



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Atenuação de vibrações por apoios constituídos por aglomerado de cortiça expandida (ICB)**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

**Sara Maria Santos Soares Dias**

Orientadores

**Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão**

**Professor Doutor António José Barreto Tadeu**

**Colaboração Institucional**



Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, julho, 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar os meus agradecimentos aos meus orientadores, Professor Doutor António José Barreto Tadeu e Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão pela oportunidade e pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço de igual forma ao ITeCons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção e a todas as pessoas que dele fazem parte, com especial apreço para os Engenheiros Filipe Pedro e José Nascimento.

Quero agradecer aos meus pais por tudo o que me ensinaram e proporcionaram, porque sem eles não teria conseguido concluir esta etapa. Agradeço à minha irmã mais nova, Catarina, que é a minha pessoa preferida.

Agradeço aos meus amigos de Coimbra que são uma segunda família e que sempre tiveram paciência para mim.

Agradeço ao César, que é o meu melhor amigo.

## RESUMO

Esta dissertação tem como principal objetivo a caracterização dinâmica da cortiça expandida, ICB. Pretende-se avaliar de forma experimental se este material pode ser utilizado como isolador de vibrações provenientes da utilização de equipamentos mecânicos e elétricos.

Procura-se, desta forma, reduzir as vibrações produzidas por equipamentos através de apoios fabricados com um material natural sustentável, produzido a partir de resíduos de cortiça.

Neste estudo são avaliados experimentalmente diferentes parâmetros dinâmicos, tais como, a transmissibilidade, a rigidez dinâmica, e o fator de amortecimento. São testadas amostras com diferentes características, nomeadamente em termos de massa volúmica, espessura, e área, de modo a aferir como estes parâmetros podem influenciar o comportamento dinâmico do material.

Pretende-se com esta pesquisa fornecer informação, como tabelas de dimensionamento de apoios antivibráticos em cortiça. Estas tabelas são obtidas em função do nível de isolamento que se pretende assegurar, da gama de frequências que se pretende isolar e do nível de tensão compressiva a que o material vai estar sujeito. Destas tabelas resultam áreas mínimas e máximas para os apoios de modo a garantir a adequada mitigação de vibrações previamente definida.

## **ABSTRACT**

This dissertation has as main objective the dynamic characterization of expanded cork, ICB. It is intended to experimentally investigate if this material can be used as insulator of vibrations induced by mechanical and electrical equipment.

The final purpose is to reduce the vibrations produced by equipments with supports fabricated with natural and sustainable materials produced with waste of cork.

Different dynamic settings, such as transmissibility, dynamic stiffness and damping factor are experimentally tested in this study. Different specimens are tested, with different characteristics, namely density, thickness, and contact area, in order to investigate how those aspects may influence the dynamic behaviour of the material.

This research seeks to provide information, such as diagrams or tables, suitable for the design of cork-made vibrations' insulators. These tables are obtained according to the intended insulation level, the intended range of frequencies to be insulated and the level of compressive tension that the material will be subjected to. These tables provide minimal and maximal areas for the supports to ensure the suitable mitigation of vibrations previously defined.

---

## ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 1.1   | Enquadramento .....   | 1  |
| 1.2   | Motivação .....   | 3  |
| 1.3   | Objetivos .....   | 4  |
| 1.4   | Estrutura da Dissertação .....  | 5  |
| 2     | CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÃO E ISOLAMENTO .....                                    | 6  |
| 2.1   | Introdução .....  | 6  |
| 2.2   | Equações de Movimento .....   | 6  |
| 2.2.1 | Vibração Livre Amortecida de um Sistema com Um Grau de Liberdade.....               | 6  |
| 2.2.2 | Vibração Forçada Amortecida de um Sistema com Um Grau de Liberdade .....            | 10 |
| 2.2.3 | Vibração Forçada Harmónica Amortecida num Sistema com Dois Graus de Liberdade ..... | 13 |
| 2.2.4 | Transmissibilidade e Isolamento .....   | 14 |
| 3     | CARACTERIZAÇÃO DO ICB .....   | 18 |
| 3.1   | Introdução .....  | 18 |
| 3.2   | Metodologias Experimentais .....  | 18 |
| 3.2.1 | Ensaio de Compressão.....   | 18 |
| 3.2.2 | Ensaio para a Avaliação da Transmissibilidade/Rigidez Dinâmica .....                | 19 |
| 3.2.3 | Ensaio para Determinar o Fator de Amortecimento.....                                | 26 |
| 3.3   | Descrição das Amostras Ensaaiadas.....  | 28 |
| 3.4   | Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais .....                           | 30 |
| 3.4.1 | Compressão .....  | 30 |
| 3.4.2 | Transmissibilidade.....   | 34 |
| 3.4.3 | Rigidez Dinâmica .....  | 46 |
| 3.4.4 | Fator de Amortecimento.....   | 53 |
| 4     | APLICAÇÕES PRÁTICAS .....   | 55 |
| 4.1   | Introdução .....  | 55 |
| 4.2   | Dimensionamento.....  | 55 |
| 4.3   | Apresentação de Tabelas de Dimensionamento .....                                    | 57 |
| 5     | CONCLUSÕES .....  | 70 |
| 5.1   | Considerações Finais .....  | 70 |
| 5.2   | Trabalhos Futuros .....   | 70 |
| 6     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 72 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O ruído e as vibrações podem condicionar o conforto e a qualidade de vida das pessoas. Os requisitos de conforto e as prescrições legislativas têm suscitado a investigação nesta área, e consequentemente desencadeado um progressivo desenvolvimento de materiais e tecnologias construtivas para mitigar a transmissão de vibrações e de ruído.

As vibrações transmitidas pelos elementos estruturais podem estar relacionadas com inúmeras fontes, nomeadamente o funcionamento de alguns equipamentos existentes nos edifícios, atividade industrial, atividade sísmica, tráfego, etc. A redução dessa vibração pode ser alcançada atuando no meio de transmissão, através de aplicação de suportes discretos resilientes.

Os apoios anti vibráteis são suportes discretos resilientes, usualmente constituídos por materiais com baixa transmissibilidade (com relações entre a amplitude das vibrações transmitidas ao sistema recetor e a amplitude das vibrações do sistema emissor muito inferiores a um). Os apoios usualmente disponibilizados no mercado são fabricados com materiais não sustentáveis.

O uso de materiais sustentáveis tem adquirido cada vez mais importância. Hoje em dia, a questão da sustentabilidade é uma preocupação real. Deixamos para trás uma época em que o maior interesse para o mercado era o fator económico, para dar ênfase ao conceito de sustentabilidade que, naturalmente, engloba a questão da economia mas que a coloca ao nível do ambiente e da igualdade social.

Posto isto, é perceptível o interesse académico em conceber soluções mais sustentáveis, quer ao nível dos materiais em geral, quer da construção, quer dos mais variáveis tipos de indústria. Aliada a esta nova área de investigação, estão um mercado e uma sociedade cada vez mais interessados em procurar soluções que não comprometam as gerações futuras. Por outro lado, a legislação, vai no sentido de penalizar os materiais designados de “*no environmentally friendly*” em detrimento daqueles que o são.

---

Por todas as razões explicitadas, considera-se que este tema de dissertação surge em prol de uma necessidade real e num âmbito bastante atual e interessante. Registe-se que neste trabalho existe o interesse direto da empresa Amorim Isolamentos, S.A. que estabeleceu uma parceria com o Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) para a caracterização deste tipo de produtos.

Da análise bibliográfica realizada foi possível encontrar um conjunto de trabalhos com interesse direto para o presente estudo.

(Jardin, Fernandes, Pereira, & Alves de Sousa, 2015) estudaram o comportamento mecânico de diferentes tipos de aglomerados de cortiça. A cortiça é um material com diversas potencialidades e que suscita interesse por ser um produto sustentável. Nesse trabalho foram estudados diferentes tipos de cortiça, nomeadamente, cortiça expandida (ICB) e aglomerado de cortiça natural. Foram realizados ensaios de compressão de modo a obter-se o módulo de Young das amostras através de curvas de tensão-extensão. Foi possível perceber que as amostras com menor massa volúmica apresentavam um menor módulo de Young e um patamar de cedência menor durante as fases de deformação. Para além desta análise, foram realizados ensaios para averiguar a capacidade do material em manter a sua resistência ao impacto durante múltiplos impactos. O objetivo destes testes era saber se a cortiça poderia ter aplicações como absorvedor de energia e substituir soluções não sustentáveis. Concluiu-se que o aglomerado de cortiça apresenta a menor degradação de propriedades e tem potencial de aplicação face a elevados níveis de energia de impacto. A variação de algumas características do material, como sejam o tamanho do granulado ou o aglutinante influenciam muitos parâmetros tais como o módulo de elasticidade e a força de densificação. Deste modo, o interesse em modificar estas propriedades depende da aplicação final do material.

(Maes, Sol, & Guillaume, 2006) estudaram a medição das propriedades dinâmicas de carris de comboio. Este estudo é relevante para a presente dissertação uma vez que se refere ao método indireto para medição de propriedades de transmissão vibro-acústica de elementos resilientes, mesmo método utilizado nesta dissertação. No entanto em termos experimentais não foi utilizado este método, mas sim o método direto. Foi determinada a rigidez dinâmica e o fator de perdas. Estas propriedades foram medidas numa gama de frequências dos 20-2500 Hz para diferentes pré-cargas de modo a simular cargas equivalentes ao peso dos comboios. Este artigo inclui medições experimentais e o desenvolvimento de um modelo que incorpora a não linearidade do amortecimento. Os ensaios realizados mostram a influência do tipo de carril, da frequência de excitação e da pré-carga nos valores de rigidez dinâmica e fator de perdas.

---

(Thompson, Vliet, & Verheij, 1998) estudaram o desenvolvimento do método indireto para a medição da transmissibilidade de elementos resilientes. Este método consiste na medição da aceleração no topo e na base dum sistema com dois blocos de massas conhecidas, entre os quais é colocado o material resiliente que se pretende testar. No topo é aplicada uma pré-carga estática e, no bloco superior a frequência de vibração é introduzida através de excitadores eletrodinâmicos, tornando o sistema, num sistema forçado. O equipamento apoia em molas de rigidez conhecida. Constata-se que o método indireto providencia um meio fiável de medição da transmissibilidade de elementos resilientes nas baixas frequências. É referido no artigo, a preparação de uma norma europeia para este tipo de medições. A mesma foi concebida anos mais tarde (ISO 10846-3:2002) e serviu de base para a criação do equipamento, no qual foram realizados ensaios para a presente dissertação.

(Xiao & Xingjian , 2012) estudaram, para um sistema dinâmico com um grau de liberdade, o efeito da não linearidade do amortecimento. É demonstrado através de uma abordagem numérica que o isolamento melhora considerando os termos de ordem cubica do amortecimento não linear.

## 1.2 Motivação

A comunidade científica e os industriais da cortiça tem vindo, ao longo dos últimos anos, a procurar novas áreas de aplicação para a cortiça. A sua versatilidade permite-lhe aplicações desde a indústria do calçado/vestuário até à indústria naval. Este interesse reside essencialmente na preocupação em substituir materiais pouco ecológicos por outros mais sustentáveis e com características semelhantes, permitindo desta forma o aproveitamento de desperdícios e a redução do impacto ambiental gerado.

As propriedades da cortiça são inúmeras e resultam da sua constituição química complexa. A cortiça apresenta baixa condutibilidade térmica; boa resistência ao fogo; baixo coeficiente de Poisson; grande capacidade de dissipação de energia (em vibrações); grande capacidade de absorção de energia (impacto), elevada deformabilidade, entre outras. Para além de todas estas características, a cortiça é imputrescível e tem uma elevada resistência ao desgaste e ao ataque de insetos. Por todas estas razões a aplicação da cortiça na construção civil é uma área que se tem vindo a desenvolver e que apresenta um elevado potencial de crescimento no futuro.

Atualmente, os principais produtos utilizados em aplicações na construção civil, são os aglomerados e os granulados. Neste âmbito, este tipo de produtos surgem também como possíveis substitutos de materiais com bom desempenho em termos dinâmicos. Contudo, são



---

necessários estudos que corroborem estas características. Assim, surge a necessidade da realização de ensaios laboratoriais que validem a introdução deste material no mercado dos apoios antivibráticos.

