

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VALÉRIA BEATRIZ WILLE

**DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS
ESTATÍSTICAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO ITEM 3.2 DA
NORMA ISO 10140-3**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

VALÉRIA BEATRIZ WILLE

**DETERMINAÇÃO DE MÉTODO DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS
ESTATÍSTICAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO ITEM 3.2 DA NORMA ISO
10140-3**

**Calculating method determination for statistical uncertainties from input
parameters from ISO 10140-3's item 3.2**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Rodrigo Eduardo Catai.

Coorientadora: Janine Nicolosi Corrêa.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VALÉRIA BEATRIZ WILLE

**DETERMINAÇÃO DE MÉTODO DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS
ESTATÍSTICAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO ITEM 3.2 DA NORMA ISO
10140-3**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/dezembro/2021

Rodrigo Scoczynski Ribeiro

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rodrigo Eduardo Catai

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Janine Nicolosi Corrêa

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Dentre todas as verdades já ditas, aquela que possuo a maior experiência é a de que não se chega a lugar nenhum sozinho, portanto gostaria de agradecer a algumas das pessoas especiais que me fornecem apoio.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Noeli e Milvo, pois sem as abnegações, apoio, compreensão, paciência e incentivo destes eu jamais chegaria até aqui.

Agradeço também ao meu amigo Thomaz, sempre ao meu lado durante os cinco anos de faculdade e como apoio nos laboratórios, mostrando o real significado de amizade despretensiosa.

Agradeço à minha coorientadora, professora Janine Nicolosi Corrêa, que se mostrou muito além de uma excelente professora e profissional, mas uma grande amiga e incentivadora.

Agradeço ao meu orientador, professor Rodrigo Eduardo Catai, pelos ensinamentos prestados, pela paciência e pelo profissionalismo.

Agradeço à minha companheira de trabalhos Fernanda Henneberg que se tornou muito além de uma parceira de pesquisa, partilhando além dos conhecimentos técnicos, muitos conselhos acerca da vida e da carreira como Engenheira Civil.

Agradeço ao Rodrigo Scoczynski Ribeiro pela paciência, disponibilidade e cordialidade.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos e familiares que estiveram presentes nesta caminhada prestando suporte e apoio. Em especial, os meus irmãos Rafael, Gustavo e Francesmar e minha amiga Rafaela, meus suportes para todos os momentos.

"Seu equipamento de teste está mentindo para você e é seu trabalho descobrir como".

(Charles Rush)

RESUMO

Dentre os mais diversos problemas que podem interferir na saúde humana, encontra-se a exposição ao ruído. Ao observar a quantidade de pesquisas das mais diversas áreas ao evidenciar esta temática, evidencia-se sua interdisciplinaridade. O presente trabalho visa determinar o parâmetro de cálculo das incertezas estatísticas para os parâmetros de entrada do item 3.2 da ISO 10140-3, a partir de dados experimentais de ensaios acústicos com contrapisos feitos de materiais recicláveis. Para isso, foram analisados os dados previamente obtidos através de planilhas e metodologia de cálculo estatístico. Foram analisados diferentes exemplares de materiais não convencionais e apenas um tipo de revestimento, os resultados mostram que a metodologia é verossímil, uma vez que, quando aplicada, resulta em dados similares ao disposto na norma internacional ISO 12999.

Palavras-chave: Acústica. Sustentabilidade. Análise de dados.

ABSTRACT

Among the most diverse problems that can interfere with human health, there is noise exposure. By observing the amount of research from the most diverse areas evidencing this theme, its interdisciplinary nature becomes evident. The present work aims to determine the parameter calculation of statistical uncertainties for the input parameters of item 3.2 of ISO 10140-3, from acoustic tests experimental data with screeds made of recyclable materials, in addition to the verification of the noise passing through these constructive elements. The previously obtained data will be analyzed using spreadsheets and statistical calculation methodology. Different specimens of non-conventional materials and only one type of floor coating were analyzed, the results show that the methodology is credible because when applied it results in data similar to international standard ISO 12999 standard stipulations.

Palavras-chave: Acoustics. Sustainability. Data Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantas baixas da câmara acústica.....	24
Figura 2 - Corte A-A da câmara reverberante	25
Figura 3 - Aspectos para análise das categorias da sustentabilidade	27
Figura 4 - Tapping machine posicionada acima do contrapiso, na sala superior	34
Figura 5 - Analisador de frequências na sala inferior posicionado para iniciar a medição.....	35
Figura 6 - Comparação das incertezas padrão por faixas de frequência	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ondas sonoras quanto à frequência.....	19
Tabela 2 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ...	22
Tabela 3 - Incerteza padrão para quantitativos de número unitário.....	32
Tabela 4 - Incertezas padrão para a redução do nível de pressão do impacto sonoro em bandas de um terço de oitava.....	33
Tabela 5 - Resultados das posições para a frequência de 100Hz da placa de RCD revestida com piso vinílico.....	40
Tabela 6 - Compilação dos resultados das aplicações e médias logarítmica e linear.....	40
Tabela 7 - Resultados das incertezas padrão	41
Tabela 8 - Resultados das placas de contrapiso feitas com agregado convencional e RCD, revestidas com piso vinílico	42
Tabela 9 - Resultados das placas de contrapiso feitas com argila expandida e incorporador de ar	43
Tabela 10 - Resultados da placa de contrapiso feita com borracha e revestida com piso vinílico	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 Justificativa	16
1.3 Contextualização	17
1.4 Delimitação	18
2. REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	19
2.1. Acústica	19
2.1.1. Som e Ruído.....	19
2.1.2. Influência do Ruído na Saúde Humana	20
2.1.3. NBR 15575-3.....	21
2.1.4. ISO 10140-3	22
2.1.5. Analisador de Frequências.....	26
2.1.6. Representação Logarítmica da Sensação Provocada pelo Som.....	26
2.2. Sustentabilidade	27
2.2.1. Materiais não Convencionais Aplicados para Fins Construtivos de Isolamento ao Ruído de Impacto	29
2.3. Análise estatística de dados	30
2.3.1. Análise Estatística de Dados Acústicos – ISO 12999	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. Materiais	34
3.2. Métodos	35
4. RESULTADOS	39
5. CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

A exposição diária e contínua ao ruído é uma problemática que envolve as mais diversas áreas de pesquisa, podendo-se destacar a Medicina do Trabalho e a Engenharia como duas áreas completamente distintas e que partilham desta preocupação. Além das pesquisas dentro da área da Engenharia, cabe um destaque à temática de Oliveira (2016) como um exemplo à interdisciplinaridade previamente abordada.

Oliveira (2016) aborda, no contexto médico, uma perícia para fins judiciais cujo objetivo é a análise da causa de otite de um determinado trabalhador, podendo ser em razão de exposição contínua ao ruído do esmerilhador ou deficiência auditiva preexistente. Ainda que, neste particular estudo de caso, o resultado tenha se dado favorável à doença preexistente, mesmo que o ruído do esmerilhador seja considerável, exemplificando claramente a aplicação da temática do ruído em áreas de estudo divergentes à área da Engenharia.

Observa-se a centralização da problemática do ruído em seu impacto à saúde humana, tendo em vista que altos períodos de exposição a níveis elevados de pressão sonora podem ocasionar a perda auditiva, a denominada “perda de audição induzida por ruído”, também conhecida como PAIR, podendo ser temporária ou permanente. O ruído também exerce importante influência no preço de imóveis, observa-se que os imóveis situados em locais ruidosos são menos valorizados em relação aos localizados em áreas com menor poluição sonora (BISTAFA, 2018).

Bistafa (2018) também correlaciona a ação prejudicial do ruído em escolas e ambientes de trabalho, locais onde o ruído ambiental se faz muito presente. Segundo o mesmo autor, o ruído acaba por afetar significativamente a convivência em comunidade do ser humano, uma vez que interfere na percepção de um indivíduo quanto sua própria fala, em sua capacidade de aprendizado e em sua eficiência no trabalho. Adicionalmente, Bistafa (2018) também aponta que possuir a audição deficiente acarreta em problemas como estresse e ansiedade à um indivíduo, comprometendo suas relações interpessoais e suas atividades cotidianas.

Segundo Bistafa (2018), a razão da escassez de estudos abrangendo a acústica dentro da engenharia deve-se à pequena quantidade de engenheiros

especialistas neste tema, fazendo com que as pesquisas se preocupem em compreender parcialmente legislações normativas ou aplicações de medidas para a escolha de materiais adequados, apenas abrangendo disciplinas específicas da pesquisa em questão.

No Brasil, até 9 de março de 1990, não existia uma padronização para a emissão de ruídos no território do país, data em que foi criada a Resolução n. 001 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1990). Esta Resolução limita a emissão de ruídos advinda de qualquer atividade industrial, comercial, social ou recreativa, visando a saúde pública. Ainda que a Resolução possa ser empregada em nível nacional, sua aplicabilidade depende da fiscalização municipal, muito similar ao vivenciado nos Estados Unidos, país o qual também delega as atribuições ao ruído aos seus municípios (BISTAFA, 2018).

A diversidade e internacionalidade de artigos unindo a questão da poluição sonora com a poluição ambiental física propriamente dita, demonstram a preocupação da comunidade científica em atenuar os dois problemas atuais e recorrentes. Utilizando polímeros granulados feitos de pneus reciclados ao fim de sua vida útil como principais agregados para a fabricação de pisos, Maderuelo-Sanz *et al.* (2013) observaram que a borracha pode possuir um desempenho acústico quanto ao isolamento ao ruído de impacto satisfatório e até mesmo superior ao encontrado nos agregados comerciais e amplamente utilizados.

