox_gui

Obs.1: Caso não funcione, certifique-se que a pasta ITA-Toolbox esteja nos arquivos em *Current Folder* (lado esquerdo da tela). Clicar com botão direito na pasta ITA-Toolbox ==> *Add to path* ==> *Selected Folders and Subfolders*.

Passo 2.) Clicar na aba Measurement ==> New Measurement Setup ==> Transferfunction.

Passo 3.) Editar os seguintes campos:

- i.) FFT Degree = 17
- ii.) Frequency limits = 20 20000
- iii.) Signal Type = expsweep*
- iv.) Stop Margin [s] = 0
- v.) Output Amplification [dBFS] = 0
- vi.) Pause before measurements = 0
- vii.) Number of Averages = 10 (para mesa parada) ou 72 (para mesa rotacionando)

Passo 4.) Clicar em Measurement ==> Edit Measurement ==> Preferences ==> IO Settings

Passo 5.) Editar os seguintes campos:

- i.) Sampling Rate = 48000

Obs.: A placa Roland QUAD-CAPTURE deve estar com frequência de amostragem de 48000 Hz também.

SETUP MOTOR DE PASSO

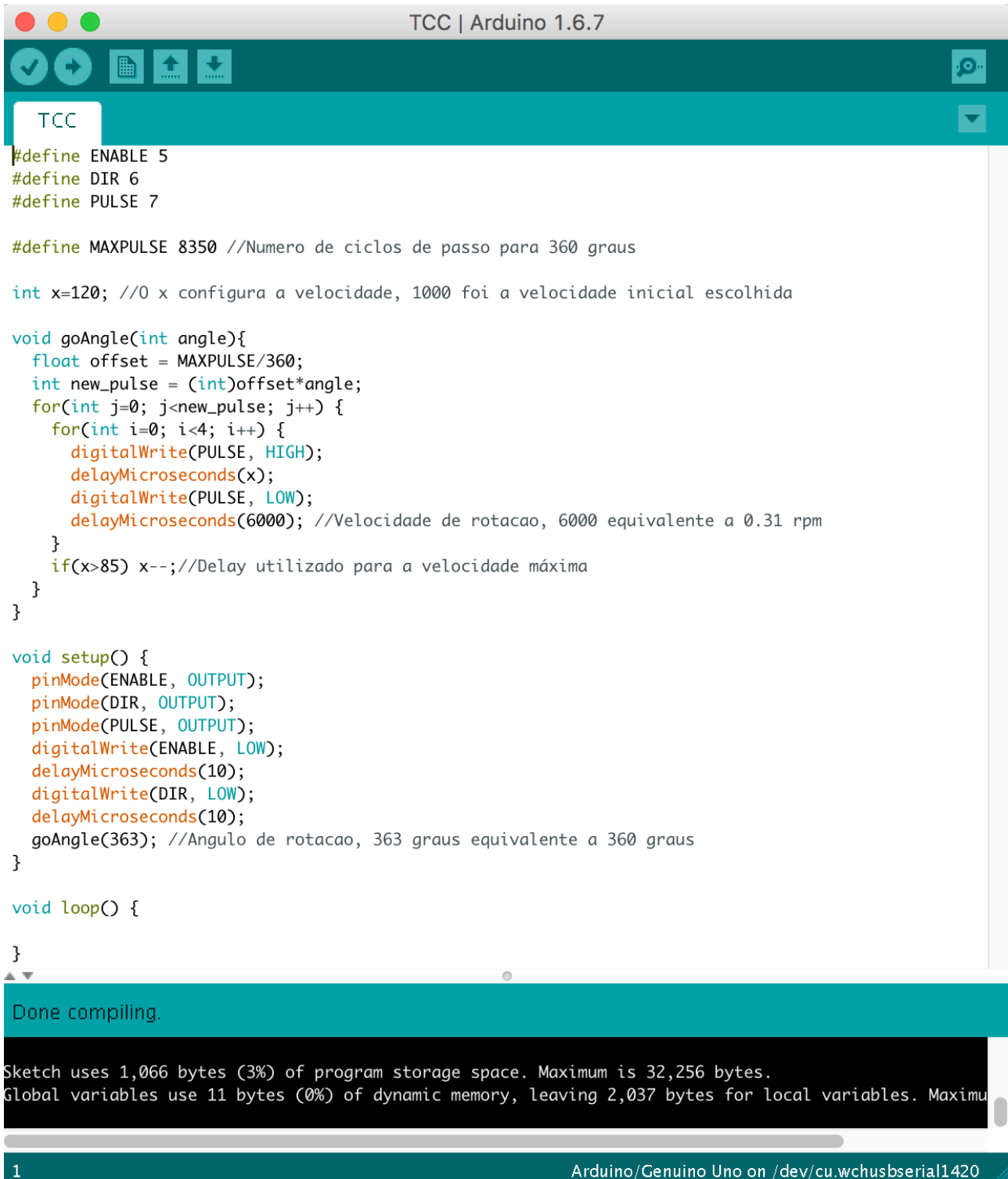
Passo 6.) Ajustar velocidade angular do motor de passo.