A vantagem em explorar as características deste material nacional é, ainda, mais relevante, uma vez que Portugal é o maior produtor mundial de cortiça.

Cerca de 80% da cortiça produzida mundialmente é transformada na Península Ibérica, cabendo mais de 75% a Portugal. Os desperdícios da produção de rolha constituem a matéria-prima dos aglomerados (33%) e dos granulados (3%) (Costa, 2011).

### **1.3 Objetivos**

Esta dissertação visa a caracterização dinâmica de amostras de aglomerado de cortiça expandida (ICB), com diferentes massas volúmicas, espessuras e dimensões, com o objetivo de averiguar a possibilidade de a mesma poder ser utilizada para atenuação de vibrações.

Serão determinadas as frequências de ressonância, a transmissibilidade, a rigidez dinâmica e amortecimento para diferentes condições de carga.

Os três primeiros parâmetros são obtidos a partir da aplicação do método indireto, descrito na norma ISO 10846-3:2002. De acordo com as indicações da citada norma, foi desenvolvido um equipamento que permite determinar os referidos parâmetros. Este é equivalente a um sistema forçado com dois graus de liberdade, com movimentos na direção vertical.

O amortecimento é estimado através do método do decremento logarítmico, em que o fator de amortecimento é dado pela relação entre a amplitude dos picos após um número de ciclos sucessivos. Neste caso o sistema concebido é apenas com um grau de liberdade.

Como já foi indicado, o propósito principal deste estudo é a caracterização dinâmica de amostras de ICB. No entanto, com esta dissertação pretende-se, ainda, compilar os resultados obtidos de uma forma estruturada com o objetivo de auxiliar os projetistas no dimensionamento deste tipo de apoios anti vibráteis.

---

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação será organizada em cinco capítulos. O primeiro, o presente capítulo, é meramente introdutório. Neste é apresentado o enquadramento do tema, a motivação que levou à realização desta dissertação, e listados os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo dedica-se à apresentação de conceitos básicos de dinâmica. São explicitados os fundamentos teóricos com interesse direto na abordagem experimental realizada, nomeadamente a vibração livre amortecida para um grau de liberdade e a vibração forçada harmónica amortecida para um e dois graus de liberdade. Para além disso, são apresentadas algumas noções sobre transmissibilidade e isolamento de vibrações.

No terceiro capítulo, o mais extenso, aborda-se a caracterização dinâmica do ICB. São descritas as metodologias experimentais utilizadas para a obtenção dos parâmetros dinâmicos que se pretendem aferir. Dentro deste capítulo são descritos os procedimentos de ensaio adotados assim como os equipamentos utilizados para a realização dos mesmos.

Para a caracterização do material, é conveniente ter um conhecimento mais detalhado do mesmo e das suas características. Neste estudo são testadas vários tipos de amostras, que diferem entre si em três parâmetros diferentes, mais especificamente, dimensão, espessura e massa volúmica. Este capítulo termina com a apresentação e análise dos resultados experimentais. Assim, os resultados dos ensaios, já descritos e explicitados previamente, são apresentados essencialmente com recurso a gráficos, uma vez que desta forma se facilita a leitura e a interpretação dos resultados.

O capítulo quatro ilustra a forma como os resultados laboratoriais obtidos podem ser utilizados no dimensionamento de apoios antivibráticos, contribuindo para a entrada do produto no mercado. Deste modo, privilegia-se a exploração das aplicações práticas do material testado. Serão criadas e desenvolvidas tabelas de dimensionamento, as quais permitirão escolher/dimensionar apoios anti vibráteis para utilizar na presença de um equipamento concreto, com uma certa massa, com determinadas dimensões e que gerem vibrações em determinada gama de frequências.

Por fim serão apresentadas as conclusões do estudo e as referências bibliográficas.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÃO E ISOLAMENTO

### 2.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se apresentar alguns conceitos básicos sobre vibrações e isolamento, de modo a contextualizar os ensaios que serão realizados.

As vibrações são, na grande maioria das vezes, energia dissipada e indesejável. No caso concreto de vibrações com origem em equipamentos mecânicos e elétricos, estas podem produzir ruído, transmitir cargas dinâmicas e gerar deslocamentos. Para estudar a forma de eliminar/mitigar estes efeitos adversos é relevante conhecer fisicamente como estes fenómenos ocorrem, pelo que se verifica necessário analisar as equações do movimento dos sistemas dinâmicos envolvidos.

Apresentam-se, neste capítulo, as equações do movimento para sistemas com um e dois graus de liberdade, em regime livre e forçado. Estas equações permitirão, mais tarde, uma interpretação mais fácil dos ensaios realizados para o cálculo da transmissibilidade, da rigidez dinâmica e do fator de amortecimento dos vários sistemas.

### 2.2 Equações de Movimento

#### 2.2.1 Vibração Livre Amortecida de um Sistema com Um Grau de Liberdade

Um sistema com um grau de liberdade constitui o sistema mais simples, podendo este ser representado através do esquema da figura 2.1.

Neste sistema, designado de sistema massa-mola, a massa  $m$  pode apenas mover-se horizontalmente. O deslocamento ao longo do tempo,  $u(t)$ , em relação à posição de equilíbrio estático do sistema, permite definir a localização da massa no tempo.

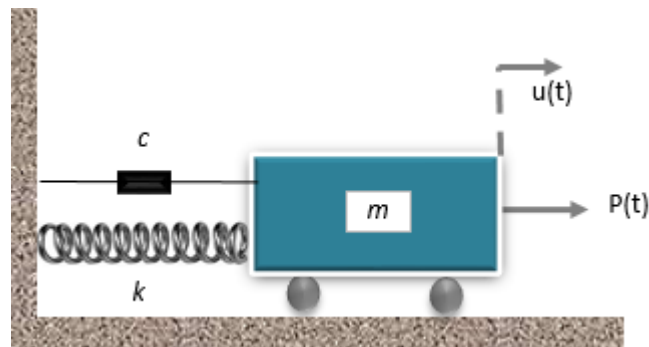


Figura 2.1 - Esquema de um sistema com 1 grau de liberdade.

Este sistema integra a massa ( $m$ ), a mola ( $k$ ) e o amortecedor ( $c$ ), que representam respetivamente, o corpo, a elasticidade e o amortecimento do sistema.  $P(t)$  representa uma carga aplicada.

O equilíbrio de forças deste sistema permite obter a equação de movimento:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (2.1)$$

Nesta equação,  $\dot{u}(t)$  e  $\ddot{u}(t)$  representam a velocidade e a aceleração do sistema, respetivamente. Se  $P(t) = 0$ , o sistema é denominado de livre.

No sistema livre, é necessária a existência de uma perturbação que provoque o seu desequilíbrio para que ocorra movimento. Ou seja uma das condições iniciais, deslocamento ou velocidade terá de ser diferente de zero.

A resposta em vibração livre, obtida para a equação 2.1, pode ser expressa na forma:

$$u(t) = Ae^{st} \quad (2.2)$$

onde  $A$  é a amplitude do movimento. Deste modo,

$$(ms^2 + cs + k)Ae^{st} = 0 \quad (2.3)$$

Dividindo esta equação por  $mAe^{st}$ , obtém-se:

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m} = 0 \quad (2.4)$$

Na presença de dissipação de energia no sistema, amortecimento, a solução da equação anterior é calculada pela seguinte equação:

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \quad (2.5)$$

em que  $\omega$  é a frequência natural dada por  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ . A frequência natural de vibração é intrínseca do próprio sistema e não depende do carregamento. Fisicamente, corresponde à frequência de vibração do sistema quando este sai da situação de equilíbrio.

Na equação 2.5, o valor do termo sobre efeito da raiz quadrada, (negativo, positivo ou nulo), define três tipos de amortecimento/deslocamentos. No caso deste termo ser nulo, está-se perante um amortecimento denominado de crítico, que corresponde a um fator de amortecimento,  $\xi$ , igual à unidade. O fator de amortecimento,  $\xi$ , é o quociente entre o amortecimento  $c$  e o amortecimento crítico,  $c_{cr} = 2m\omega$ .

Neste caso,  $s_1 = s_2 = -\frac{c_{cr}}{2m} = -\omega$ . Desta forma, como  $s_1 = s_2$  a solução da equação 2.3 é:

$$u(t) = (A_1 + A_2 t) \exp(-\omega t) \quad (2.6)$$

Através das condições iniciais, definem-se os valores das constantes  $A_1$  e  $A_2$ , obtendo-se assim a seguinte expressão:

$$u(t) = [u(0)(1 - \omega t) + \dot{u}(0)t] \exp(-\omega t) \quad (2.7)$$

em que  $u(0)$  e  $\dot{u}(0)$  correspondem ao deslocamento e velocidade iniciais do sistema, respetivamente. A figura 2.2 representa a resposta de um sistema livre com amortecimento crítico para condições iniciais de deslocamento e velocidade diferentes de zero.

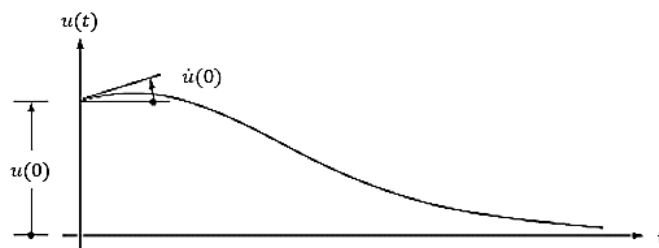


Figura 2.2 - Resposta de um sistema livre com amortecimento crítico.

O amortecimento pode ser subamortecido e nesse caso o fator de amortecimento é menor que a unidade. Esta é a situação mais comum em estruturas de engenharia civil, em que o valor do fator de amortecimento ronda, frequentemente, os 5%.

Substituindo-se, na equação 2.5,  $\frac{c}{2m\omega}$  pelo fator de amortecimento,  $\xi$ , obtém-se:

$$s_{1,2} = -\xi\omega \pm i\omega_D \quad (2.8)$$

em que  $\omega_D$  é a frequência amortecida,

$$\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

A substituição da equação 2.8 na equação 2.1 permite obter a equação:

$$u(t) = [A_1 \exp(i\omega_D t) + A_2 \exp(-i\omega_D t)] \exp(-\xi\omega t) \quad (2.9)$$

Esta equação pode ser escrita, de uma forma trigonométrica equivalente, do seguinte modo:

$$u(t) = [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] \exp(-\xi\omega t) \quad (2.10)$$

Através das condições iniciais  $u(0)$  e  $\dot{u}(0)$ , a equação 2.10 toma a seguinte forma:

$$u(t) = \left[ u(0) \cos \omega_D t + \left( \frac{\dot{u}(0) + u(0)\xi\omega}{\omega_D} \right) \sin \omega_D t \right] \exp(-\xi\omega t) \quad (2.11)$$

Alternativamente a resposta pode ser escrita da seguinte forma:

$$u(t) = \rho \cos(\omega_D t + \theta) \exp(-\xi\omega t) \quad (2.12)$$

em que:

$$\rho = \left\{ u(0)^2 + \left( \frac{\dot{u}(0) + u(0)\xi\omega}{\omega_D} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{e} \quad \theta = -\tan^{-1} \left( \frac{\dot{u}(0) + u(0)\xi\omega}{\omega_D u(0)} \right)$$

Em termos gráficos o deslocamento de um sistema com amortecimento subcrítico pode ser do tipo representado na figura 2.3. No caso ilustrado, o sistema é sujeito a um deslocamento inicial diferente de zero e a uma velocidade inicial nula.