Moreira, António e Tadeu (2010) e Maderuelo-Sanz, Morrillas e Escobar (2014) também observaram a utilização de outro tipo de agregado não convencional para a fabricação de pisos com desempenho satisfatório quanto ao ruído de impacto: a cortiça. Material este, o qual segundo Moreira *et al.* (2010), com características interessantes, por ser denso e impermeável e com características acústicas e térmicas conhecidas, também é reciclável e renovável. Além de ser produzido em grande escala em Portugal, país responsável por cerca de 50% da produção mundial. Os autores ilustram a necessidade de materiais com baixo impacto ambiental e alta performance, além de demonstrar que é possível, através da experimentação, a utilização de materiais não convencionais para substituir os materiais usinados.

No tocante normativo de interesse deste trabalho de conclusão de curso, pode-se consultar a norma brasileira NBR 15575-3 (Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos) (ABNT, 2021), para a

obtenção de critérios de desempenho para elementos construtivos de pisos. As normas internacionais ISO 10140-3 (Acústica – Medições laboratoriais de isolamento sonoro de elementos de edifícios) (ISO, 2010) e ABNT NBR ISO 717-2 (Acústica – Classificação do isolamento sonoro em edificações e em elementos de edificações – Parte 2: Isolamento ao ruído de impacto) (ISO, 2021) padronizam a medição (ISO 10140) e a classificação dos resultados (ABNT NBR ISO 717) com a problemática central da acústica ao isolamento ao ruído de impacto.

O item 3 da ISO 10140-3 (ISO, 2010) determina a normalização do nível de ruído captado experimentalmente em uma equação logarítmica, resultando na observação de que as incertezas estatísticas não se propagarão linearmente a partir de então. Em decorrência dos itens 5.3 e 5.4 da mesma norma dispõem que os resultados devem ser apresentados com uma precisão de apenas uma casa decimal para a demonstração de resultados, verifica-se, então, a necessidade da análise dos dados normalizados para encontrar as incertezas estatísticas e aprimorar o processo de mensuração dos mesmos.

Ao executar medições para trabalhos de aplicação técnica, lida-se com resultados de medidas, as quais nem sempre estão expressas de forma direta. Estes valores normalmente são dotados de incertezas estatísticas, as quais não são determináveis em razão do próprio processo de medição, na maioria dos casos. Desta forma, não é possível determinar com precisão se o resultado está adequado ao objetivo, uma vez que não representa o “valor verdadeiro de grandeza” (TAYLOR, 2012).

Desta forma, pretende-se unir a problemática dos dois diferentes tipos de poluição (sonora e ambiental) com a análise estatística de parâmetros obtidos em decibéis, em uma escala logarítmica. A busca pelo método para se determinar as incertezas permite a identificação da origem destas e a análise da viabilidade de redução das mesmas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta pesquisa foi determinar um método para cálculo das incertezas estatísticas dos parâmetros de entrada do item 3.2 da norma ISO 10140-3.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso foram:

- Verificar a adequação de dados obtidos a partir de ensaios de placas feitas de materiais não convencionais com a norma internacional ISO 12999;
- Determinar incertezas estatísticas dos parâmetros de entrada do item 3.2 da norma ISO 10140-3 para materiais não convencionais.

1.2 Justificativa

A problemática do ruído é destaque por ser um tema cada vez mais explorado pela construção civil, fato ilustrado pela publicação da norma brasileira NBR 15575-3 (ABNT, 2013), a qual estabelece parâmetros mais rígidos para atendimento quanto ao isolamento acústico em edificações, principalmente multifamiliares.

Realizar a análise estatística dos dados obtidos experimentalmente, nos ensaios acústicos, possui tanta importância quando o ensaio em si, visto que o tratamento dos dados permite uma análise mais rigorosa e precisa da real situação.

Além disso, ao observar a baixa aderência da análise estatística dentro dos ensaios acústicos, verifica-se a necessidade de abordar a temática dentro deste cenário. Pretende-se a utilização da norma internacional ISO 12999 (ISO, 2014) para a comparação dos parâmetros normatizados com os resultados obtidos experimentalmente.

O presente estudo é justificado, portanto, na proposta de uma equação para a aferição da incerteza padrão inerente aos ensaios acústicos que problematizam o ruído de impacto.

1.3 Contextualização

Dentro da universalidade de temas abrangentes pela Engenharia Civil, não é difícil observar que a acústica não é a temática com a maior popularidade, porém possui uma quantidade considerável de artigos tendo em vista o impacto do ruído nos mais diversos segmentos.

Ao visitar o Repositório de Outras Coleções Abertas (ROCA), percebe-se a preocupação da comunidade acadêmica em relação ao ruído, visto que o tema é recorrente e encontrado nas mais diversas áreas de pesquisa, podendo variar entre a Engenharia Mecânica, a Engenharia Civil e outras demais Engenharias e áreas de pesquisa. Outra percepção facilmente obtida ao visitar este acervo é a de que o *Campus* Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná lidera em quantidade de publicações, somando sozinho mais da metade das pesquisas relacionadas a este tema (ROCA, 2021).

Dentre os principais artigos encontrados em veículos de pesquisa renomados, a maior parte das dissertações que divagam sobre o resíduo empregado em questões acústicas são de países europeus, como é o caso de Maderuelo-Sanz *et al.* (2011), da Espanha; Maderuelo-Sanz *et al.* (2014), da Espanha; Buratti *et al.* (2016), da Itália; e Moreira, António e Tadeu (2010), de Portugal.

Os últimos autores supramencionados trataram da questão acústica visando o aproveitamento do produto produzido em maior escala por seu país, Portugal: a cortiça. Moreira *et al.* (2010) também destacam a necessidade de observar que a cortiça é um material com boas características de resistência, renovável e natural, o que pouparia esforço energético para sua produção. Experimentalmente, os autores demonstraram que a cortiça além de ser um recurso sustentável com satisfatório desempenho mecânico, também possui um bom desempenho acústico, sendo, portanto, um bom agregado não convencional.

O cenário da pesquisa brasileira, apesar de possuir muitas pesquisas acústicas, não apresenta uma vasta gama deste assunto dentro da Engenharia Civil, visto que não são todas as faculdades que possuem laboratório acústico. Ao pesquisar a existência de tais laboratórios, no presente momento, observa-se que a maioria destes está situado em faculdades públicas (estaduais ou federais), como é o

caso da UFU, UFSC, UFSM, UFPR, UNB e UTFPR, enquanto apenas duas faculdades privadas (PUCRS e UNISINOS) possuíam tal instalação.

Nesse sentido, verifica-se a importância da abordagem acústica na construção civil através da constatação da grande amostragem de trabalhos voltados ao assunto.

1.4 Delimitação

As placas ensaiadas foram feitas previamente em trabalho acadêmico (SOUSA, 2019) e ensaiadas por WILLE *et al.* (2020). Em decorrência da pandemia do novo coronavírus em 2020, a partir desta data não foram mais realizados ensaios acústicos, pois as instalações de laboratório foram restritas. Portanto, a finalização dos ensaios acústicos deu-se no primeiro semestre de 2021.

Afim de obter e comparar o desempenho acústico de materiais, foram ensaiadas placas de contrapiso feitas com diferentes tipos de agregados não convencionais e acabadas com diferentes tipos de revestimento.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Acústica da UTFPR, no bloco EF da Sede Ecoville do *Campus* Curitiba e necessitaram de apoio de pessoas externas à pesquisa, tendo em vista as dimensões das placas de contrapiso e seu peso.

Para a produção do ruído foi utilizada uma *Tapping Machine* padrão e, para a análise dos resultados dos ensaios, foi empregado um analisador de frequências da fabricante Brüel e Kjær Co. e os dados exportados para uma planilha de cálculo. Os dados obtidos são a base para a determinação do método de cálculo da incerteza estatística dos parâmetros de entrada da ISO 10140 (2010).

2. REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

2.1. Acústica

2.1.1. Som e Ruído

Define-se som como a sensação produzida no sistema auditivo a partir da percepção de ondas mecânicas geradas por corpos vibrantes, sendo o ruído a sua porção indesejável, sem harmonia. Muito embora a conotação de ruído caracterize-o de forma negativa e sua atuação continuada afete a saúde humana, este pode ser muito útil para a transmissão de informações (BISTAFA, 2018).

A partir de um meio, o qual pode ser sólido, líquido ou gasoso, o som se propagará em todas as direções, formando uma esfera. Porém, dependendo da fonte sonora, é possível rastrear seu direcionamento em razão da concentração de energia em um determinado sentido (CARVALHO, 2010).

As oscilações das moléculas do meio de propagação são as denominadas ondas sonoras e o número de oscilações em um determinado período de tempo é denominado frequência, medida em Hertz (CARVALHO, 2010). É possível classificar as ondas sonoras quanto à frequência, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das ondas sonoras quanto à frequência

Classificação da onda sonora	Frequência	Percepção humana
Infrassons	Abaixo de 20 Hz	Não perceptíveis
Baixas frequências	De 20 a 200 Hz	Sons graves
Médias frequências	De 200 a 2000 Hz	Sons médios
Altas frequências	De 2000 a 20000 Hz	Sons agudos
Ultrassons	Acima de 20000 Hz	Não perceptíveis

Fonte: Adaptado de Carvalho (2010).

O período é o intervalo de tempo necessário para se completar um ciclo, e é caracterizado por ser o inverso da frequência. Dessa forma, a frequência se apresentará na unidade Hertz (Hz) ou ciclos por segundo, indicando o número de períodos existentes em um segundo (BISTAFA, 2018).