- i.) O tempo do sinal de teste está relacionado à velocidade angular da mesa.
- ii.) Recomendação: “↑ Tempo do sinal de teste ↓ Rotação da mesa ⇒ Melhor a medição”.

$$t = \frac{2^N}{\text{SamplingRate}}$$

FFT DEGREE	SAMPLING RATE [Hz]	TEMPO [s]	Rotação do motor [rpm]
18	48000	5.46	0.15
17	48000	2.73	0.31
16	48000	1.37	0.61

iii.) Código que controla o motor de passo.



```
TCC | Arduino 1.6.7
TCC
#define ENABLE 5
#define DIR 6
#define PULSE 7

#define MAXPULSE 8350 //Numero de ciclos de passo para 360 graus

int x=120; //0 x configura a velocidade, 1000 foi a velocidade inicial escolhida

void goAngle(int angle){
  float offset = MAXPULSE/360;
  int new_pulse = (int)offset*angle;
  for(int j=0; j<new_pulse; j++) {
    for(int i=0; i<4; i++) {
      digitalWrite(PULSE, HIGH);
      delayMicroseconds(x);
      digitalWrite(PULSE, LOW);
      delayMicroseconds(6000); //Velocidade de rotacao, 6000 equivalente a 0.31 rpm
    }
    if(x>85) x--; //Delay utilizado para a velocidade máxima
  }
}

void setup() {
  pinMode(ENABLE, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);
  pinMode(PULSE, OUTPUT);
  digitalWrite(ENABLE, LOW);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(DIR, LOW);
  delayMicroseconds(10);
  goAngle(363); //Angulo de rotacao, 363 graus equivalente a 360 graus
}

void loop() {
}

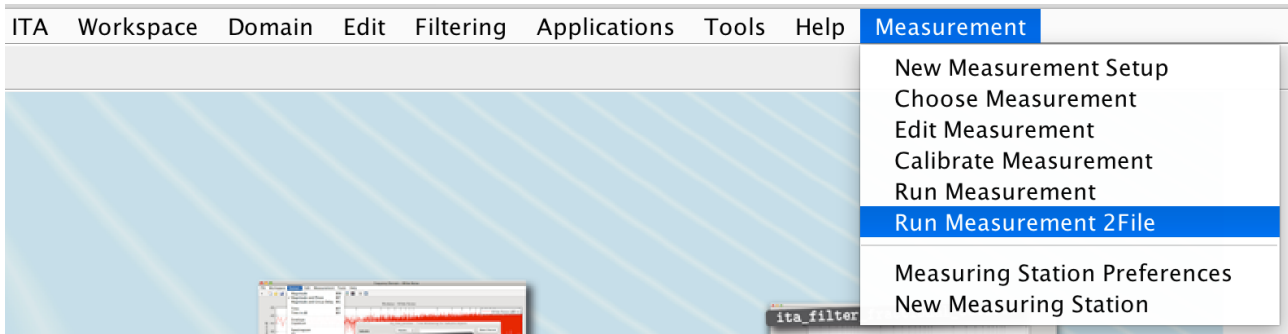
Done compiling.

Sketch uses 1,066 bytes (3%) of program storage space. Maximum is 32,256 bytes.
Global variables use 11 bytes (0%) of dynamic memory, leaving 2,037 bytes for local variables. Maximum

1 Arduino/Genuino Uno on /dev/cu.wchusbserial1420
```