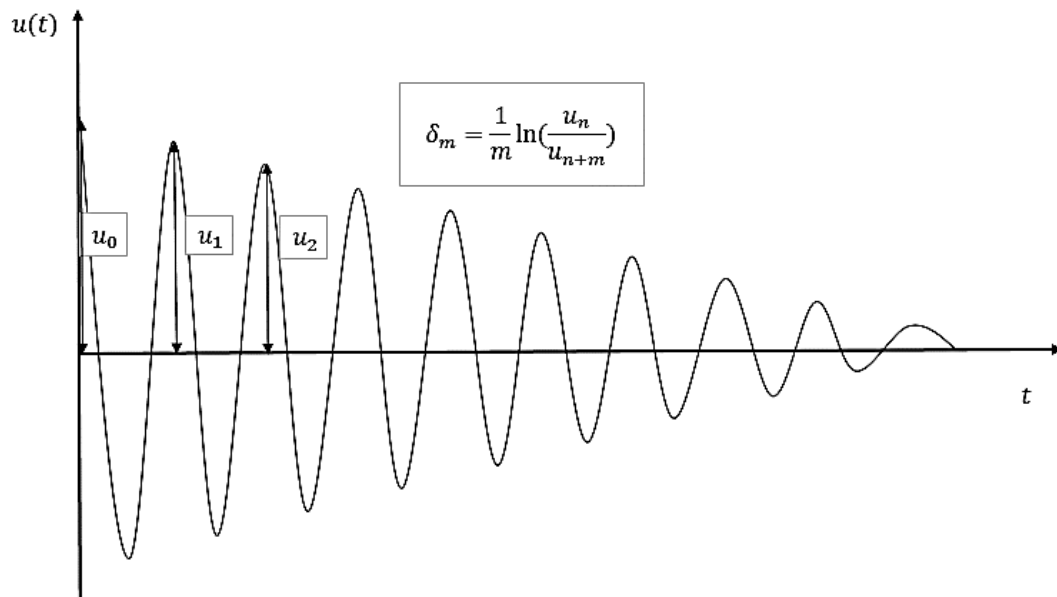


Figura 2.3 - Resposta em vibração livre com amortecimento subcrítico.

O logaritmo da relação  $\frac{u_n}{u_{n+m}}$ , em que  $u_n$  e  $u_{n+m}$  representam amplitudes entre  $m$  ciclos, é denominado de decremento logarítmico,  $\delta_m$ . O fator de amortecimento,  $\xi$ , pode ser estimado através do valor deste decremento logarítmico.

$$\delta_m = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{u_n}{u_{n+m}}\right) = \frac{2\pi\xi\omega}{\omega_D} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.13)$$

O movimento superamortecido é caracterizado pelo facto de a resposta não oscilar em torno da posição de equilíbrio. Neste caso, o fator de amortecimento,  $\xi$ , é superior à unidade. Esta é uma situação muito pouco comum, pelo que não é aqui indicada a sua solução.

### 2.2.2 Vibração Forçada Amortecida de um Sistema com Um Grau de Liberdade

Um sistema designa-se forçado, quando sobre este atua uma carga exterior e/ou quando se regista o movimento da sua base. A equação do movimento de um sistema forçado amortecido com um grau de liberdade adquire a seguinte forma:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p_0 \sin \bar{\omega}t \quad (2.14)$$

Nesta equação,  $\bar{\omega}$  é a frequência de excitação da carga exterior. No presente estudo, é apenas considerado o caso da vibração forçada para um sistema com um grau de liberdade com amortecimento subcrítico, uma vez que este é o caso com interesse direto para esta dissertação. A solução desta equação (2.14) resulta da soma de uma solução particular (2.16) com uma solução complementar (2.15), obtida para a resposta em vibração livre.

$$u_c(t) = [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] \exp(-\xi \omega t) \quad (2.15)$$

Uma das soluções particulares pode ser dada por:

$$u_p(t) = G_1 \cos \bar{\omega} t + G_2 \sin \bar{\omega} t \quad (2.16)$$

em que:

$$G_1 = \frac{p_0}{k} \left[ \frac{-2\xi\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right]$$

$$G_2 = \frac{p_0}{k} \left[ \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right]$$

em que  $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$ . Assim, a solução da equação 2.14 toma a seguinte forma:

$$u(t) = [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] \exp(-\xi \omega t) + \frac{p_0}{k} \left[ \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] [(1-\beta^2) \sin \bar{\omega} t - 2\xi\beta \cos \bar{\omega} t] \quad (2.17)$$

O primeiro termo desta equação representa a parte transiente da resposta (ver figura 2.4), dependente apenas das condições iniciais, de deslocamento e de velocidade. O segundo termo da equação representa a resposta estacionária, contínua no tempo, dependente da força exterior aplicada (ver figura 2.5).

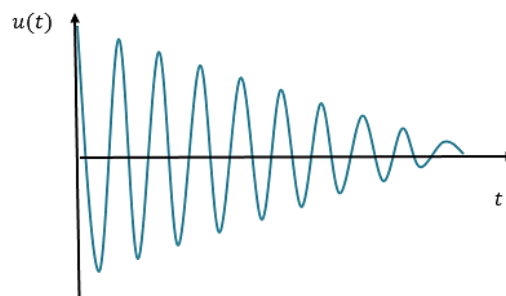


Figura 2.4 – Parte da resposta transiente.



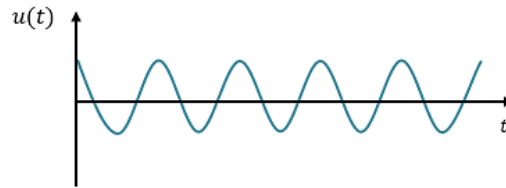


Figura 2.5 - Parte da resposta estacionária.

A componente transitória tem essa designação porque a sua amplitude decresce ao longo do tempo e acaba por desaparecer. Em termos práticos é a resposta estacionária/ permanente que interessa analisar pois é essa que prevalece no tempo.

A resposta em regime permanente pode também ser escrita como uma única função sinusoidal.

$$u(t) = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.18)$$

A amplitude  $A$  desta solução particular é dada por:

$$A = \frac{1}{\sqrt{[1-\beta^2]^2 + (2\xi\beta)^2}} \frac{p_0}{k} = D \frac{p_0}{k} \quad (2.19)$$

em que  $D$  é o coeficiente de amplificação dinâmica do deslocamento. Note-se que, se a força  $P(t)$  for aplicada estaticamente, o deslocamento seria:  $A_{estático} = \frac{p_0}{k}$ , pelo que a amplitude do deslocamento dinâmico corresponde a:  $A_{dinâmico} = DA_{estático}$ .

O coeficiente de amplificação dinâmica é unitário quando o carregamento é estático ( $\beta = 0$ ) e tende para zero quando a frequência de excitação tende para infinito, (ver figura 2.6). Para frequências de excitação muito elevadas as forças de inércia sobrepõem-se às forças elásticas e de amortecimento e tendem para infinito.

O valor máximo do coeficiente de amplificação dinâmica ocorre quando  $\beta = \sqrt{1 - 2\xi^2}$ , sendo  $D_{máx} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$ . Desta forma, na presença de amortecimento,  $\xi > 0$ , o coeficiente de amplificação dinâmica máximo ocorre sempre para valores de  $\beta$  inferiores a um. Quando a frequência de excitação iguala a frequência natural do sistema, ou seja  $\beta = 1$ ,  $D_{\beta=1} = \frac{1}{2\xi}$ . Caso o amortecimento fosse nulo, o fator de amplificação dinâmica tenderia para infinito, (ver figura 2.6). Refira-se que apenas se regista o fenómeno de ressonância quando  $\xi < 1/\sqrt{2}$ .

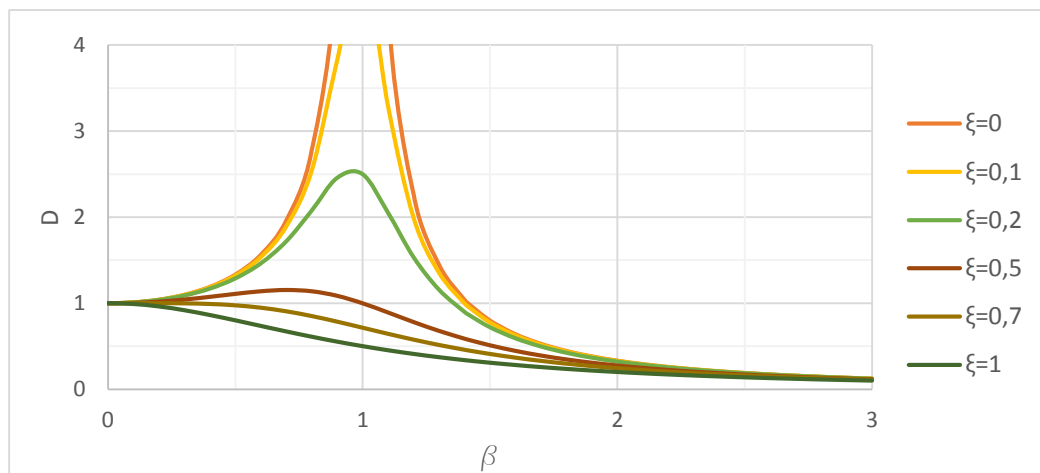


Figura 2.6 - Variação do fator de amplificação dinâmica com o amortecimento e o parâmetro  $\beta$ .

### 2.2.3 Vibração Forçada Harmônica Amortecida num Sistema com Dois Graus de Liberdade

Neste caso, o sistema pode ser visto como sendo constituído por duas massas,  $m_1$  e  $m_2$ , (ver figura 2.7), sendo necessário conhecer os seus deslocamentos.

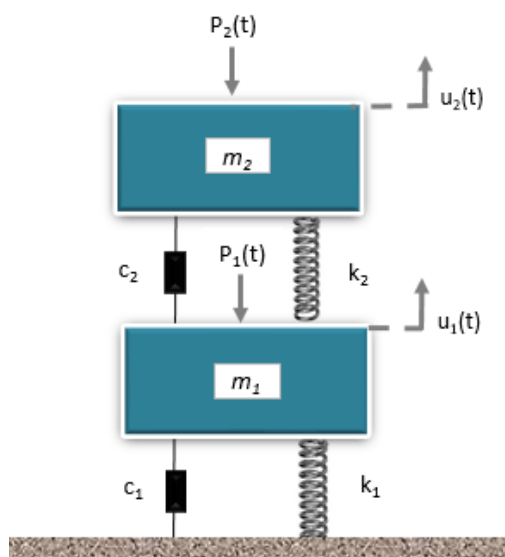


Figura 2.7 - Sistema com 2 graus de liberdade.

Assim, podem ser escritas duas equações distintas de movimento, que representam o equilíbrio de cada uma das massas. Usando uma notação matricial, estas equações podem escrever-se da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Como consequência, um sistema com dois graus de liberdade tem duas frequências naturais de vibração. Para a definição das frequências naturais de vibração,  $P_1(t) = 0$ ,  $P_2(t) = 0$ ,  $c_1 = 0$  e  $c_2 = 0$ .

Sendo,  $u_1(t) = A \sin(\omega t)$  e  $u_2(t) = B \sin(\omega t)$ , obtem-se:

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2) - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

A solução diferente de zero é obtida igualando a zero o determinante.

$$\det \begin{vmatrix} (k_1 + k_2) - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.22)$$

Pelo que,

$$\omega_1^2 = \frac{m_2 k_1 + m_1 k_2 + \sqrt{(m_2 k_1 + m_1 k_2)^2 - 4(m_1 m_2)(k_1 k_2)}}{2(m_1 m_2)} \quad (2.23)$$

e

$$\omega_2^2 = \frac{m_2 k_1 + m_1 k_2 - \sqrt{(m_2 k_1 + m_1 k_2)^2 - 4(m_1 m_2)(k_1 k_2)}}{2(m_1 m_2)} \quad (2.24)$$

## 2.2.4 Transmissibilidade e Isolamento

A eficiência do isolamento é indicada através de um parâmetro, a transmissibilidade. A transmissibilidade é assim, a relação de amplitude entre a força transmitida à base e a força exterior imposta. A figura 2.8 representa um sistema de isolamento de vibrações.

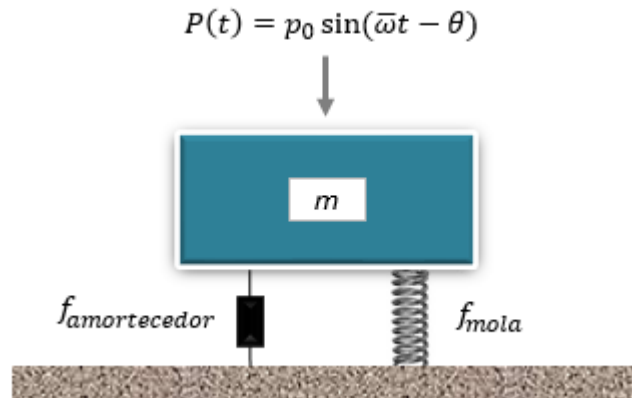


Figura 2.8 - Sistema de isolamento de vibrações.