O ruído de impacto, por sua vez, é o som propagado através da excitação por contato, a partir de movimentos vibratórios localizados sobre matéria sólida. Ao se

medir o nível de ruído de impacto, é possível determinar o desempenho acústico de uma edificação (BISTAFA, 2018).

2.1.2. Influência do Ruído na Saúde Humana

A preocupação acerca da influência do ruído na saúde humana aumenta ao passo em que o problema se agrava acompanhando o crescimento dos grandes núcleos urbanos. Ainda assim, o assunto não é amplamente explorado pela engenharia brasileira, no sentido de não existirem muitas publicações voltadas ao tema no idioma do país (CARVALHO, 2010).

O Programa Nacional de Educação e Controle de Poluição Sonora – Silêncio, criado através da Resolução nº 001 de 1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) iniciou a regulamentação de critérios e padrões para a emissão de ruído no Brasil. A resolução foi criada partindo da premissa de que o ruído se enquadra como um poluidor e, por conseguinte, deteriora a qualidade de vida (CONAMA, 1990).

A Resolução de 1990 visava controlar “a emissão de ruídos, em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, (...) no interesse da saúde, do sossego público” ao estabelecer critérios e responsabilidades para a atenuação deste tipo de poluição. Adicionalmente, estabelece parâmetros para projetos construtivos objetivando o conforto da comunidade (CONAMA, 1990).

O Artigo 3º da Resolução nº 002 do CONAMA (1990) estabelece a coordenação do programa Silêncio ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). Aos Estados e Municípios da federação estão atribuídas as responsabilidades de estabelecer e implementar medidas para controle da poluição sonora (CONAMA, 1990).

Em razão da falta de especificidade, aliada à presença de teoria em demasia nos poucos materiais disponíveis, os profissionais da construção civil “limitam-se a utilização de especificações e fórmulas aplicadas em situações particulares”, resultando em projetos genéricos com frequente emprego de técnicas ultrapassadas, como os auditórios revestidos quase que totalmente com carpete (CARVALHO, 2010).

Carvalho (2010) destaca que a preocupação com a acústica ambiental ganhou força entre as construtoras e incorporadoras na entrega de seus produtos,

levando em conta que era comum este tipo de preocupação apenas em construções similares aos cinemas e teatros. Ao analisar o ruído de impacto em lajes de edificações multifamiliares, ou ruído emitido por fluidos em suas tubulações, percebe-se que não é possível a entrega de um produto de qualidade com uma poluição sonora considerável, acentuando a necessidade de um projeto prévio de acústica para mitigar o problema a ser encontrado a medida em que a edificação seja utilizada.

A eliminação total do ruído, além de muito cara, é praticamente impossível e inviável, visto que sempre haverá um efeito chamado ruído de fundo, caracterizado por ruídos emitidos de fontes secundárias, e a falta destes ruídos seria considerada como desinteressante. Portanto, a preocupação reside em controlar o ruído ao invés de sua eliminação total. Em razão da complexidade, é necessário analisar cada caso particular e desenvolver estratégias e metodologias para o controle do ruído (BISTAFA, 2018).

2.1.3. NBR 15575-3

A terceira parte da NBR 15575 (ABNT, 2021) refere-se aos requisitos para o desempenho de sistemas de pisos estabelecendo critérios relativos ao desempenho térmico, acústico, lumínico e de segurança ao fogo. Ou seja, verifica-se a preocupação acerca do conforto tátil e antropodinâmico dos usuários dentro dos sistemas construtivos. Sendo o foco deste trabalho o desempenho acústico, tratado no item 12 da referida norma.

Para fins normativos, define-se o sistema de piso como o sistema composto das seguintes camadas: estrutural, impermeabilização, de isolamento térmico ou acústico, de contrapiso, de fixação e de acabamento. O sistema possui finalidade estrutural, de vedação e tráfego e, sobre sua camada final (de acabamento), é onde se aplica a vibração que gerará o ruído de impacto (ABNT, 2021).

A norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021) faz definições importantes acerca do isolamento acústico do sistema de piso, sendo este o “conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), composto por uma ou mais camadas que tem por finalidade atenuar a passagem de ruídos”.

Já a camada de contrapiso é caracterizada por ser um “estrato com as funções de regularizar o substrato, proporcionando uma superfície uniforme de apoio, coesa

(...) podendo eventualmente servir como camada de embutimento, caimento ou declividade” (ABNT, 2021).

Para os sistemas de pisos, são considerados isolamentos acústicos para atenuar o ruído de impacto (proveniente do caminhar, das quedas de objetos, etc.) e o ruído aéreo (proveniente do som de conversas, dentre outros ruídos) e os valores normativos foram obtidos por meio de ensaios de campo. Também está previsto o método simplificador de campo, para normatizar medições obtidas sem a instrumentação necessária e/ou sem as condições ambientais adequadas, como é o caso que se verifica quando há ruído ambiente presente (ABNT, 2021).

Para os níveis de ruído admitidos na habitação, os níveis de desempenho mínimo estão previstos na Tabela 2 (ABNT, 2021).

Tabela 2 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado

Elemento	Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado (dB)
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas sobre dormitório	≤ 80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre dormitório de unidades habitacionais autônomas.	≤ 55

Fonte: ABNT NBR 15575-3 (2021).

Na Tabela 2 estão destacados os requisitos mínimos pertinentes a este trabalho, os quais nortearão os resultados do mesmo acerca do atendimento dos contrapisos ensaiados quanto ao seu isolamento acústico. O anexo E da norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2021) também prevê recomendações normativas a outros níveis de desempenho.

2.1.4. ISO 10140-3

A norma internacional ISO 10140 (ISO, 2010) estabelece métodos laboratoriais para medições de isolamento acústico em elementos construtivos. A parte 3 desta norma trata especificamente dos métodos laboratoriais para a medição do isolamento acústico ao ruído de impacto em pisos. Estes métodos também podem

ser utilizados para estimar a performance *in situ* das propriedades acústicas dos elementos ensaiados em laboratório, desde que sejam levados em conta fatores como: a transmissão flanqueada, condições de contorno e fatores de perda.

A norma ISO 10140-3 (ISO, 2010) especifica um método para teste utilizando uma fonte de ruído padrão denominada *tapping machine*, a qual simula fonte de impacto semelhante a passos humanos calçados, além de ser aplicável para todos os tipos de pisos (pesados ou leves) com todos os tipos de revestimentos.

Em concordância com a parte 5 da norma ISO 10140 (ISO, 2010) a fonte de impacto sonora para os ensaios laboratoriais deverá ser uma *tapping machine* padrão. O equipamento deverá seguir o prescrito no anexo E da referida norma. A qual estabelece, em livre tradução, o seguinte:

“A *tapping machine* padrão deve possuir cinco martelos alinhados. A distância entre as linhas de centro entre os martelos limítrofes deve ser pelo menos (100 ± 3) mm. A distância entre o centro dos suportes da *tapping machine* e as linhas de centro dos martelos limítrofes deve ser pelo menos 100 mm. Os suportes deverão ser equipados com amofadas de isolamento vibracional.”

Esta parte da norma também estabelece o impulso médio dos martelos, suas dimensões, peso e forma cilíndrica, bem como a altura a qual deverão estar os martelos para que possuam o impulso desejado para produzirem um impacto sequencial e uniforme (ISO, 2010).

Para a velocidade do impacto gerado pelos martelos, a norma leva em consideração o peso destes componentes. A direção de queda dos martelos deve ser perpendicular à superfície testada em $0,5^\circ$ para o interior (ISO, 2010).

Ainda de acordo com o anexo E da parte 5 da norma ISO 10140 (ISO, 2010), a *tapping machine* deve ser auto-dirigida (automática) e deve seguir a critérios fixados para sua calibração. O peso do equipamento deve ser menor do que 25 kg para não sobrecarregar pisos leves e/ou revestimentos de pisos. Além disso, a NBR 15575-3 (ABNT, 2021) aceita apenas a *tapping machine* como equipamento gerador de impacto para este tipo de ensaio.

A ISO 10140-3 (ISO, 2010), traduzida livremente do inglês, define a instalação necessária para o ensaio, como:

“Dois espaços adjacentes verticalmente são usados, o que está acima será denominado a sala fonte enquanto o espaço abaixo

será denominado como sala receptora (ver Cláusula 6). Um piso, o qual será o elemento de teste, separa os dois espaços. A fonte de impacto é posicionada no topo do elemento de teste em diferentes posições e os níveis de pressão do ruído são medidos na “sala receptora”, normalmente na faixa de frequência entre 100 Hz até 5 000 Hz (decrécimo opcional para 50 Hz). A área de absorção sonora equivalente na sala receptora é calculada a partir de medições do tempo de reverberação. A partir dos níveis de pressão do ruído na sala receptora, os quantitativos descritos na Cláusula 3 devem ser avaliados levando em consideração a área de absorção equivalente.”

Normalmente utilizadas para a determinação de coeficientes de absorção sonora, as câmaras reverberantes são utilizadas para produzir campos difusos, os quais não simulam condições de campo livre, sendo estas condições simuladas em câmaras anecoicas (BISTAFA, 2018).

Em recintos reverberantes há ausência de ondas estacionárias, possibilitando um campo uniforme onde o nível da pressão sonora é invariável, independentemente da posição da emissão sonora e da posição do microfone (SOUSA, 2019).