MEDIÇÕES

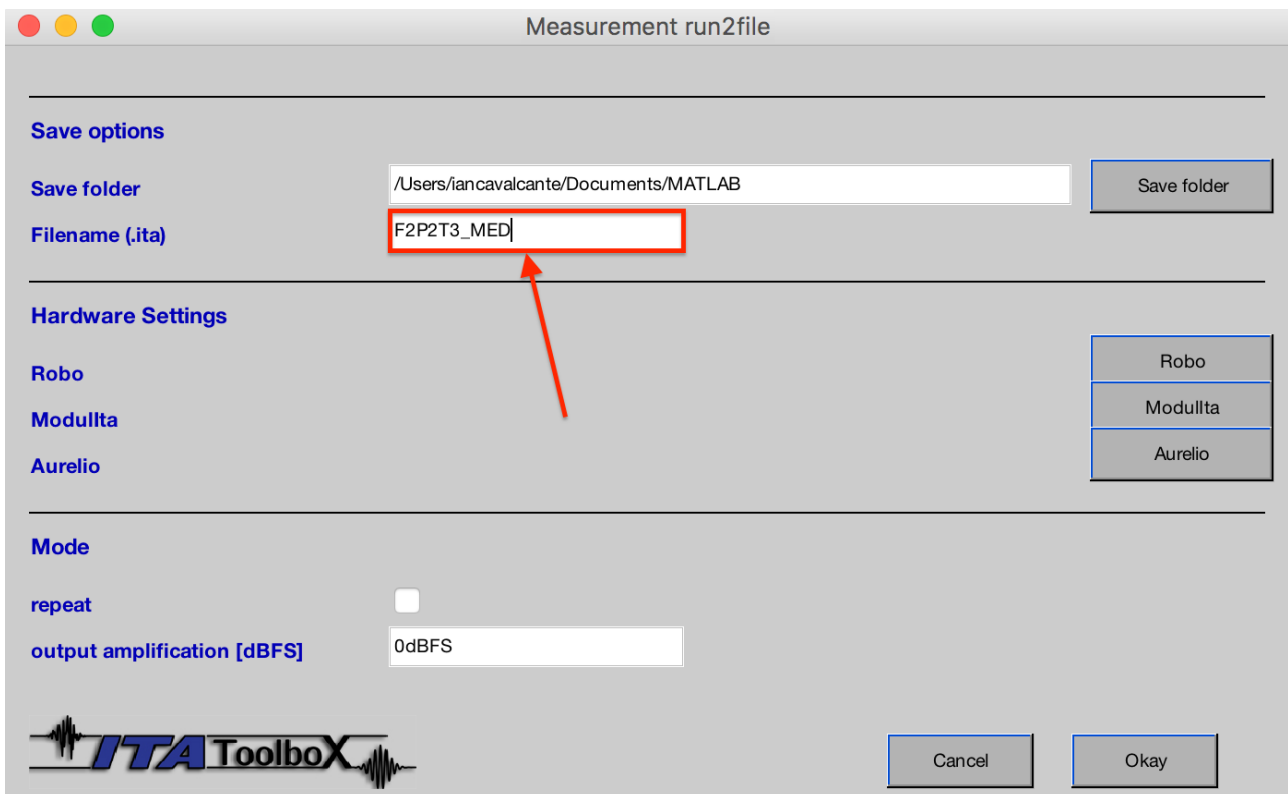
Passo 7.) Crie suas medições através do Run Measurement 2File.