A força total transmitida à base resulta da soma das forças elásticas com as forças de amortecimento.

$$f_{total} = f_{mola} + f_{amortecedor} \quad (2.25)$$

A resposta estacionária, tal como já referido, permanece ao longo do tempo, sendo esta a que interessa analisar. Desta forma, e de acordo com o que foi apresentado para a vibração forçada amortecida para sistemas com um grau de liberdade, a resposta em regime permanente é dada pela equação 2.26.

$$u(t) = \frac{p_0}{k} D \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.26)$$

em que  $D$  é o fator de amplificação dinâmica.

Sendo a força na mola,  $f_{mola} = ku(t)$ , e a força no amortecedor,  $f_{amortecedor} = c\dot{u}(t)$ , obtém-se:

$$f_{mola} = p_0 D \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.27)$$

$$f_{amortecedor} = 2\xi\beta p_0 D \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.28)$$

Como as duas forças estão desfasadas de  $90^\circ$ , a força máxima será dada por:

$$f_{t \text{ máx}} = \sqrt{f_{mola}^2 + f_{amortecedor}^2} = p_0 D \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.29)$$

Deste modo, a transmissibilidade é dada pela relação entre a força total e a força inicial, pelo que se obtém:

$$TR = \frac{f_t}{f_0} = \frac{p_0 D \sqrt{1+(2\xi\beta)^2}}{p_0} = \frac{\sqrt{1+(2\xi\beta)^2}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\xi\beta)^2}} \quad (2.30)$$

A figura 2.9 expressa a transmissibilidade em função  $\beta$ . Para valores de  $\beta$  inferiores a  $\sqrt{2}$ , o efeito da amplificação do deslocamento faz com que a força na mola seja preponderante em relação à força no amortecedor, sendo que quanto maior é o amortecimento menor é esse efeito. Por outro lado, para valores de  $\beta$  superiores a  $\sqrt{2}$ , a força no amortecedor passa a ser preponderante face à força na mola.

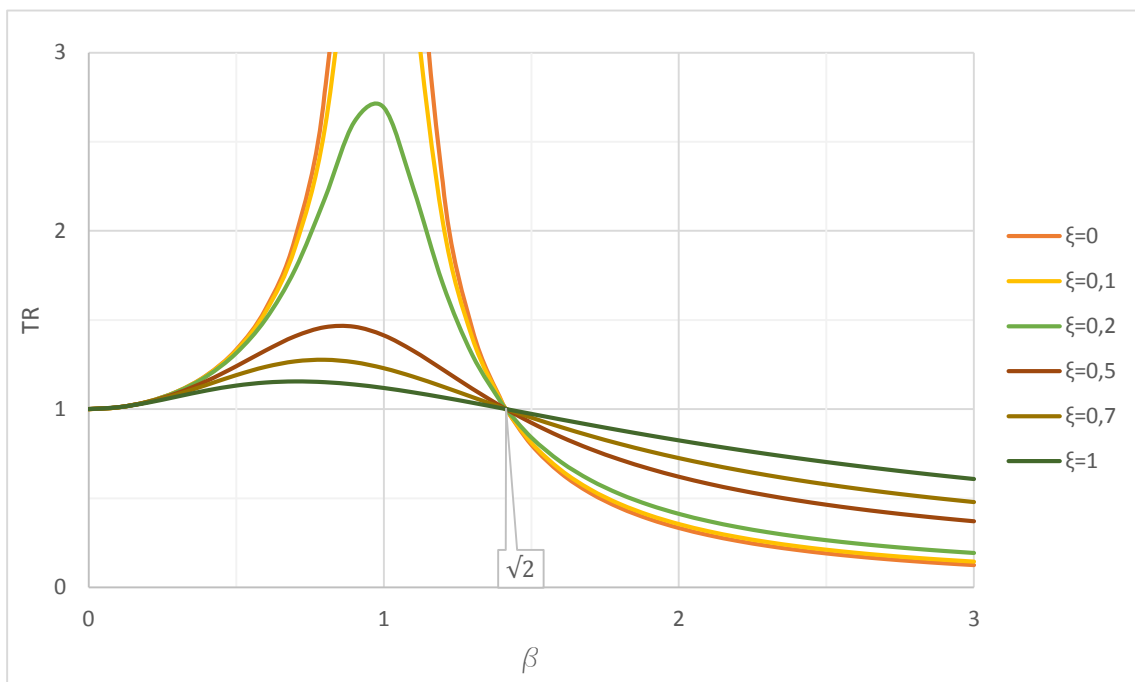


Figura 2.9 - Relação entre a transmissibilidade e o parâmetro  $\beta$ .

A figura 2.10 representa uma curva de transmissibilidade em função da frequência de excitação.

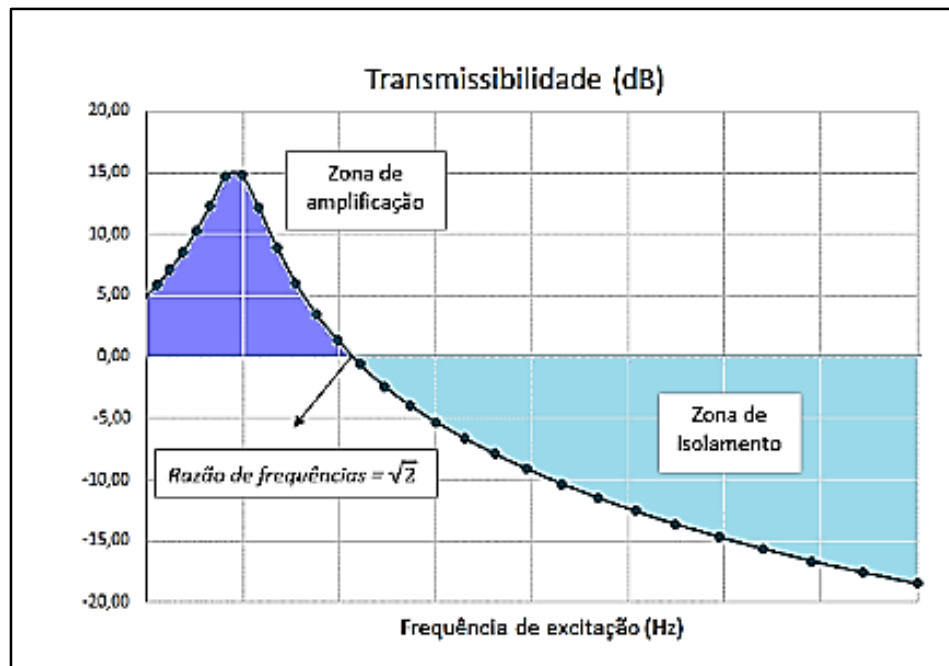


Figura 2.10 - Curva de transmissibilidade em função da frequência de excitação.

## **3 CARACTERIZAÇÃO DO ICB**

### **3.1 Introdução**

Este capítulo é referente à caracterização do ICB e divide-se em três partes: metodologias experimentais, descrição das amostras ensaiadas e apresentação e análise dos resultados experimentais.

Na primeira parte são expostas as metodologias experimentais utilizadas para a caracterização do ICB: à compressão estática e sob ação de cargas dinâmicas (transmissibilidade/rigidez dinâmica e fator de amortecimento). No primeiro caso interessa verificar o comportamento não linear do ICB quando submetido a uma carga compressiva, que varia até ser obtida uma deformação de 10%. Sob cargas excessivas, ou seja grandes deformações, o ICB pode começar a não recuperar a seu estado inicial após descarregamento. No segundo caso, descrevem-se dois equipamentos e procedimentos de ensaio utilizados.

O segundo subcapítulo é dedicado à descrição das amostras ensaiadas. Descreve-se, de uma forma breve, as principais propriedades e aplicações do ICB, referindo-se as suas potencialidades no domínio do isolamento de vibrações. Indicam-se, ainda, as variáveis analisadas no presente estudo, nomeadamente a espessura, a área e a massa volúmica.

Por fim são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos. Neste subcapítulo inclui-se a forma como se procedeu ao tratamento de resultados, e como foram obtidos os vários parâmetros. Os resultados são, ainda, comparados e relacionados.

### **3.2 Metodologias Experimentais**

#### **3.2.1 Ensaio de Compressão**

Para a determinação do comportamento à compressão do material ICB foi seguida a norma NP EN 826:1996. O método descrito na norma para a determinação do comportamento à compressão, consiste na aplicação, em condições de velocidade definidas (espessura/10, em mm/min), de uma força de compressão. A resistência à compressão é obtida para a força máxima, a que corresponde uma deformação compressiva de 10%.

Durante a realização de cada ensaio são registados os valores de carga (N) e tensão (kPa). São utilizados provetes de ICB com três massas volúmicas (ICB 110-120 kg/m<sup>3</sup>, ICB 140-160 kg/m<sup>3</sup> e ICB 170-190 Kg/m<sup>3</sup>).

Os ensaios foram realizados numa máquina universal eletromecânica INSTRON 5884 com célula de carga 150kN, no ITeCons.

### 3.2.2 Ensaio para a Avaliação da Transmissibilidade/Rigidez Dinâmica

Para a obtenção da transmissibilidade/rigidez dinâmica foi utilizado um equipamento concebido no ITeCons, que permite verificar os procedimentos de ensaio preconizados na norma ISO 10846-3:2002. Na figura seguinte encontra-se um esquema do referido equipamento.

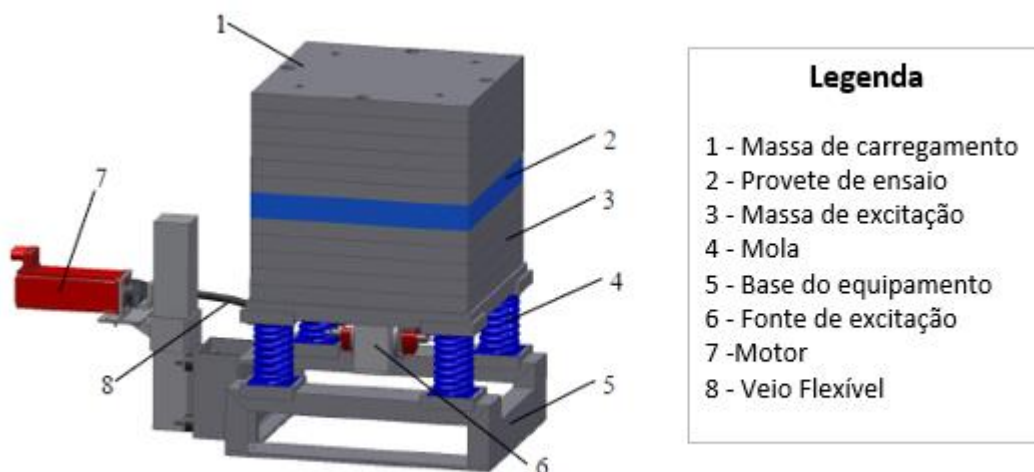


Figura 3.1 - Esquema do equipamento de ensaio utilizado na determinação da transmissibilidade/rigidez dinâmica.



O ensaio da transmissibilidade/rigidez dinâmica é realizado colocando o provete intercalado por duas massas: a massa inferior é excitada, enquanto que a massa superior é denominada de massa de carregamento. As massas resultam da superposição de placas de aço, com dimensões de 495x495x40, (mm). Estas placas são aparafusadas entre si, com quatro parafusos, para evitar vibrações parasitas entre placas.

A massa inferior é excitada através do movimento rotacional de massas excêntricas em torno de um eixo, (ver figura 3.2). Estas massas são colocadas em movimento através de um servo motor rotativo SEW, modelo CMP63M com um variador de frequência (15 a 100 Hz).