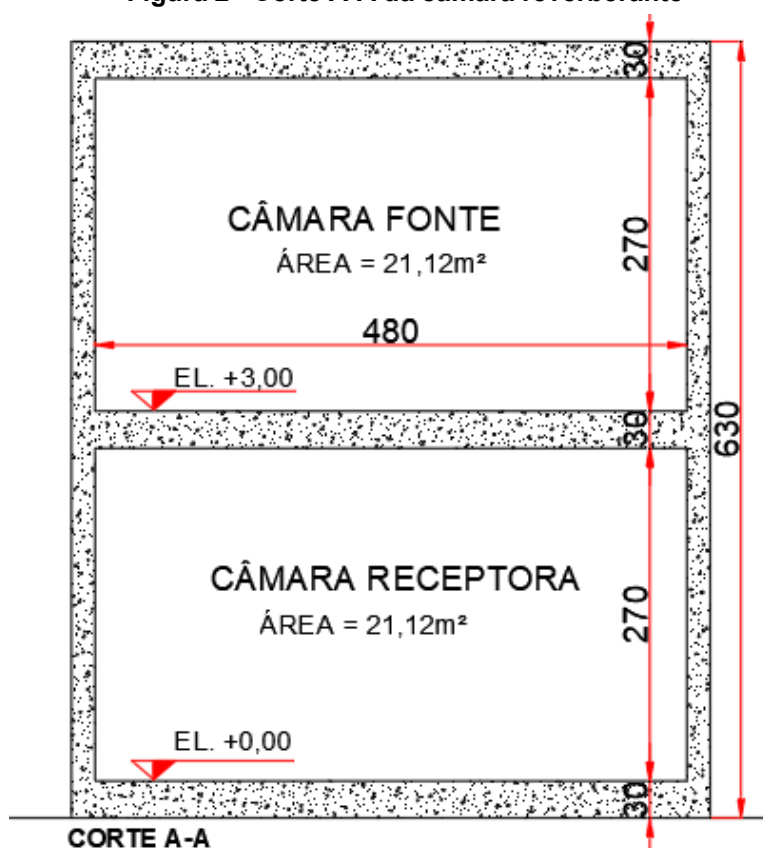
Localizada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, bloco EF da sede Ecoville, a câmara acústica utilizada para os ensaios está esquematizada na Figura 1 e 2 apresentando apenas as salas de interesse para o ensaio, em conformidade à ISO 10140-3 (ISO, 2010).

Figura 1 - Plantas baixas da câmara acústica



Fonte: autoria própria.

Figura 2 - Corte A-A da câmara reverberante



Fonte: autoria própria.

Na câmara fonte (ou sala superior), localiza-se o contrapiso a ser ensaiado, enquanto na câmara receptora (ou sala inferior) deverá estar o operador do analisador de frequências (WILLE *et al.*, 2020).

O item 3 da norma ISO 10140-3 (2010), define os dados de entrada e suas definições. Sendo o nível de pressão de impacto sonoro (L_i) a energia média do nível de pressão sonora medido na sala receptora quando o piso sob teste é excitado pela fonte de impacto padronizada, expresso em decibéis. E o nível de pressão do impacto sonoro normalizado (L_n) é o nível de pressão do impacto sonoro aumentado pelo termo de correção, também em decibéis, pode ser expresso pela Equação 1.

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

A = Área de absorção equivalente medida.

A_0 = Área de absorção equivalente de referência (10 m², segundo a ISO 10140 (2010)).

Afim de constatar o isolamento ao impacto sonoro do elemento ensaiado, o nível de pressão de impacto sonoro normalizado deve ser fornecido em decibéis, em todas as frequências da medição, com a precisão de uma casa decimal, em formato de tabela e em formato de curva (ISO, 2010).

2.1.5. Analisador de Frequências

Os analisadores de frequência são utilizados para medições de vibração. Para o caso dos ensaios acústicos afim de obter o nível de pressão sonora de impacto, o analisador de frequências fornecerá análises estatísticas das variações do nível de som durante o período de interesse (BRÜEL e KJAER, 1984).

Afim de não depender da direção do som incidente, é necessário acoplar, no analisador de frequências, um microfone omnidirecional, ou seja, com as mesmas propriedades em todas as direções, para medir os níveis de pressão sonora. Estes microfones realizam a função de transdutores, ou seja, transformam a natureza da energia e viabilizam sua análise, a partir do fornecimento de uma resposta unidirecional gerada a partir da captação do campo sonoro com incidência aleatória (HOPKINS, 2007).

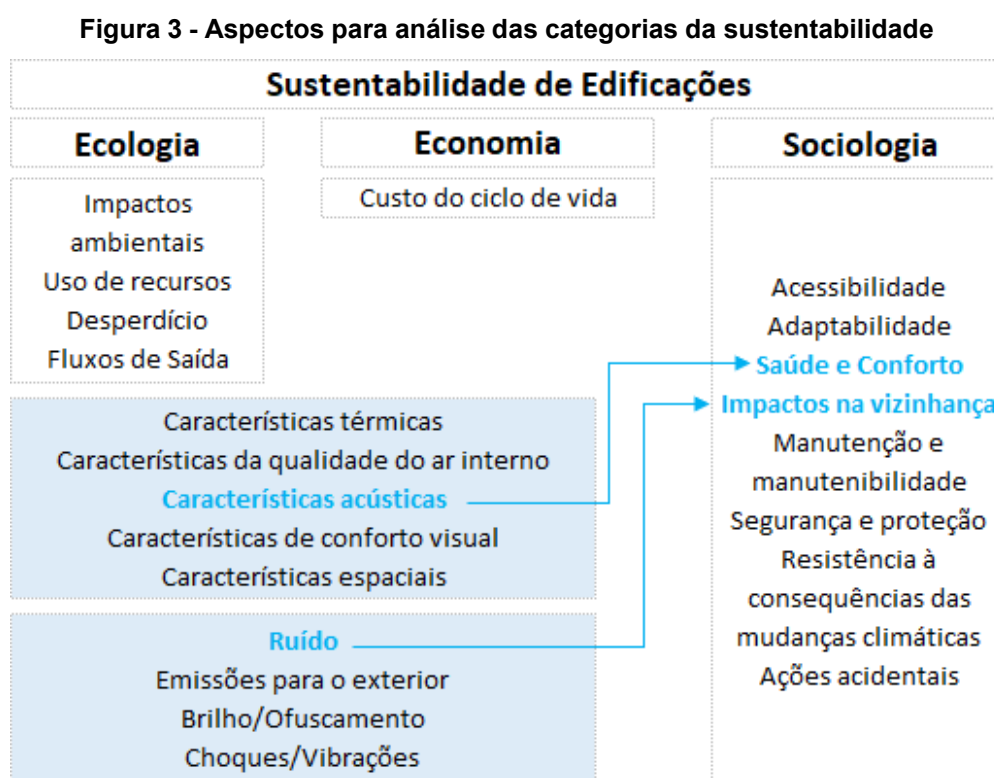
2.1.6. Representação Logarítmica da Sensação Provocada pelo Som

A lei de Weber-Fechner relaciona a resposta sensorial humana quando em face a um estímulo físico. Esta lei estabelece a relação logarítmica entre o estímulo e a sensação, significando que, afim de resultar variações de sensação em progressões constantes (aritméticas), o estímulo deverá variar em progressão geométrica. Muito embora o experimento inicial para a constatação da lei de Weber-Fechner tenha empregado a utilização de pesos para se obter sensações, também pode-se valer do ruído para o mesmo fim (BISTAFA, 2018).

2.2. Sustentabilidade

Pesquisas realizadas em países Europeus destacaram um número considerável de pessoas afetadas por problemas acústicos causados pelo ruído. Considerando que o tópico influencia diretamente na saúde e no bem-estar, a proteção sonora se tornou um indicador para a sustentabilidade social em edificações (DOLEZAL e SPITZBART-GLASL, 2015).

Um esquema de análise com diferentes alternativas que podem ser aplicadas afim de reduzir o impacto ambiental no meio construtivo está ilustrado na Figura 3. O esquema em questão foi utilizado por Dolezal e Spitzbart-Glasl (2015) para aferir se a proteção sonora era tomada como uma questão importante dentro da sustentabilidade em países de língua alemã.



Fonte: Adaptado de Spitzbart-Glasl e Dolezal (2015).

A partir da Figura 3 é pertinente observar que a sustentabilidade não mais está contida apenas na demanda de materiais sustentáveis durante a fase construtiva, mas sim em todo o ciclo de utilização daquela construção. Atualmente o conceito de sustentabilidade tem se destacado também nos aspectos econômicos e sociais, além

de sua finalidade original em poupar recursos não renováveis (DOLEZAL e SPITZBART-GLASL, 2015).

As certificações ambientais são voluntárias, geralmente tomados pela iniciativa privada, que aferem se uma construção foi concebida com performance ecológica, econômica e social, a partir do cumprimento de requisitos sustentáveis pré-estabelecidos. Geralmente, estes certificados estão ligados a propósitos de propaganda, ou seja, para promover a edificação, como é o caso de edificações de alto-padrão ou para melhores taxas no momento do financiamento. Isso se dá em razão desta certificação requerer um processo complexo, onerando ainda mais a construção. Cada país possui uma metodologia para aplicar as inspeções e requisitos, porém estes procedimentos devem estar de acordo com o WGBC (*World Green Building Councils* – Conselho Mundial de Construção Verde) afim de corresponder aos princípios fundamentais da organização. Observa-se o aprofundamento da acústica dentro dos requisitos para a certificação verde em países com normas acústicas avançadas (DOLEZAL e SPITZBART-GLASL, 2015).

Dolezal e Spitzbart-Glasl (2015) destacam que as formas de se melhorar o desempenho acústico de uma edificação devem ser estudadas de forma exaustiva, afim de não favorecer a utilização de materiais não sustentáveis buscando garantir o conforto acústico. Além disso, os pesquisadores também destacam a importância das certificações ambientais no sentido de influenciar na padronização da acústica pelos países, visto sua grande importância para a saúde e bem-estar humanos.