Passo 8.) Nomeie a medição. Recomenda-se o seguinte formato.

$F_i P_j T_k_MED$

Exemplo:



Onde

- “i” assume valores [1 ou 2] Fonte na posição 1 ou 2
- “j” assume valores [1, 2 ou 3] Microfone na posição 1, 2 ou 3
- “k” assume valores [1, 2, 3 ou 4] Tempo de reverberação 1, 2, 3 ou 4

Os tempos de reverberação são padronizados segundo a norma ISO 17497-1 (2004):

Table 2 — Measurement conditions for the four different reverberation times

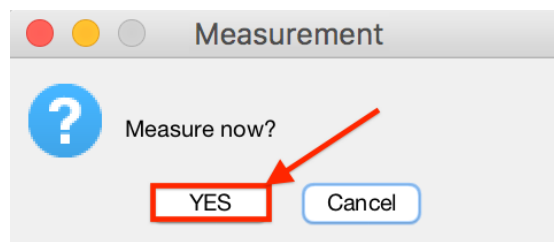
Reverberation time	Test sample	Turntable
T_1	not present	not rotating
T_2	present	not rotating
T_3	not present	rotating
T_4	present	rotating

Passo 9.) Execute primeiramente o motor de passo através do Arduino, e logo em seguida, o ITA-Toolbox.

- Arduino



- ITA-Toolbox:



Isto gerará um arquivo no formato “.ita”. No caso do exemplo acima seria: “F2P2T3_MED.ita”.

Para calcular o coeficiente de espalhamento necessita-se de 6 tempos de reverberação para cada condição descrita na tabela supracitada e em cada tempo, varia-se a fonte 2 vezes e o microfone 3 vezes. Ao final você deve ter 24 medições, e os seguintes arquivos na sua pasta:

F1P1T1_MED.ita	F1P1T2_MED.ita	F1P1T3_MED.ita	F1P1T4_MED.ita
F1P2T1_MED.ita	F1P2T2_MED.ita	F1P2T3_MED.ita	F1P2T4_MED.ita
F1P3T1_MED.ita	F1P3T2_MED.ita	F1P3T3_MED.ita	F1P3T4_MED.ita
F2P1T1_MED.ita	F2P1T2_MED.ita	F2P1T3_MED.ita	F2P1T4_MED.ita
F2P2T1_MED.ita	F2P2T2_MED.ita	F2P2T3_MED.ita	F2P2T4_MED.ita
F2P3T1_MED.ita	F2P3T2_MED.ita	F2P3T3_MED.ita	F2P3T4_MED.ita

Selecione todos os arquivos e arraste-os para a *Command Window*. Os arquivos devem aparecer no seu *Workspace* agora.

Passo 10.) Execute a rotina: TCC_Parte2.m

Obs.: Tenha certeza que as seguintes sub-rotinas estejam na sua pasta *Current Folder*.

- T1_sem_amostra_parada.m
- T2_sem_amostra_rotacionando.m
- T3_com_amostra_parada.m
- T4_com_amostra_rotacionando.m

Boas medições!

CHECKLIST MEDIÇÕES

Nome da pasta / Tipo de amostra: _____

Data: ____ / ____ / ____ Hora de início: ____ : ____ Hora de término: ____ : ____

Temperatura: _____ Umidade: _____

- | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> F1P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T4_MED |
-

Nome da pasta / Tipo de amostra: _____

Data: ____ / ____ / ____ Hora de início: ____ : ____ Hora de término: ____ : ____

Temperatura: _____ Umidade: _____

- | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> F1P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T4_MED |
-

Nome da pasta / Tipo de amostra: _____

Data: ____ / ____ / ____ Hora de início: ____ : ____ Hora de término: ____ : ____

Temperatura: _____ Umidade: _____

- | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> F1P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F1P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F1P3T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P1T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P1T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P2T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P2T4_MED |
| <input type="checkbox"/> F2P3T1_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T2_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T3_MED | <input type="checkbox"/> F2P3T4_MED |