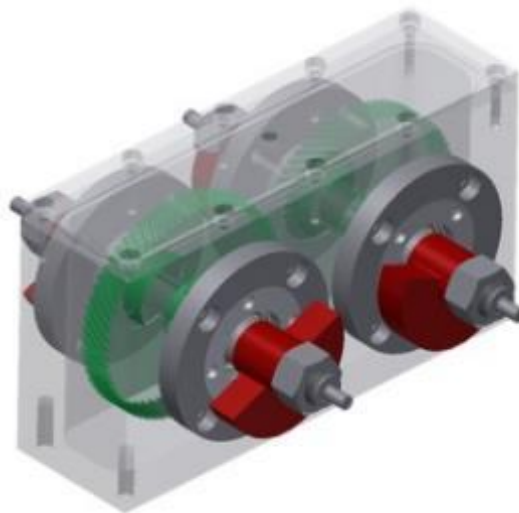


Figura 3.2 - Sistema de excitação.

A frequência de excitação, rotação do eixo, é controlada através do software Movitools 5.7, que impõe as rotações por minuto associadas à frequência pretendida.

Cada uma destas massas excêntricas,  $m_r$ , colocadas à distância  $r$  do eixo horizontal de rotação produzem uma força centrípeta dada por:

$$F(t) = m_r \omega^2 r \quad (3.1)$$

As massas são colocadas de modo a garantir que as componentes horizontais geradas pelo movimento rotativo destas massas se anulam mutuamente, (ver figura 3.3), pelo que apenas se gera uma carga vertical, dada em função de  $\theta$ , ângulo de rotação em graus medido em relação à direção horizontal:

$$F(t) = 2m_r \omega^2 r \sin \theta \quad (3.2)$$

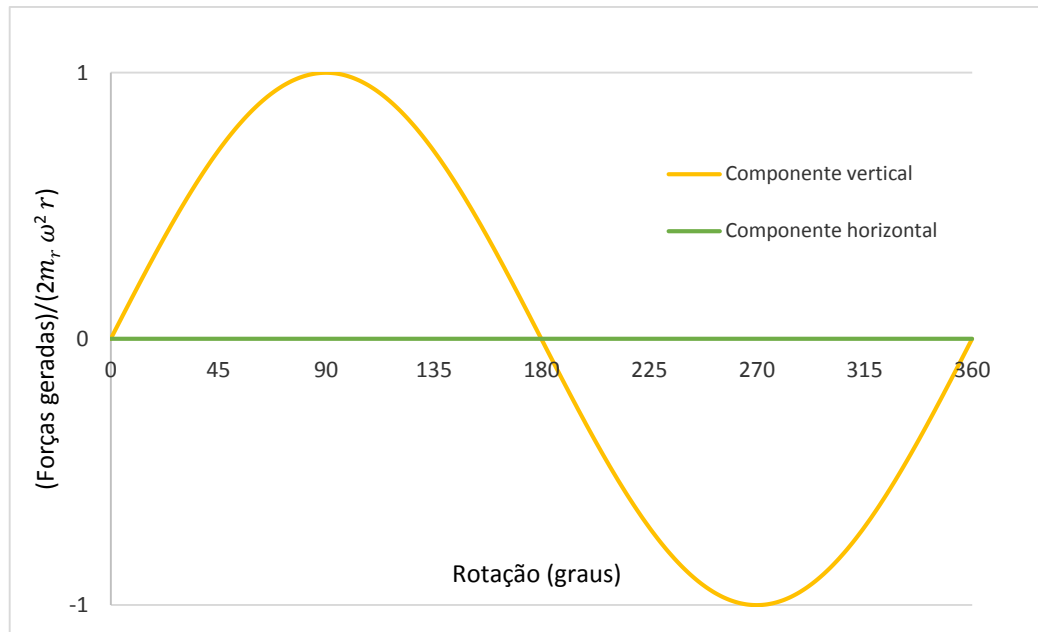


Figura 3.3 - Componentes das forças geradas pela rotação das massas excêntricas.

Como se referiu, entre a massa de excitação e a massa de carregamento encontra-se a amostra a ensaiar. As vibrações dos dois blocos de massas são monitorizados colocando um acelerómetro no topo e outros dois na base do equipamento. O valor da aceleração na base obtém-se através da média das leituras registadas por estes dois acelerómetros. Recorreu-se à colocação de dois acelerómetros, dada a impossibilidade da colocação de apenas um no centro da base devido à presença do sistema de excitação. Utilizaram-se acelerómetros Endevco 752A12 ligados ao datalogger HBM MX840A. A aquisição de dados é feita pelo software Catman Easy v3.4.

Para evitar a presença de vibrações parasita provenientes do solo, a massa de excitação é apoiada num conjunto de quatro molas com uma rigidez global de 1031 kN/m. Esta massa foi definida de modo a garantir que a primeira frequência natural de vibração deste sistema, com dois graus de liberdade, fosse muito baixa e se afastasse, de forma significativa, da segunda frequência natural de vibração.

Como se referiu no capítulo anterior, na vizinhança do fenómeno de ressonância a amplitude da vibração aumenta de forma significativa. Esta vibração não é infinita devido à presença de amortecimento no sistema.

O equipamento sem a colocação do provete/amostra funciona como um sistema com um grau de liberdade, pelo que a frequência natural de vibração é  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , em que  $k$  é a rigidez das molas e  $m$  a massa sobre estas.

Para verificar que o sistema, nestas condições, funciona como um sistema com um grau de liberdade foi realizado um teste, que consistiu na monitorização das acelerações geradas no topo, quando a carga de excitação variava desde as baixas frequências até às altas frequências.

Para cada massa colocada, são registadas as amplitudes no domínio do tempo (ver exemplo da figura 3.4). O primeiro tratamento de resultados consiste na transformação da resposta no domínio do tempo para o domínio da frequência. Para este efeito foi concebido um programa, em *fortran*, que através de uma transformada rápida de Fourier (FFT), permite obter a resposta no domínio da frequência, (ver figura 3.5).

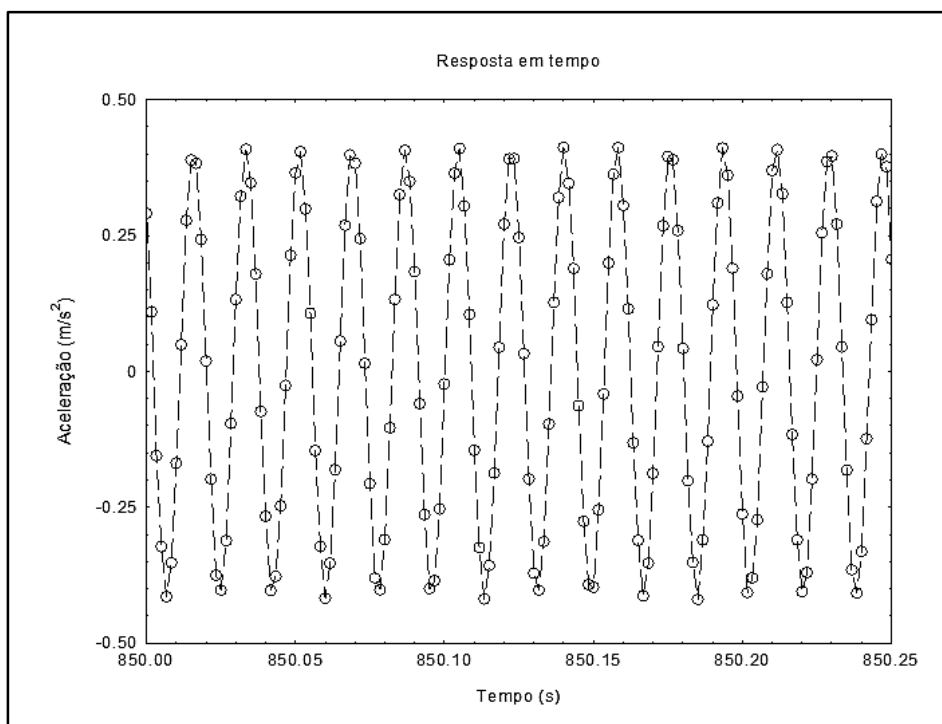


Figura 3.4 - Exemplo da resposta obtida no domínio do tempo.

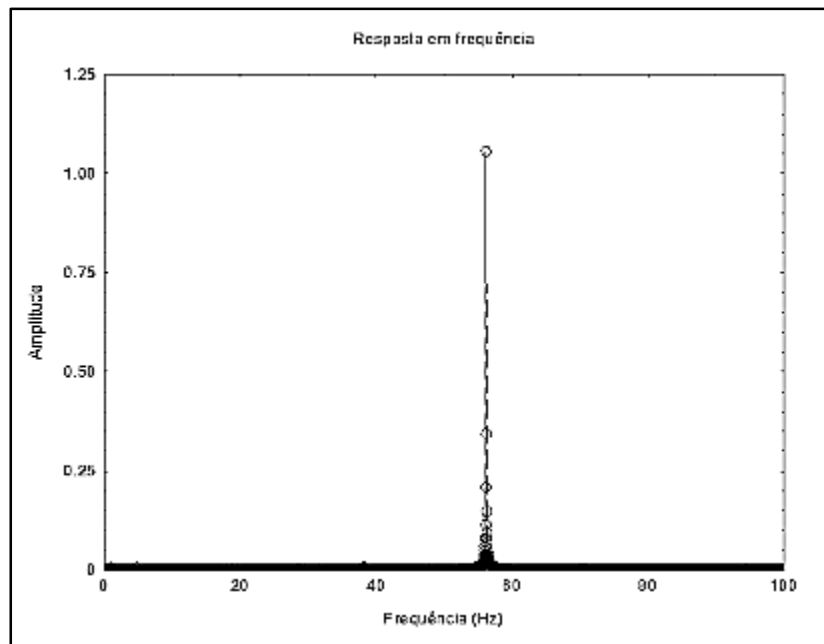


Figura 3.5 – Resposta, no domínio da frequência, do sinal ilustrado na figura 3.4

Foi possível verificar que o sistema entrava em ressonância na vizinhança das frequências naturais teóricas associadas a cada carregamento, sendo evidente o aumento considerável das amplitudes das vibrações. A figura 3.6 apresenta as frequências naturais de vibração registradas para os vários carregamentos.

Prante os resultados obtidos decidiu-se que a massa de excitação corresponderia à colocação de sete placas. Na presença das sete placas, às quais corresponde uma massa total de 544,8 kg, e face à rigidez das molas já referida, a frequência natural de vibração é 6,93 Hz.

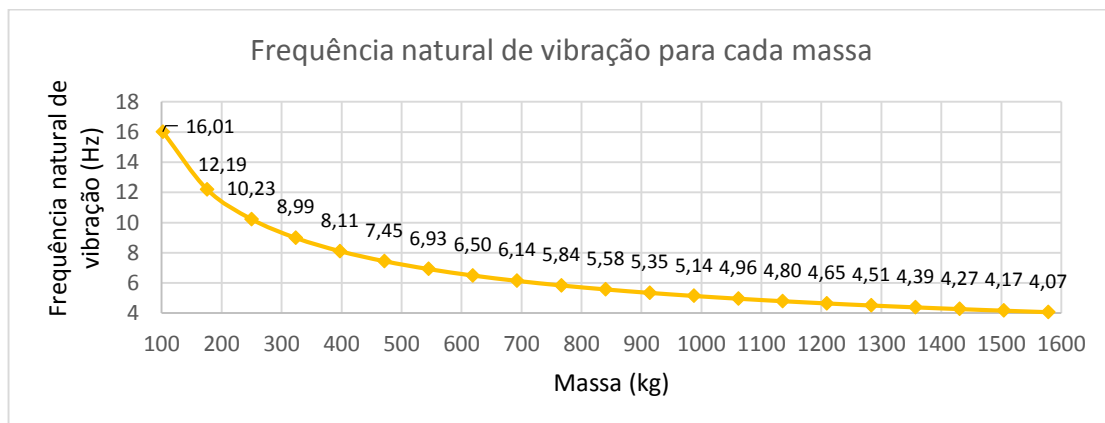


Figura 3.6 - Frequência natural de vibração teórica.