Concordando com a problemática evidenciada pelos pesquisadores austríacos, verifica-se a existência de publicações significativas analisando materiais alternativos quanto ao isolamento acústico. É o caso da análise à performance acústica de camadas feitas com materiais alternativos, como grãos de borracha oriundos da reciclagem de pneus de caminhões, feita por Maderuelo-Sanz *et al.* (2011), ou grãos de cortiça, estudado por Morrillas *et al.* (2014) e Moreira *et al.* (2010), ou, ainda, papel reciclado e amostras de tecidos, performado por Buratti *et al.* (2016).

2.2.1. Materiais não Convencionais Aplicados para Fins Construtivos de Isolamento ao Ruído de Impacto

Buratti *et al.* (2016) destaca a porosidade, o alto custo de produção e o alto impacto ambiental como propriedades comuns entre os materiais utilizados convencionalmente para isolamento acústico (como a lã de rocha, lã de vidro, poliéster, etc.).

Em todas as pesquisas anteriormente mencionadas, os materiais alternativos analisados possuíram resultados satisfatórios em relação a parâmetros acústicos. No caso dos grãos de borracha, os resultados laboratoriais evidenciam que o material alternativo não só pode competir com os materiais disponíveis para comércio, como também pode superá-los em relação à performance do isolamento de ruído (MADERUELO-SANZ *et al.*, 2011).

Estudo realizado por Maderuelo-Sanz *et al.* (2011), implica indiretamente no entendimento sobre a sustentabilidade brasileira, ainda que tenha sido realizado em um país europeu. A importância do estudo reside na dificuldade de destino dos pneus residuais que já não possuem mais utilidade, visto a dificuldade de reinserção do material quando seu propósito inicial já foi cumprido. Levando em conta a predominância do transporte rodoviário no Brasil (MOREIRA *et al.*, 2014), pode-se inferir que a busca de novas tecnologias para a reutilização integral dos pneus e a reciclagem de suas partes componentes como propõe Santos (2017) é válida.

Santos (2017) apresenta aplicações para os resíduos oriundos de pneus sem serventia evidenciando a dificuldade da grande maioria dos municípios brasileiros em se dispor destes resíduos, ainda que a legislação recomende descarte apropriado deste material. O autor relaciona a empregabilidade do resíduo sólido na construção civil, servindo como alternativa, inclusive, para baratear a atividade, visto que os materiais utilizados compõem o maior percentual do custo de uma obra.

Analogamente ao uso de pneus, é possível relacionar o Resíduo de Construção e Demolição (RCD) como uma alternativa para desempenhar a função de agregado na construção de elementos de concreto (ÂNGULO *et al.*, 2001).

O resíduo da construção e demolição (RCD), segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de RCD (ABRECON), é todo aquele gerado no processo de construção, de reforma, escavação ou demolição, conjunto de fragmentos ou restos

de tijolos, concreto, argamassa, aço, madeira, etc., provenientes do desperdício do processo construtivo, reforma e/ou demolição de estruturas, tendo como exemplo prédios, residências e pontes (ABRECON, 2021).

Ribeiro *et al.* (2021), apresenta ensaios acústicos em blocos feitos com concreto e agregado de RCD utilizando a câmara reverberante e o ruído aéreo como principais elementos de ensaio, para o acabamento, foram adotadas opções sustentáveis em substituição à tradicional argamassa de cimento. O resultado do experimento foi satisfatório quanto à utilização de revestimentos sustentáveis, classificando o mais adequado de acordo com sua necessidade de aplicação.

A reciclagem destes materiais mostra-se uma preocupação que parte tanto da iniciativa privada como dos poderes públicos. Para ilustrar essa preocupação, foi promulgada, em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº12.305/10, a qual regulamenta a política nacional de resíduos sólidos, prevendo o correto manejo, bem como a redução da geração de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Um dos principais setores produtivos brasileiros, a construção civil desempenha considerável importância na economia do Brasil sendo a maior consumidora de recursos naturais, englobando de 20 a 50% da exploração desses recursos em nível mundial (JOHN, 2000). A falta de interesse para a correta cobrança e utilização do RCD vem da sua pouca atratividade e preconização quanto a sua qualidade consequência de práticas não muito difundidas e divulgadas para a sociedade (ÂNGULO *et al.*, 2001).

Levando em conta que o processo de seletividade dos materiais não é natural da atividade da construção civil, partindo do ponto de vista econômico, só será interessante reciclar os resíduos se o produto reciclado for competitivo com os recursos naturais daquela região em relação ao custo e quantidade. Materiais reciclados serão mais competitivos em regiões onde não há grande abundância de matéria prima ou exista grande presença de aterros (HENDRIKS *et al.*, 2000).

2.3. Análise estatística de dados

A necessidade da análise estatisticamente certa amostra de dados está evidenciada no grau de importância dado ao valor verdadeiro de certa medição, tendo

em vista que este pode ser mascarado por uma faixa de erro. Segundo Taylor (2012), existe a possibilidade de se eliminar um erro a partir da constatação da origem do mesmo.

Quando um erro é sistemático, está relacionado à acurácia do processo de medição e está relacionado ao ajuste do equipamento, ao uso de procedimentos incorretos ou a falhas conceituais. Nestes casos, é preciso eliminar o erro ou, quando possível, reduzi-los ao mínimo possível através da calibração de equipamentos ou da otimização do processo de medição (TAYLOR, 2012).

A outra possibilidade de erro, porém, não possui a possibilidade de controle do operador, são os denominados erros estatísticos. Estes erros podem estar intrínsecos em variáveis aleatórias nos instrumentos de medidas ou podem ser oriundos de condições externas, como a temperatura ou a umidade do ar. É frequente não encontrar a diferença entre o erro sistemático e o erro estatístico, mas existe maior facilidade na eliminação dos erros sistemáticos. Os algarismos significativos adotados são capazes de determinar o grau de incerteza de determinada medição, além de facilitar a leitura de dados (TAYLOR, 2012).

Taylor (2012) destaca que é comum utilizar a média dos dados para obter o valor de determinada grandeza, porém não deve ser levado em conta isoladamente. Também é possível possuir uma noção do erro de determinada medida ao observar a diferença entre seus dados, quando há a falta de acurácia no arranjo experimental, evidencia-se a discrepância entre os dados e entre estes e sua média. O desvio padrão dos dados é outro fator fundamental para análise dos dados obtidos pois permite avaliar se a grandeza possui um valor verdadeiro e preciso ou, quando não possui valor verdadeiro, como os dados variam em torno da média.

É possível verificar uma relação entre os materiais recicláveis e as propriedades acústicas para elementos de pisos dentro de uma edificação. Porém, não existe procedimento normatizado com a função de mensurar o erro padrão contido em medições realizadas para determinar o nível de ruído de impacto passante.

Ambas as normas ISO 10140 (ISO, 2010), e ABNT NBR ISO 717 (ABNT, 2021) e 12999 (ISO, 2014) recomendam o tratamento da incerteza padrão. Porém, como própria norma que trata da importância deste tratamento, no caso sendo a ISO 12999 (ISO, 2014), aborda que não existem métodos em condições de repetibilidade para o caso do ruído de impacto quando analisando contrapisos sem revestimentos,

evidencia-se a importância desta pesquisa para o tratamento da incerteza padrão nestes tipos de ensaios.

2.3.1. Análise Estatística de Dados Acústicos – ISO 12999

A situação A, constante na norma internacional ISO 12999 (ISO, 2014), refere-se a mensurações laboratoriais de incertezas, sendo estas advindas de ensaios acústicos de elementos de edificações. Segue, portanto, orientações da ISO 10140 (ISO, 2010) para definir o elemento de mensuração, bem como os requisitos para as medições. Esta situação também define que a incerteza padrão é dada pelo desvio padrão da reprodutibilidade.

Conforme mencionado no item 7.3 desta norma, não existem resultados disponíveis para o isolamento acústico quanto ao ruído de impacto em condições de reprodutibilidade. Este item disponibiliza, porém, uma incerteza padrão estimada para quantitativos de número unitário, conforme Tabela 3 (ISO, 2014).

Tabela 3 - Incerteza padrão para quantitativos de número unitário

Descrição	Incerteza padrão (dB)
Nível de ruído passante	1,5

Fonte: Adaptado de ISO 12999 (2014)

O valor apresentado na Tabela 3 se aplica em situações onde o volume da sala receptora e a superfície do elemento de separação são bem definidos. Se não for o caso, a incerteza padrão pode ser maior (ISO, 2014).

O item 7.4 da norma internacional ISO 12999 (ISO 2014) apresenta incertezas padrão para a redução na pressão de impacto sonoro em bandas de um terço de oitava para casos onde há revestimento de pisos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Incertezas padrão para a redução do nível de pressão do impacto sonoro em bandas de um terço de oitava

Frequência (Hz)	Incerteza padrão (dB)
100	1,1
125	1,0
160	1,0
200	1,0
250	1,0
315	1,0
400	1,1
500	1,2
630	1,3
800	1,6
1000	1,9
1250	2,2
1600	2,5
2000	2,8
2500	3,2
3150	3,6

Fonte: Adaptado da ISO 12999 (2014).

A mesma norma internacional também fornece a incerteza padrão para o quantitativo de número unitário obtido em concordância com a ABNT NBR ISO 717-2 (ABNT, 2021), que deve ser de 1,1 dB (ISO, 2014).