Sobre a amostra são colocadas placas de aço correspondentes à massa de carregamento a que o provete vai estar sujeito. Estas massas são compostas por placas de aço, iguais às placas que constituem as massas de excitação. Cada uma das placas corresponde aproximadamente a 73,8 kg. São realizados ensaios com diferentes carregamentos (a que correspondem diferentes números de placas). No presente estudo foram realizados ensaios em que o número de placas variou de 1 a 15.

Para cada condição de carregamento, o provete foi submetido ao impacto de cargas harmónicas, gerada pelo sistema de excitação descrito, associadas a diferentes frequências de excitação. Na tabela seguinte apresenta-se a gama discreta de frequências testadas bem como a correspondência entre a frequência de excitação e as rotações que terão que ser impostas ao motor. Estas rotações são reduzidas a metade, pois o sistema de excitação permite, através de um conjunto de rodas dentadas, aumentar a rotação das massas excêntricas para o dobro.

Tabela 3.1 - Correspondência entre frequência de excitação e rotações do motor.

| Frequência (Hz) | rpm     | rpm do motor | Frequência (Hz) | rpm     | rpm do motor |
|-----------------|---------|--------------|-----------------|---------|--------------|
| 14,94           | 896,54  | 448,27       | 42,19           | 2531,40 | 1265,70      |
| 15,86           | 951,47  | 475,74       | 44,68           | 2680,83 | 1340,41      |
| 16,81           | 1008,61 | 504,30       | 47,32           | 2839,04 | 1419,52      |
| 17,80           | 1067,94 | 533,97       | 50,10           | 3006,04 | 1503,02      |
| 18,86           | 1131,66 | 565,83       | 53,07           | 3184,03 | 1592,02      |
| 19,96           | 1197,58 | 598,79       | 56,18           | 3370,81 | 1685,41      |
| 21,13           | 1267,90 | 633,95       | 59,51           | 3570,77 | 1785,39      |
| 22,41           | 1344,81 | 672,40       | 63,10           | 3786,12 | 1893,06      |
| 23,73           | 1423,91 | 711,96       | 66,84           | 4010,25 | 2005,13      |
| 25,12           | 1507,42 | 753,71       | 70,79           | 4247,57 | 2123,79      |
| 26,63           | 1597,51 | 798,75       | 74,97           | 4498,08 | 2249,04      |
| 28,20           | 1692,00 | 846,00       | 79,44           | 4766,16 | 2383,08      |
| 29,85           | 1790,88 | 895,44       | 84,09           | 5045,23 | 2522,61      |
| 31,61           | 1896,36 | 948,18       | 89,07           | 5344,08 | 2672,04      |
| 33,51           | 2010,62 | 1005,31      | 94,34           | 5660,50 | 2830,25      |
| 35,49           | 2129,28 | 1064,64      | 99,98           | 5998,90 | 2999,45      |
| 37,58           | 2254,53 | 1127,27      | 100,00          | 6000,00 | 3000,00      |
| 39,81           | 2388,57 | 1194,29      |                 |         |              |

Para cada frequência de excitação, apenas se procede à aquisição de respostas após o sistema exibir um comportamento estacionário. A transmissibilidade é calculada, para cada frequência

de excitação, em análise, através do quociente entre as amplitudes do sinal 2 (vibração da massa de carregamento) e do sinal 1 (vibração da massa inferior),  $T = a_2/a_1$ . A repetição deste procedimento para as várias frequências de ensaio permite traçar uma curva de transmissibilidade. A análise desta curva permite verificar em que gama de frequências o sistema garante uma adequada transmissibilidade.

O isolamento de vibrações conferido pelo sistema é calculado por  $IE = 1 - TR$ . A transmissibilidade, em dB, é obtida através da seguinte equação:

$$T_{dB} = 20\log(T) \quad (3.3)$$

A tabela seguinte lista os valores de transmissibilidade,  $T_{dB}$ , associados a diferentes valores de isolamento de vibrações.

Tabela 3.2 – Relação entre  $T$ ,  $IE$  e  $T_{dB}$ .

| T    | IE  | $T_{dB}$ (dB) |
|------|-----|---------------|
| 0,05 | 95% | -26,02        |
| 0,10 | 90% | -20,00        |
| 0,15 | 85% | -16,48        |
| 0,20 | 80% | -13,97        |
| 0,25 | 75% | -12,04        |

Este ensaio permite também obter a rigidez dinâmica da amostra (N/m). Este parâmetro pode ser obtido manipulando a segunda equação do sistema 2.20. Considerando nulo o amortecimento e a carga aplicada obtém-se,

$$-k_2u_1 + k_2u_2 + m_2\ddot{u}_2 = 0 \quad (3.4)$$

sabendo que  $\ddot{u}_2 = -\omega^2u_2$ , obtém-se,

$$-k_2u_1 + k_2u_2 - m_2\omega^2u_2 = 0 \quad (3.5)$$

dividindo por  $u_1$ ,

$$k_2 \left(1 - \frac{u_2}{u_1}\right) = -m_2\omega^2 \frac{u_2}{u_1} \quad (3.6)$$

Se  $\left(\frac{u_2}{u_1}\right)$  for suficientemente pequeno,

$$k_2 \cong -m_2 \omega^2 \frac{u_2}{u_1} \quad (3.7)$$

Esta equação é tanto mais verdadeira quanto menor for  $\frac{u_2}{u_1}$ , ou seja a expressão é válida para valores de frequência muito superiores às frequências de ressonância.

Refira-se que a expressão 3.7 é aquela que a norma ISO 10846-3:2002 indica para a determinação da rigidez, referindo que apenas é válida para  $|T| \ll 1$ .

A rigidez dinâmica pode ser expressa em dB,

$$R_{dB} = 10 \log(R^2) \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Ensaio para Determinar o Fator de Amortecimento

O fator de amortecimento de um sistema com um grau de liberdade,  $\xi$ , é determinado experimentalmente analisando a forma como este se deforma quando submetido a uma carga de impacto.



Figura 3.7 – Equipamento de ensaio para determinar o fator de amortecimento.

Para este efeito coloca-se a amostra/provete sobre uma base rígida. Sobre esta são colocadas massas de carregamento (ver figura 3.7). No âmbito do presente trabalho foram utilizadas 5 massas distintas: 73,8 kg (1 placa), 295,2 kg (4 placas), 590,4 kg (8 placas), 811,8 kg (11 placas), e 1107 kg (15 placas). Este sistema, correspondente a um sistema com um grau de liberdade, é excitado através do impacto gerado por um martelo, modelo 8208 da marca “Brüel & Kjær”.

No topo das massas de carregamento é colocado um acelerómetro, centrado em relação à placa do topo, que regista a aceleração no domínio do tempo. O acelerómetro utilizado corresponde a um daqueles utilizados no ensaio para avaliação da transmissibilidade/rigidez dinâmica (Endevco 752A12). A aquisição de dados é feita recorrendo-se ao *software* PULSE LabShop v. 15.1.0.15, da marca “Brüel & Kjær”. Para evitar leituras em *overload*, ou *under range*, é realizada uma verificação prévia da gama dinâmica da medição da aceleração.

O ensaio consiste na realização de vários impactos. O envelope, gerado por cada um dos registos de aceleração obtidos, é ajustada a uma curva exponencial  $\rho_1 e^{-at}$ . Através da expressão matemática destas curvas exponenciais, é estimado o fator de amortecimento. A figura 3.8 ilustra o deslocamento deste tipo de sistema (equação 2.12), que é limitado pela curva  $\rho e^{-\xi\omega t}$ .

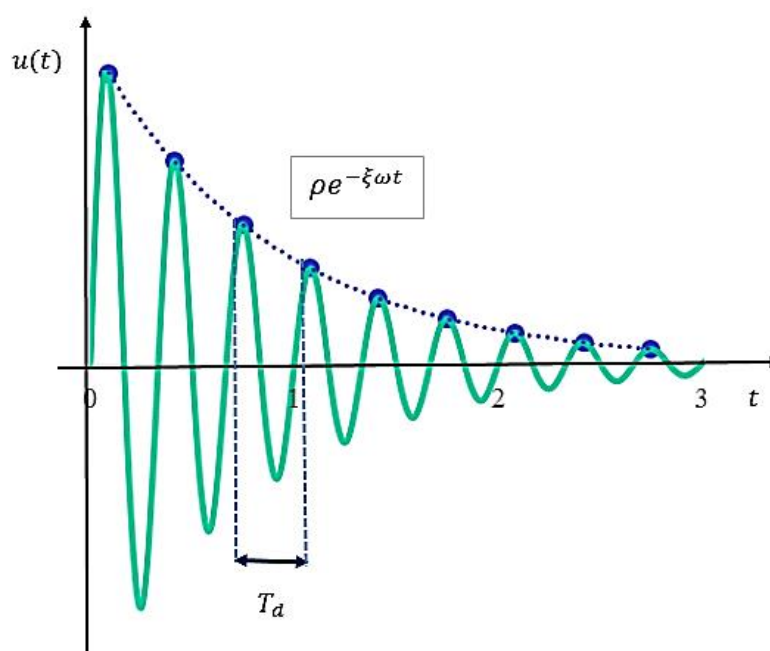


Figura 3.8 - Vibração de um sistema com um grau de liberdade livre amortecido.



Desta forma, sabendo que  $a = \xi\omega$  e  $\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$ , o fator de amortecimento pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$\xi = \frac{a}{\sqrt{\frac{4\pi^2}{T^2} + a^2}} \quad (3.9)$$

### 3.3 Descrição das Amostras Ensaçadas

Pretendem-se caracterizar placas de aglomerado de cortiça expandida, ICB (ver figura 3.9). Estas placas são fabricadas apenas com grânulos de cortiça, ou seja trata-se de um produto natural sem quaisquer tipos de aditivos. Este produto é obtido por aglomeração de resíduos de cortiça com as resinas libertadas pela própria cortiça quando submetida a altas pressões (3,0 bar) e a altas temperaturas (360°C).

Existem múltiplas variedades de aglomerados, resultado de diferentes combinações de tipo, granulometria e densidade da cortiça usada, assim como do aglutinante mais adequado, preparado consoante o fim a que se destina. Os aglomerados, depois de sujeitos a processos de moldação ou extrusão apresentam-se na forma de blocos, bastões, rolos ou folhas (Costa, 2011).



Figura 3.9 - Amostras de ICB.

Foram ensaiadas placas de ICB com diferentes massas volúmicas e espessuras. Identificam-se, na tabela seguinte, as massas volúmicas e as espessuras das placas utilizadas.

Tabela 3.3 - Características das placas de ICB utilizadas.

| Amostras | Massa Volúmica<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Espessura<br>(mm) |
|----------|--|-------------------|
| 1        | 110-120                                | 30                |
| 2        |  | 40                |
| 3        |  | 50                |
| 4        | 140-160                                | 30                |
| 5        |  | 40                |
| 6        |  | 50                |
| 7        | 170-190                                | 30                |
| 8        |  | 40                |
| 9        |  | 50                |

Os provetes ensaiados têm formato paralelepípedo com dimensões em planta de 300 mm por 300 mm, (900 cm<sup>2</sup>). Estes foram cortados em quatro partes iguais, com 150 mm x 150 mm cada, e posicionados, entre as massas de excitação e de carregamento, na direta vizinhança dos cantos das placas de aço, de modo a mitigar possíveis instabilidades geradas quando sobre o provete é colocado uma grande carga.

Foram, ainda, testadas amostras com 450 cm<sup>2</sup> e 225 cm<sup>2</sup>, com o objetivo de avaliar qual a dependência dos resultados da área do provete (ver figura 3.10).



Figura 3.10 - Amostras com 225 cm<sup>2</sup>, 450 cm<sup>2</sup> e 900 cm<sup>2</sup> (da esquerda para a direita).

### 3.4 Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

#### 3.4.1 Compressão

A figura 3.11 ilustra os resultados médios obtidos na realização dos ensaios de compressão, i.e. o valor da tensão compressiva versus a deformação para as várias amostras com as diferentes massas volúmicas. Apresentam-se também curvas com desenvolvimento logarítmico ajustadas às obtidas nos ensaios de compressão. Estas curvas apresentam coeficientes de correlação próximos da unidade o que permite concluir que se ajustam razoavelmente bem.

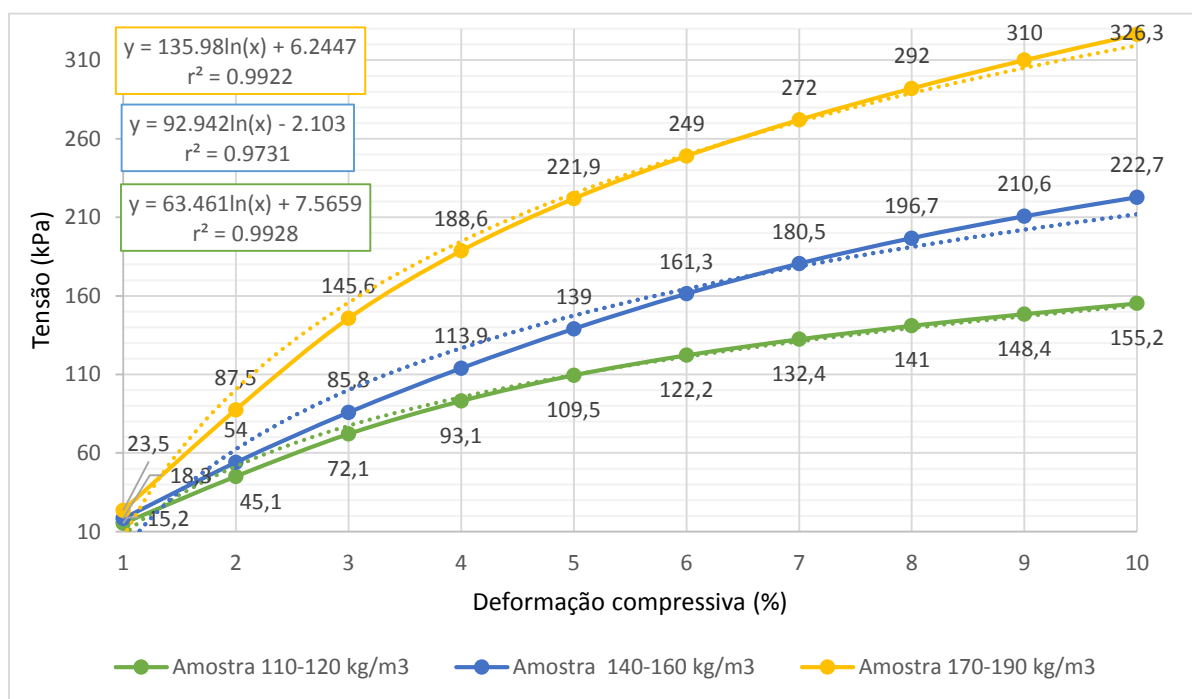


Figura 3.11 - Resultados dos ensaios de compressão.

Por cada massa volúmica foram ensaiados 6 provetes. A análise das curvas obtidas permite concluir que o ICB começa a não recuperar o seu estado inicial, após descarregamento, quando submetido a deformações excessivas. O comportamento do material é claramente não linear.

Como seria expectável, a amostra com menor massa volúmica atinge os 10% de deformação para uma tensão muito menor do que aquela correspondente à amostra mais densa, (cerca de metade). As amostras com maior massa volúmica apresentam menores deformações.

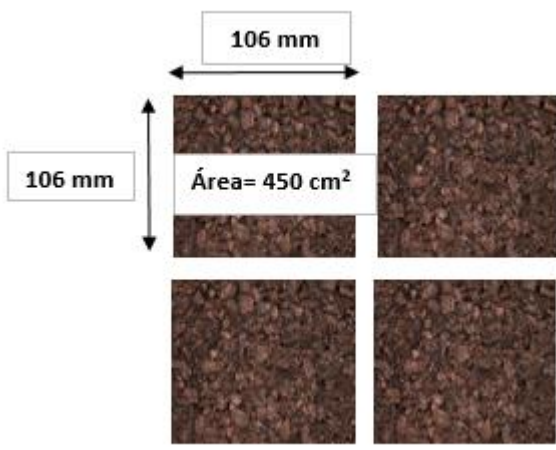
Deste modo interessa conhecer a tensão a que os provetes estão sujeitos nos ensaios de caracterização dinâmica. As tabelas seguintes apresentam as tensões de compressão correspondentes aos vários carregamentos estáticos associados às três áreas dos provetes.

Tabela 3.4 - Tensões de compressão correspondentes aos vários carregamentos estáticos sobre amostras de 900 cm<sup>2</sup>.

|     | Massas (kg) | Tensão (kPa) |  |
|-----|-------------|--------------|--|
| M1  | 73,8        | 8,04         |  |
| M2  | 147,6       | 16,08        |  |
| M3  | 221,4       | 24,12        |  |
| M4  | 295,2       | 32,17        |  |
| M5  | 369,0       | 40,21        |  |
| M6  | 442,8       | 48,25        |  |
| M7  | 516,6       | 56,29        |  |
| M8  | 590,4       | 64,33        |  |
| M9  | 664,2       | 72,37        |  |
| M10 | 738,0       | 80,41        |  |
| M11 | 811,8       | 88,46        |  |
| M12 | 885,6       | 96,50        |  |
| M13 | 959,4       | 104,54       |  |
| M14 | 1033,2      | 112,58       |  |
| M15 | 1107,0      | 120,62       |  |

Tabela 3.5 - Tensões de compressão correspondentes aos vários carregamentos estáticos sobre amostras de 450 cm<sup>2</sup>.

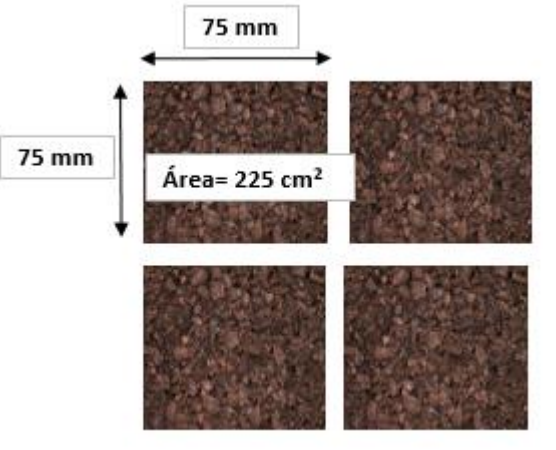
|     | Massas (kg) | Tensão (kPa) |
|-----|-------------|--------------|
| M1  | 73,8        | 16,08        |
| M2  | 147,6       | 32,17        |
| M3  | 221,4       | 48,25        |
| M4  | 295,2       | 64,33        |
| M5  | 369,0       | 80,41        |
| M6  | 442,8       | 96,50        |
| M7  | 516,6       | 112,58       |
| M8  | 590,4       | 128,66       |
| M9  | 664,2       | 144,75       |
| M10 | 738,0       | 160,83       |
| M11 | 811,8       | 176,91       |
| M12 | 885,6       | 192,99       |
| M13 | 959,4       | 209,08       |
| M14 | 1033,2      | 225,16       |
| M15 | 1107,0      | 241,24       |



The diagram shows a square sample of expanded cork aggregate. The side length of the square is indicated as 106 mm. A central white box contains the text 'Área= 450 cm²'. The sample is shown in a 2x2 grid of four smaller images, with the top-left image being the largest and most detailed, showing the granular texture of the material.

Tabela 3.6 - Tensões de compressão correspondentes aos vários carregamentos estáticos sobre amostras de 225 cm<sup>2</sup>.

|     | Massas (kg) | Tensão (kPa) |
|-----|-------------|--------------|
| M1  | 73,8        | 32,17        |
| M2  | 147,6       | 64,33        |
| M3  | 221,4       | 96,50        |
| M4  | 295,2       | 128,66       |
| M5  | 369,0       | 160,83       |
| M6  | 442,8       | 192,99       |
| M7  | 516,6       | 225,16       |
| M8  | 590,4       | 257,33       |
| M9  | 664,2       | 289,49       |
| M10 | 738,0       | 321,66       |
| M11 | 811,8       | 353,82       |
| M12 | 885,6       | 385,99       |
| M13 | 959,4       | 418,16       |
| M14 | 1033,2      | 450,32       |
| M15 | 1107,0      | 482,49       |



The diagram shows a square sample of expanded cork aggregate. The side length of the square is indicated as 75 mm. A central white box contains the text 'Área= 225 cm²'. The sample is shown in a 2x2 grid of four smaller images, with the top-left image being the largest and most detailed, showing the granular texture of the material.

É relevante saber qual a percentagem de deformação expectável para cada tipo de amostra para os carregamentos mais elevados. Para isso foram utilizadas as curvas logarítmicas de interpolação apresentadas na figura 3.11. Os resultados para os diferentes provetes, quando submetidos às cargas mais elevadas para a área de 900 cm<sup>2</sup>, constam na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Deformação (%) expectável para os provetes com 900 cm<sup>2</sup> de área.

|     | Tensão<br>(kPa) | 110-120 kg/m <sup>3</sup> | 140-160 kg/m <sup>3</sup> | 170-190 kg/m <sup>3</sup> |
|-----|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| M12 | 96,50           | 4,06                      | 2,89                      | 1,94                      |
| M13 | 104,54          | 4,61                      | 3,15                      | 2,06                      |
| M14 | 112,58          | 5,23                      | 3,43                      | 2,19                      |
| M15 | 120,62          | 5,94                      | 3,75                      | 2,32                      |

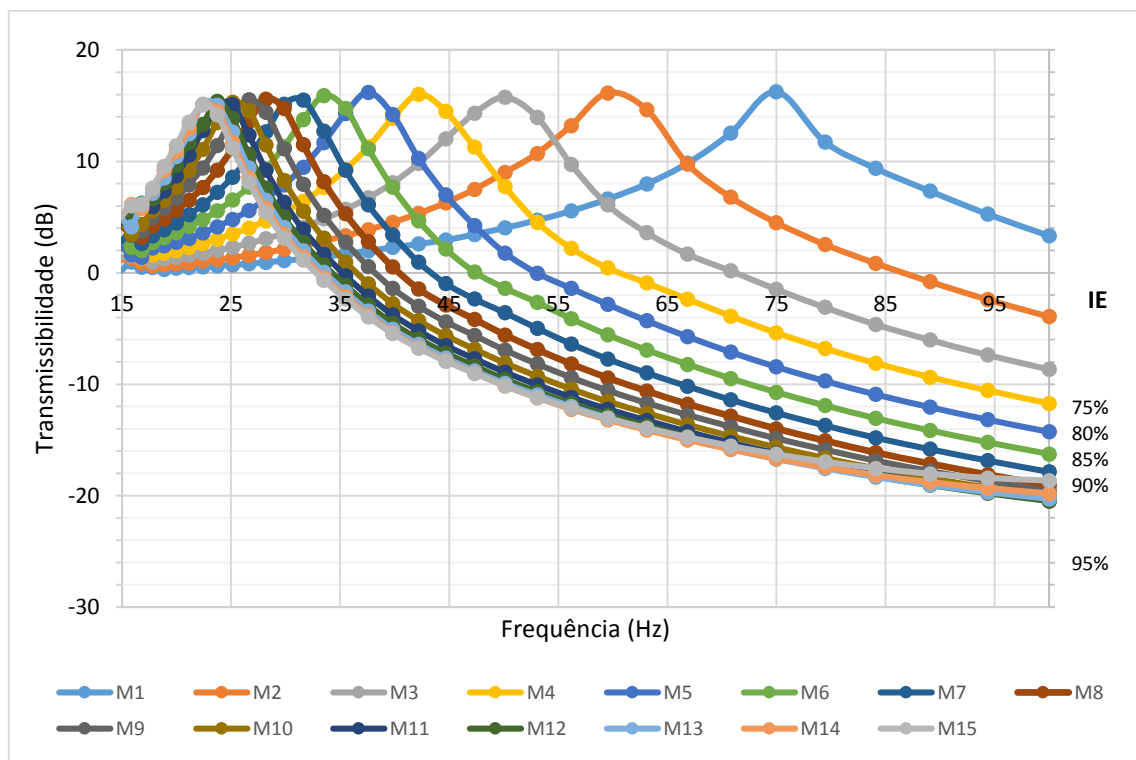
Na imagem do lado direito, da figura 3.12 pode verificar-se que a amostra, (140-160 kg/m<sup>3</sup>, 30 mm de espessura e 225 cm<sup>2</sup> de área) apresenta a sua espessura reduzida a metade, (15 mm). A figura do lado esquerdo ilustra o carregamento máximo a que os provetes estiveram sujeitos.