Para a aplicação das incertezas, a norma ISO 12999 (2014) estabelece que deve ser aplicado um fator de cobertura, representado pela letra k , ao resultado da incerteza padrão obtido a partir dos cálculos numéricos. Ou seja, k deve ser igual a 1,00 para uma incerteza padrão com 68% de certeza com teste de confiança bicaudal. Para o mesmo cenário, o valor de k é de 1,96 e 2,58 para o nível de confiança de 95% e 99% de certeza, respectivamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Durante o programa de Iniciação Científica da autora (WILLE *et al.*, 2020), foram realizados ensaios acústicos em concordância com o disposto nas normas internacionais ISO 10140 (ISO, 2010) e a ABNT NBR ISO 717 (ABNT, 2021) em placas de contrapiso de 1 m² produzida utilizando diferentes tipos de agregados como o agregado convencional, RCD, argila expandida, borracha e incorporador de ar.

Para os ensaios foram utilizadas duas salas separadas verticalmente por uma laje, onde foi apoiado o contrapiso a ser ensaiado, conforme Figuras 1 e 2. Estas salas são componentes do laboratório acústico da UTFPR, localizado no bloco IJ da sede Ecoville do Campus Curitiba.

Acima do contrapiso objeto do estudo, na sala superior, foi apoiado em cinco posições diferentes, e não sobrepostas, o equipamento produtor do ruído de impacto chamado *tapping machine*, conforme apresentado na Figura 4, o equipamento utilizado está de acordo com as exigências da norma internacional ISO 10140 (2010). Foi necessário a presença de uma pessoa para realizar a operação de iniciar o equipamento e fechar a porta da sala para que não houvesse interferência de ruídos externos.

Figura 4 - *Tapping machine* posicionada acima do contrapiso, na sala superior



Fonte: autoria própria.

Na sala inferior situava-se o analisador de frequências, mostrado na Figura 5, o qual também necessita de um operador a todo momento, realizando cinco medições em marcações pré-dispostas na sala inferior, com a duração de 15 segundos por medição.

Figura 5 - Analisador de frequências na sala inferior posicionado para iniciar a medição



Fonte: autoria própria.

O analisador de frequências possui a função de medir o ruído passante através da laje e do contrapiso para sala inferior. Resultando em 25 (vinte e cinco) medições por placa de contrapiso, uma vez que, a cada posição da *tapping machine* acima do contrapiso analisado, serão feitas cinco medições de 15 segundos pelo analisador de frequências, na sala inferior.

3.2. Métodos

Afim de realizar um estudo com maior aplicabilidade à realidade, foram considerados apenas os valores extraídos dentro de uma faixa de frequência de interesse, adotada como sendo a faixa entre 100Hz-3150Hz. Portanto, levando em conta as 16 frequências adotadas, com 25 dados cada, resultarão em 400 dados dispostos em planilhas eletrônicas, para apenas uma placa de contrapiso. Levando em conta as demais placas, a amostragem será de mais de 10 mil dados.

Tendo em vista que a norma ISO 10140 (2010) prevê a utilização de uma equação logarítmica para a normalização dos dados obtidos experimentalmente, conforme mostrado na Equação 1, são previstos alguns ajustes necessários na metodologia para análise estatística dos dados.

Além de performar a análise estatística dos dados propriamente dita, conforme anteriormente mencionado, também é de interesse deste trabalho de conclusão de curso a verificação da incerteza padrão quanto a adequação à norma internacional ISO 12999 (ISO, 2014) de acordo com o número unitário e uma estimativa de incerteza padrão para as diferentes faixas de frequência, ainda que a norma não forneça valores em condições de repetibilidade quando são analisados contrapisos sem revestimento.

Para o caso dos contrapisos revestidos, é possível verificar a adequação da incerteza padrão gerada através dos dados obtidos e já armazenados quanto à mesma norma de 2014. Para fins de comparação com a norma internacional ISO 12999 (ISO, 2014), o método foi aplicado apenas para placas revestidas com piso vinílico, comparando todos os cinco tipos de agregados: agregado convencional, argila expandida, incorporador de ar, borracha e RCD.

Uma vez que a Equação 1 normaliza o nível de pressão sonora a partir de uma função logarítmica, percebe-se que a distribuição das incertezas acompanha a ordem de grandeza desta equação o que dificulta o cálculo das incertezas padrão.

A Equação 1 foi aplicada em partes, uma vez que foi aplicada a cada de cinco dados por frequência. Então, para a aferição da incerteza padrão, realizou-se a linearização dos dados obtidos a partir da Equação 1 utilizando-se da Equação 2, que na realidade é o inverso da função decibel para cada valor do nível de pressão do impacto sonoro normalizado.

$$L'_n = 10^{\frac{L_n}{10}} \cdot 10^{-12} \quad (2)$$

Onde:

L'_n = Nível de pressão do impacto sonoro normalizado linear (adimensional);

L_n = Nível de pressão do impacto sonoro normalizado dado pela Equação 1, em decibéis.

Somente após o emprego da Equação 2 cinco vezes, seguindo a lógica anteriormente mencionada, calculou-se a média linear conforme a Equação 3.

$$\bar{x} = \frac{L'_{n,1} + L'_{n,2} + L'_{n,3} + L'_{n,4} + L'_{n,5}}{5} \quad (3)$$

Como para dados lineares utiliza-se do desvio padrão e variância para o cálculo da incerteza padrão, justifica-se a necessidade do emprego das Equações 2 e 3, pois sem as mesmas não seria viável calcular a incerteza padrão linear utilizando-se da Equação 4.

$$\sigma_{linear} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

A Equação 4 resulta na incerteza padrão de uma determinada faixa de frequência com 68% de certeza, sendo o número de amostras (n) igual a 5, pois está sendo calculada a partir das cinco médias lineares, calculadas anteriormente.

Este valor de 68% de certeza deve-se ao fato do emprego do desvio padrão como base de cálculo, que é a área de uma gaussiana onde existe maior densidade de dados.

Porém, ao observar a não-linearidade da medida que seria calculada por esta Equação, foi necessária a aplicação do conceito de propagação de erros para transformar a incerteza da frequência para decibéis. A propagação de erros trás, inevitavelmente, a derivada parcial de uma função logarítmica, recaindo na Equação 5.

$$\frac{d \log x}{dx} = \frac{1}{x} \quad (5)$$

Neste caso, a variável x é o nível de pressão do impacto sonoro normalizado (L_n), calculado anteriormente pela Equação 1.

O processo de retorno da grandeza frequência para a função decibéis, em conjunto com a propagação de erros é explicitada na Equação 6, trazendo a incerteza padrão com 68% de certeza.

$$\sigma = \log_{10}(\sigma_{linear} \times 10^{-12}) \times \frac{1}{L_n} \quad (6)$$

Por fim, e conforme o que se estipula em norma, o resultado obtido na Equação 6 foi multiplicado pelo fator de cobertura (k) disposto na ISO 12999 (2014), ou seja, para obter uma incerteza padrão com 95% de certeza, o fator de cobertura foi considerado como $k=1,96$.

Uma ressalva importante é a de que enquanto foi performado o cálculo para a determinação da incerteza padrão, o erro do equipamento foi percebido e

considerado nulo, visto que este é muito menor do que a aleatoriedade dos dados obtidos neste tipo de medição. Seria necessária a calibração rastreada do INMETRO para a efetiva anulação do erro do equipamento, porém, como tal alternativa não foi viável, o erro do equipamento permaneceu considerado nulo, visto a consideração anteriormente mencionada e a impossibilidade de avaliá-lo precisamente.

Desta forma, finalizou-se o método na Equação 6 e os resultados da aplicação deste serão apresentados na sequência, bem como os resultados das Equações 2, 3, 4 e 5 por faixa de frequência, para demonstração.

4. RESULTADOS

Foram analisadas apenas cinco placas revestidas com um mesmo material: o piso vinílico. A escolha foi feita em razão destas placas terem sido as primeiras a serem ensaiadas quando na etapa dos ensaios, feitos antes do início deste trabalho de conclusão de curso.

O método de cálculo apresentado neste trabalho foi aplicado conforme a ordem das Equações previamente apresentadas. E, para um melhor entendimento, será demonstrado a partir de passos, relacionando estas Equações apenas na primeira faixa de frequência (100Hz) e em apenas uma placa de contrapiso.

No caso, trata-se da placa feita utilizando-se RCD como principal agregado e revestida com piso vinílico. Ressalta-se que o método foi repetido para as demais faixas de frequência e para as demais placas de contrapiso de interesse desta análise.

Portanto, a Tabela 5 apresenta, em sua segunda coluna, o nível de pressão do impacto sonoro ainda não normalizado (em dB) correspondente à posição relacionada na primeira coluna. Nas células de cor amarela foi aplicada a Equação 01 para os cinco dados imediatamente acima destas, apresentando nível de pressão do impacto sonoro normalizado (L_n) dos mesmos. Nas células de cor alaranjada, foi empregada a Equação 02, resultando no nível de pressão do impacto sonoro linear normalizado (L'_n), relacionado à célula imediatamente à sua esquerda.

A célula de cor verde, na última linha à direita da Tabela 5, apresenta o resultado da última aplicação (para aquela faixa de frequência) da Equação 01, executando a média dos logaritmos entre os dados das células de cor amarela, resultando no nível de pressão do impacto sonoro normalizado.

Já a célula com a cor azul, da última linha da Tabela 5, demonstra o resultado da aplicação da Equação 03 para os respectivos (L'_n), ou seja, os valores das células apresentadas com a cor alaranjada.

Tabela 5 - Resultados das posições para a frequência de 100Hz da placa de RCD revestida com piso vinílico

Nº da Posição	LZFmax (dB) 100Hz	LINEARIZAÇÃO
Posição 01	60,07	
Posição 02	60,04	
Posição 03	55,52	
Posição 04	56,80	
Posição 05	57,97	
APLICAÇÃO 01	58,44	6,9E-07
Posição 06	67,87	
Posição 07	66,03	
Posição 08	62,61	
Posição 09	64,09	
Posição 10	64,08	
APLICAÇÃO 02	65,33	3,4E-06
Posição 11	59,29	
Posição 12	56,83	
Posição 13	53,96	
Posição 14	57,64	
Posição 15	53,24	
APLICAÇÃO 03	56,76	4,7E-07

Nº da Posição	LZFmax (dB) 100Hz	LINEARIZAÇÃO
Posição 16	63,36	
Posição 17	62,99	
Posição 18	63,41	
Posição 19	61,42	
Posição 20	62,89	
APLICAÇÃO 04	62,87	1,9E-06
Posição 21	64,10	
Posição 22	60,68	
Posição 23	57,90	
Posição 24	60,98	
Posição 25	58,58	
APLICAÇÃO 05	61,02	1,3E-06
MÉDIAS	61,93	1,6E-06

Fonte: autoria própria.

A título de reforço, os dados apresentados na Tabela 5 são os dados de apenas uma faixa de frequência de apenas uma placa de contrapiso, dentre as cinco placas de contrapiso analisadas.

Reunindo os resultados das aplicações, tem-se a Tabela 6, com as respectivas médias seguindo os conformes das Equações 1 e 3.

Tabela 6 - Compilação dos resultados das aplicações e médias logarítmica e linear

Nº APLICAÇÃO	LZFmax (dB) 100Hz	LINEARIZAÇÃO
APLICAÇÃO 01	58,44	6,9E-07
APLICAÇÃO 02	65,33	3,4E-06
APLICAÇÃO 03	56,76	4,7E-07
APLICAÇÃO 04	62,87	1,9E-06
APLICAÇÃO 05	61,02	1,3E-06
MÉDIAS	61,93	1,6E-06

Fonte: autoria própria.

Somente após estes passos, pode-se realizar a aplicação da Equação 4 utilizando-se do resultado fornecido na célula sinalizada com a cor rosa. O resultado da aplicação desta equação será a incerteza padrão linear (σ_{linear}) de 5,3E-07, sinalizado na Tabela 7 com a cor cinza.

Por fim, para transformar a incerteza linear dentro da grandeza dos decibéis, utiliza-se da Equação 6, com os resultados mostrados na Tabela 7, a partir da célula sinalizada com a cor vermelha.

Tabela 7 - Resultados das incertezas padrão

	LZFmax 100Hz	LINEARIZAÇÃO
σ_s	0	0
σ (68%)	0,9	5,3E-07
σ (95%)	1,9	1,1E-06
σ (99%)	2,8	1,6E-06

Fonte: autoria própria.

Desta forma, o resultado obtido para a frequência de 100 Hz da placa de contrapiso feita com agregado RCD e revestida de piso vinílico, seria de um nível de pressão de impacto sonoro normalizado de 61,93 dB com uma incerteza padrão de $\pm 0,9$ dB para 68% de certeza e $\pm 1,9$ dB para 95% de certeza, isto levando em conta a premissa de que o erro do equipamento foi desprezado e, portanto, está representado na Tabela 7, como $\sigma_s = 0$.

Os resultados das demais placas e demais frequências serão demonstrados de forma conjunta para que possa ser feita uma comparação entre as placas analisadas. Iniciando pela Tabela 8, que demonstra apenas os resultados da aplicação do método de cálculo nas placas feitas com agregado convencional e RCD pois não foi viável a demonstração dos dados das cinco placas de forma unificada.

Então, a fim de obter maior clareza na apresentação dos dados, os resultados foram agrupados seguindo a lógica de duas em duas placas, apresentando duas tabelas com duas placas e uma tabela com apenas uma placa, conforme demonstrado na sequência.

Tabela 8 - Resultados das placas de contrapiso feitas com agregado convencional e RCD, revestidas com piso vinílico

PLACA Freq. (Hz)	VINILICO CONVENCIONAL				VINILICO RCD			
	Ln (dB)	σ (95%) (dB)	x^-	σ (95%) lin.	Ln (dB)	σ (95%) (dB)	x^-	σ (95%) lin.
100	51,26	1,61	1,3E-07	2,7E-08	61,93	1,85	1,6E-06	1,1E-06
125	67,61	1,75	5,8E-06	1,6E-06	73,48	1,85	2,2E-05	1,3E-05
160	61,10	1,71	1,3E-06	3,5E-07	68,56	1,84	7,2E-06	4,1E-06
200	62,98	1,88	2,0E-06	1,6E-06	62,90	1,84	1,9E-06	1,2E-06
250	57,98	1,80	6,3E-07	3,3E-07	63,24	1,82	2,1E-06	1,2E-06
315	64,45	1,73	2,8E-06	7,5E-07	61,16	1,84	1,3E-06	8,5E-07
400	52,23	1,66	1,7E-07	4,3E-08	57,87	1,75	6,1E-07	2,3E-07
500	63,02	1,66	2,0E-06	3,5E-07	60,41	1,95	1,1E-06	1,6E-06
630	58,12	1,57	6,5E-07	7,6E-08	54,87	1,89	3,1E-07	3,0E-07
800	47,73	1,55	5,9E-08	1,0E-08	55,82	1,80	3,8E-07	2,1E-07
1000	51,38	1,62	1,4E-07	2,9E-08	47,24	1,65	5,3E-08	1,6E-08
1250	44,37	1,60	2,7E-08	6,9E-09	46,89	1,70	4,9E-08	2,0E-08
1600	44,08	1,76	2,6E-08	1,5E-08	41,35	1,72	1,4E-08	7,3E-09
2000	43,36	1,92	2,2E-08	2,8E-08	41,07	1,88	1,3E-08	1,5E-08
2500	40,21	1,75	1,1E-08	6,5E-09	35,32	1,72	3,4E-09	2,2E-09
3150	38,78	1,71	7,6E-09	4,2E-09	38,78	1,71	7,6E-09	4,2E-09

Fonte: autoria própria.

A Tabela 9 demonstra os resultados do método de cálculo aplicado nas placas feitas com argila expandida e incorporador de ar, revestidas com piso vinílico, sendo o segundo conjunto de resultados apresentado.

Tabela 9 - Resultados das placas de contrapiso feitas com argila expandida e incorporador de ar

PLACA	VINILICO ARGILA				VINILICO AR			
	Freq. (Hz)	Ln (dB)	σ (95%) (dB)	x^-	σ (95%) lin.	Ln (dB)	σ (95%) (dB)	x^-
100	52,27	1,81	1,7E-07	1,1E-07	61,93	1,85	1,6E-06	1,1E-06
125	69,15	1,78	8,2E-06	2,9E-06	73,48	1,85	2,2E-05	1,3E-05
160	67,35	1,85	5,4E-06	3,3E-06	68,56	1,84	7,2E-06	4,1E-06
200	57,71	1,69	5,9E-07	1,5E-07	62,90	1,84	2,0E-06	1,2E-06
250	63,80	1,78	2,4E-06	9,6E-07	63,24	1,82	2,1E-06	1,2E-06
315	54,42	1,69	2,8E-07	7,9E-08	61,16	1,84	1,3E-06	8,5E-07
400	62,55	1,71	1,8E-06	4,5E-07	57,87	1,75	6,1E-07	2,3E-07
500	57,90	1,78	6,2E-07	2,9E-07	60,41	1,95	1,1E-06	1,6E-06
630	52,63	1,77	1,8E-07	9,1E-08	54,87	1,89	3,1E-07	3,0E-07
800	54,31	1,53	2,7E-07	2,9E-08	55,82	1,80	3,8E-07	2,1E-07
1000	48,44	1,76	7,0E-08	3,8E-08	47,24	1,65	5,3E-08	1,6E-08
1250	45,49	1,59	3,5E-08	8,3E-09	46,89	1,70	4,9E-08	2,0E-08
1600	37,93	1,45	6,2E-09	1,1E-09	41,35	1,72	1,4E-08	7,3E-09
2000	33,36	1,56	2,2E-09	8,0E-10	41,07	1,88	1,3E-08	1,5E-08
2500	30,31	1,65	1,1E-09	6,4E-10	35,32	1,72	3,4E-09	2,2E-09
3150	27,94	1,68	6,2E-10	4,5E-10	27,94	1,68	6,2E-10	4,5E-10

Fonte: autoria própria.

A Tabela 10, por sua vez, apresenta os dados obtidos a partir da placa de contrapiso feita com borracha e revestida com piso vinílico sendo, portanto, o terceiro e último conjunto de dados apresentado neste trabalho.

Tabela 10 - Resultados da placa de contrapiso feita com borracha e revestida com piso vinílico

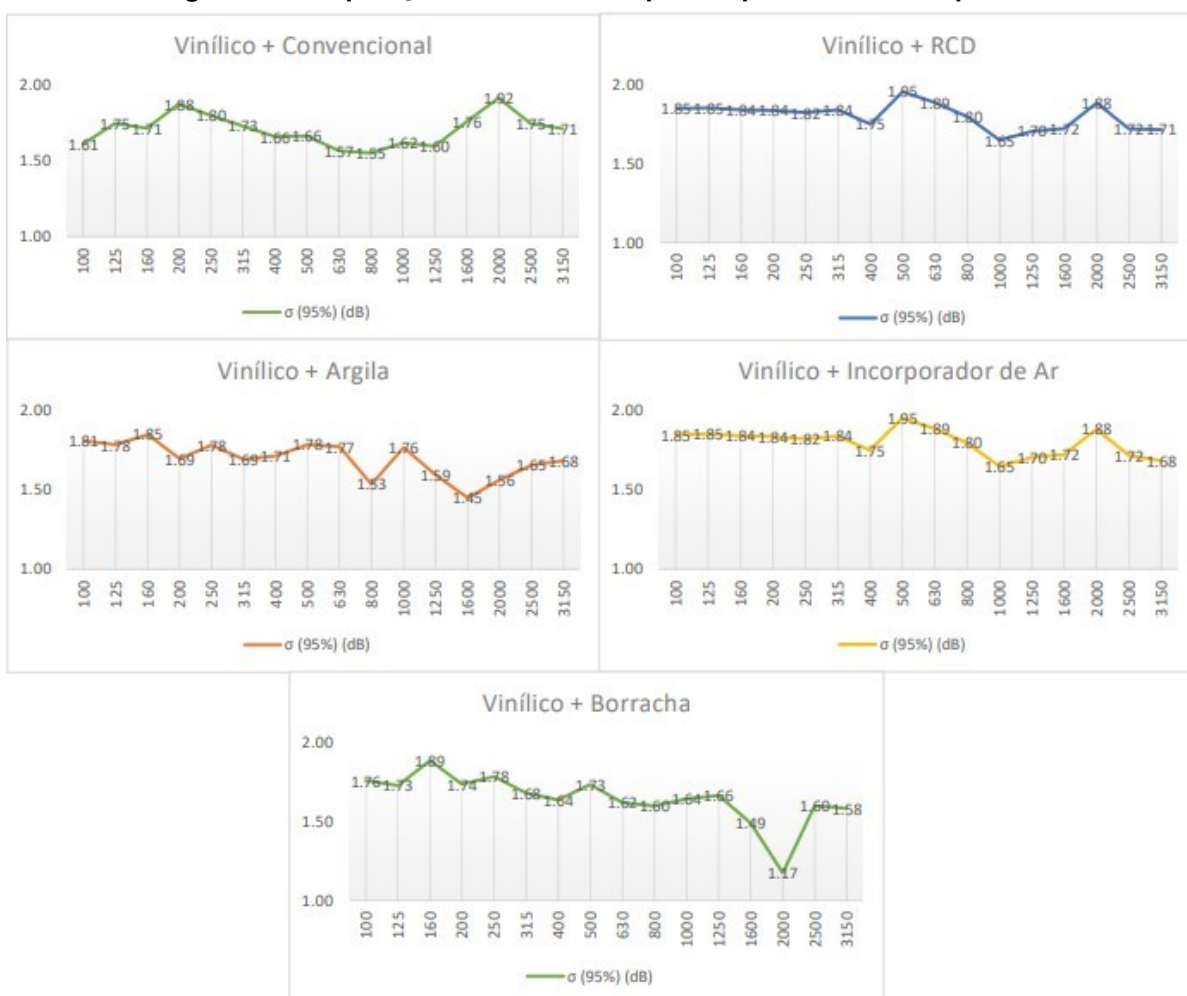
PLACA	VINILICO BORRACHA			
Freq. (Hz)	Ln (dB)	σ (95%) (dB)	\bar{x}	σ (95%) lin.
100	55,19	1,76	3,3E-07	1,4E-07
125	70,19	1,73	1,1E-05	2,3E-06
160	68,02	1,89	6,3E-06	5,2E-06
200	62,98	1,74	2,0E-06	5,9E-07
250	63,37	1,78	2,2E-06	9,0E-07
315	55,01	1,68	3,2E-07	8,3E-08
400	61,68	1,64	1,5E-06	2,2E-07
500	56,68	1,73	4,7E-07	1,7E-07
630	55,75	1,62	3,8E-07	6,5E-08
800	55,95	1,60	3,9E-07	5,9E-08
1000	49,03	1,64	8,0E-08	2,1E-08
1250	48,88	1,66	7,7E-08	2,3E-08
1600	41,89	1,49	1,6E-08	2,6E-09
2000	36,45	1,17	4,4E-09	2,8E-10
2500	34,87	1,60	3,1E-09	1,2E-09
3150	33,76	1,58	2,4E-09	9,4E-10

Fonte: autoria própria.

Observa-se que não é possível comparar, de forma imediata, as cinco placas quando os resultados do método são demonstrados em forma de tabela. Portanto, para uma melhor comparação, os resultados também serão apresentados em forma de gráficos que relacionam a incerteza *versus* a frequência, estes gráficos estarão demonstrados na sequência.

Nestes gráficos, estão plotados os valores obtidos a partir da Equação 6 e demonstrados nas Tabelas 8, 9 e 10 como os valores correspondentes à coluna de título σ (95%) (dB).

Figura 6 - Comparação das incertezas padrão por faixas de frequência.



Fonte: autoria própria.

Em geral, e diferentemente do disposto na norma internacional ISO 12999 (ISO, 2014), os dados apresentam uma tendência de linearidade com leve queda à medida em que a frequência aumenta. Porém, ainda que os dados apresentem comportamentos diferentes daquilo disposto pela norma em questão, a ordem de grandeza está dentro do proposto na norma de 2014.

5. CONCLUSÕES

Foi possível a inferência de um método para o cálculo das incertezas estatísticas, ou incertezas padrão, dos parâmetros de entrada do item 3.2 da norma ISO 10140-3 dentro de uma amostragem que abrangia ensaios de contrapisos feitos de materiais não convencionais.

A partir deste método, verificou-se a coerência dos dados obtidos a partir dos ensaios feitos de placas construídas com materiais não convencionais quando comparados à norma internacional ISO 12999, que determina a incerteza padrão em ensaios acústicos, tanto com fonte de ruído de impacto, interesse deste trabalho de conclusão de curso, como outros tipos de fonte.

Também foi possível a determinação das incertezas estatísticas dos parâmetros de entrada do item 3.2 da norma internacional ISO 10140-3, de forma assertiva e complementar à ISO 12999, para objetos constituídos de materiais não convencionais.

Como sugestão para trabalhos futuros observa-se a aplicação da metodologia nos dados da norma, bem como em dados obtidos a partir de ensaios de contrapisos não revestidos e, por fim, realizar a comparação com os dados normatizados.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria a aplicação do método para dados obtidos a partir de ensaios com o ruído aéreo como principal fonte de distúrbio sonoro, visto sua grande aplicabilidade no cenário da construção civil, sendo interessante a aplicação de ensaios interlaboratoriais, para verificar a repetibilidade do método, conforme menciona a norma internacional ISO 12999.

Por fim, uma terceira sugestão para trabalhos futuros inclui a transformação dos dados para pressão sonora e, somente então, seria executado o cálculo das incertezas.

REFERÊNCIAS

- ABRECON (2021). Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Mercado de Resíduos da Construção e Demolição**. Acesso em 25 de setembro de 2021, disponível em Abrecon: <<https://abrecon.org.br/>>
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S.E; JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 717: **Acústica – Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações**. Rio de Janeiro, 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (8 de março de 1990). Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 1, de 8 de março de 1990: Estabelece diretrizes, critérios para o controle da poluição sonora**.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- BRÜEL e KJAER. **Measuring Sound**. Naerun, Denmark, 1984.
- BURATTI, C. *et al.* **Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization**. Energy Procedia, 2016.
- CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. Brasília: Arch-Tec, 2004.
- DOLEZAL, F; SPITZBART-GLASL, C. **Relevance of Acoustic Performance in Green Building Labels and Social Sustainability Ratings**. Vienna, Austria, 2015.
- HENDRIKS, C. F; JANSSEN, G. M. T. **Application of construction and demolition waste**. Heron, 2001.
- HOPKINS, C. **Sound insulation**. Elsevier, 2007.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-3: **Acoustics – Laboratory Measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Measurement of impact sound insulation**, 2010.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12999-1: **Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation**, 2014.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MADERUELO-SANZ, R. *et al.* **The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction**. Elsevier. Cáceres, Spain, 2011.

MADERUELO-SANZ, R. *et al.* **The performance of resilient layers made from cork granulates mixed with resins for impact noise reduction**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Lei 12.035**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em 15/08/2021.

MOREIRA, A. *et al.* **Impact sound reduction of concrete layers containing cork granules**. Inter noise, Lisbon, Portugal, 2010.

MOREIRA, M. A. L. M. *et al.* **O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências**. Revista Fatec Zona Sul, São Paulo, Brasil. 2014.

OLIVEIRA, A. P. S. **Perda auditiva induzida por ruído ou complicação da otite média crônica?** Tribunal Regional do Trabalho da 12ª Região de Santa Catarina, Joinville, Brasil, 2016.

RIBEIRO, R. S. *et al.* **Sound insulation of a hollow concrete blocks wall made with construction and demolition waste and wood-base panels as linings**. Building Acoustics. DOI: 10.1177/1351010X21993640.

SANTOS, G. B. **Reciclagem de pneus: Vantagens econômicas e ecológicas. Monografia**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 2017.

SOUSA, R. P. **Sustentabilidade e análise acústica: Produção de blocos de concreto com utilização de resíduos da construção civil. Trabalho de conclusão de curso**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2019.

TAYLOR, J. R; **Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições Físicas. 2ª ed.** Bookman, 2012.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Repositório de Outras Coleções Abertas (ROCA)**, 2021. Disponível em <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/>. Acesso em 13 de out. de 2021.

WILLE, V. B.; CATAI, R. E.; HENNEBERG, F. A. **Avaliação dos níveis de ruído de impacto em contrapisos especiais e convencionais.** SICITE. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2020.