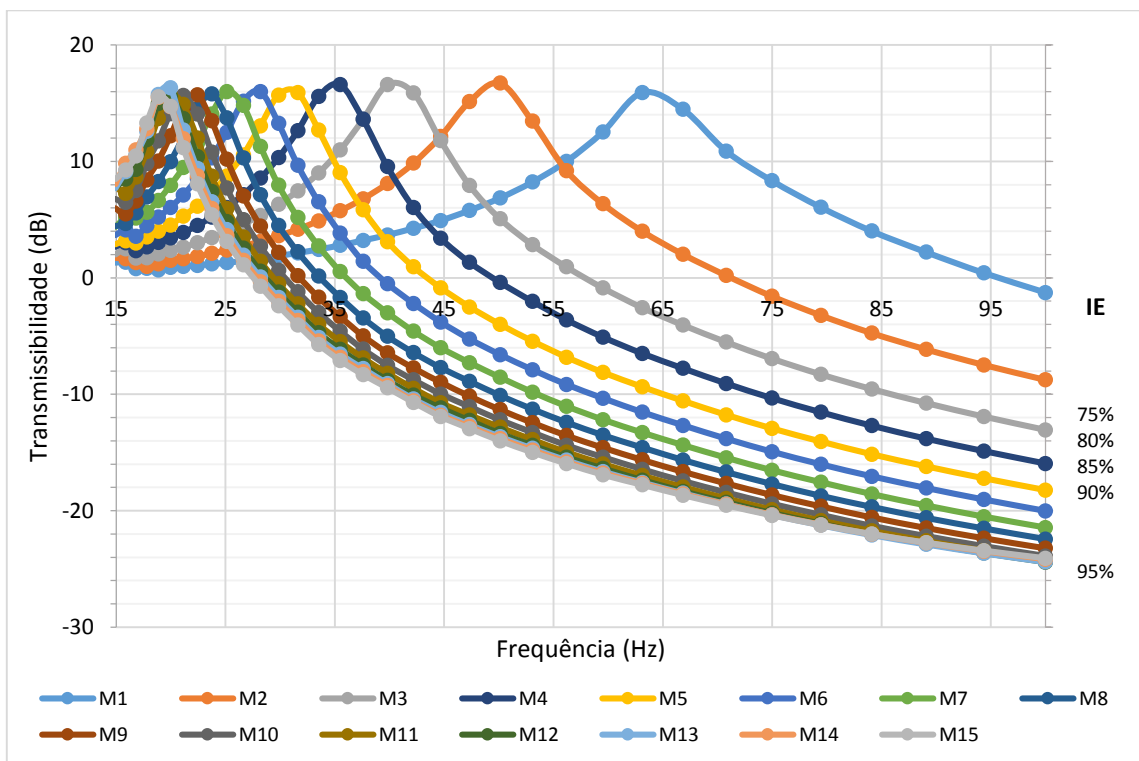
Figura 3.12- Provete com carregamento M15: a) vista global; b) deformação do provete.

### 3.4.2 Transmissibilidade

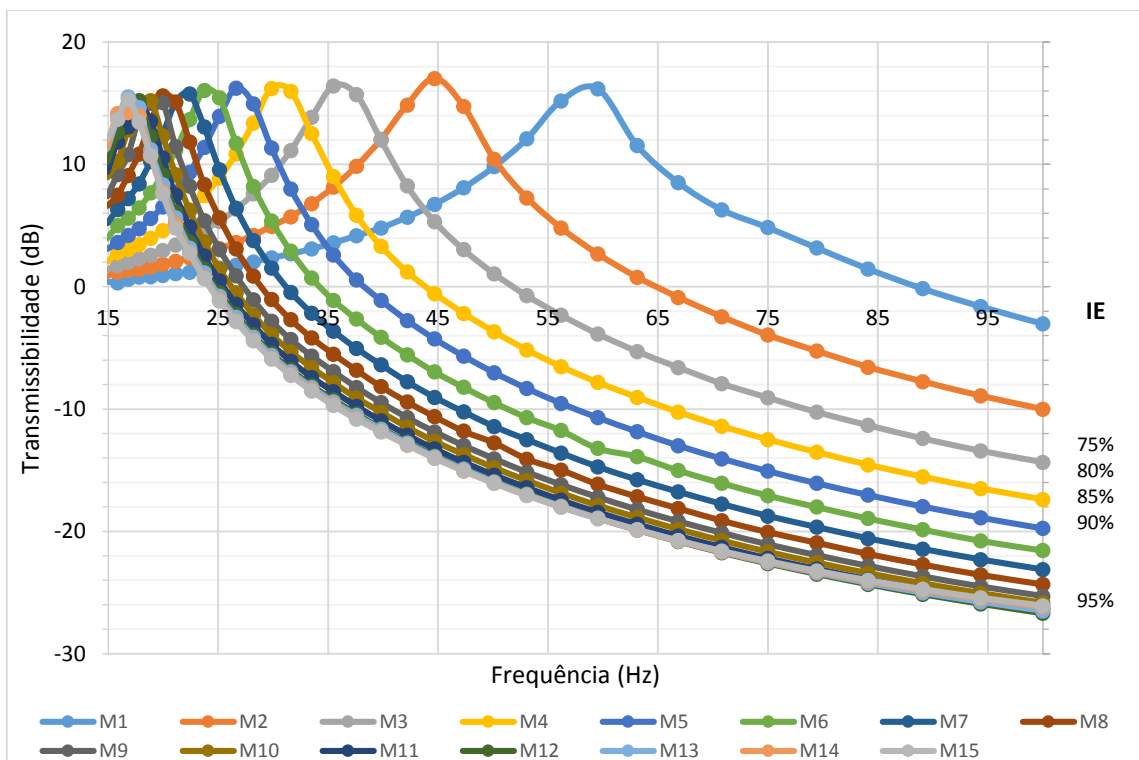
As figuras seguintes apresentam as curvas de transmissibilidade, em dB, obtidas para as nove amostras com 900 cm<sup>2</sup> de área quando submetidas aos vários carregamentos. Estes gráficos indicam, ainda, os valores de transmissibilidade que garantem o isolamento de 75%, 80%, 85%, 90% e 95% das vibrações.



a)

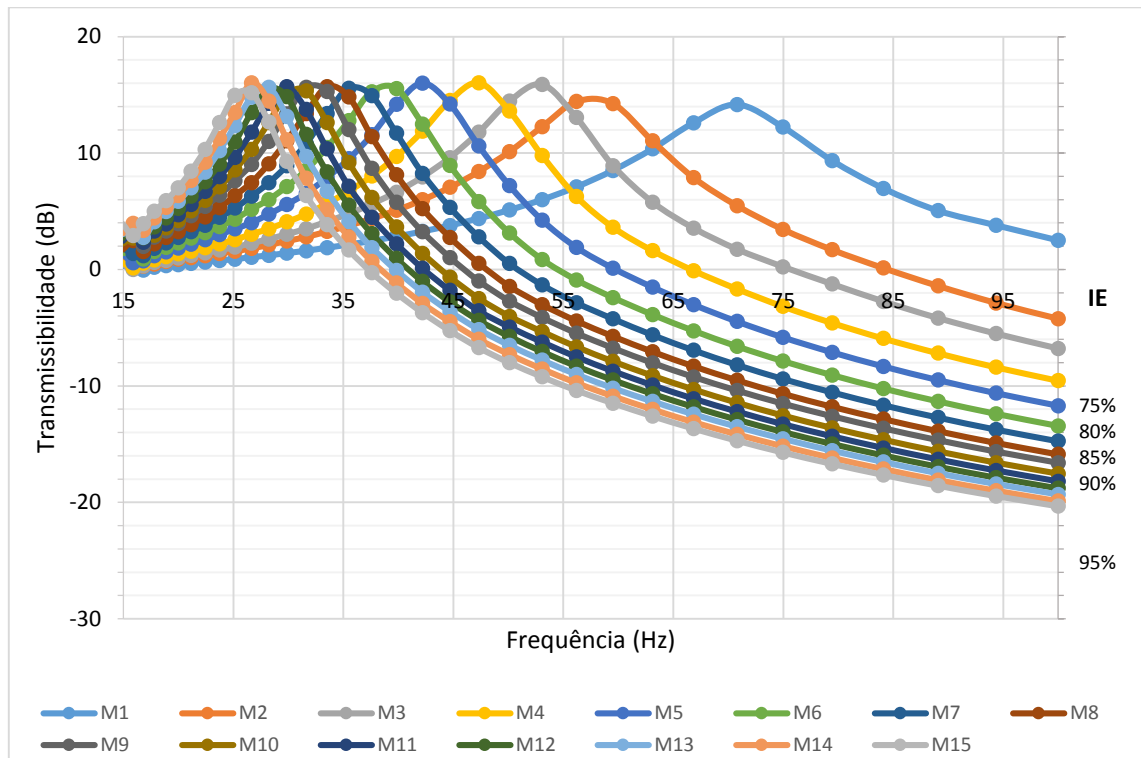


b)

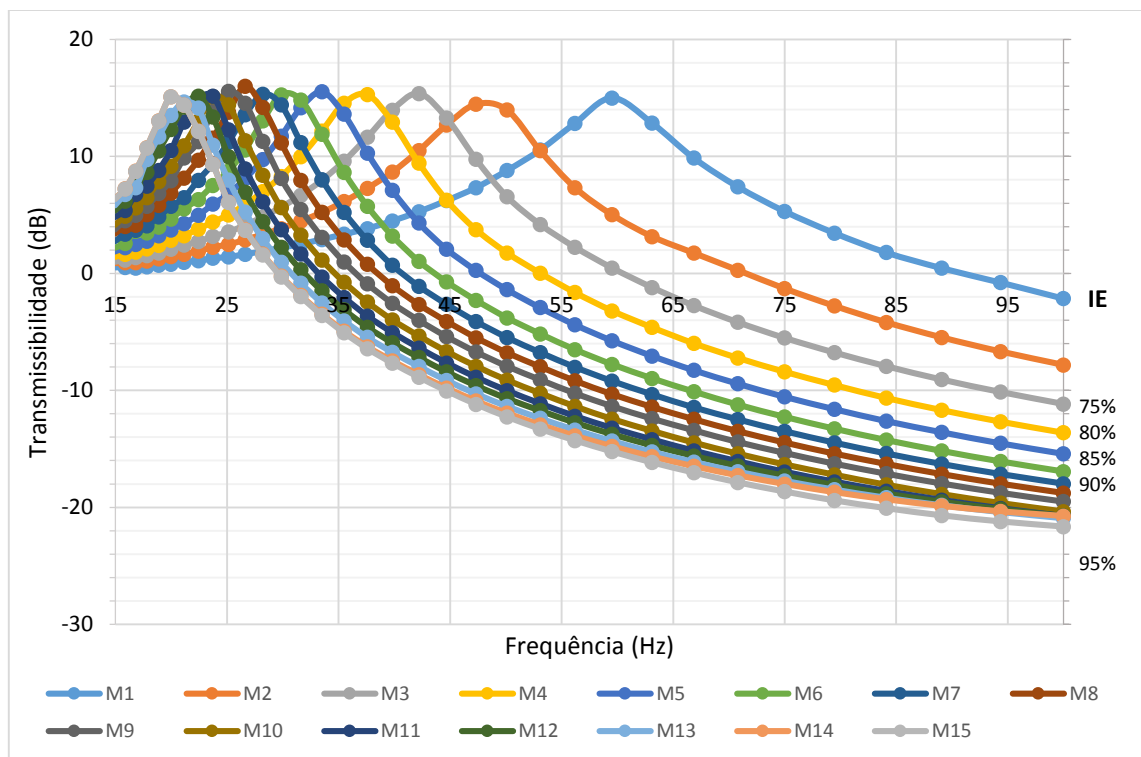


c)

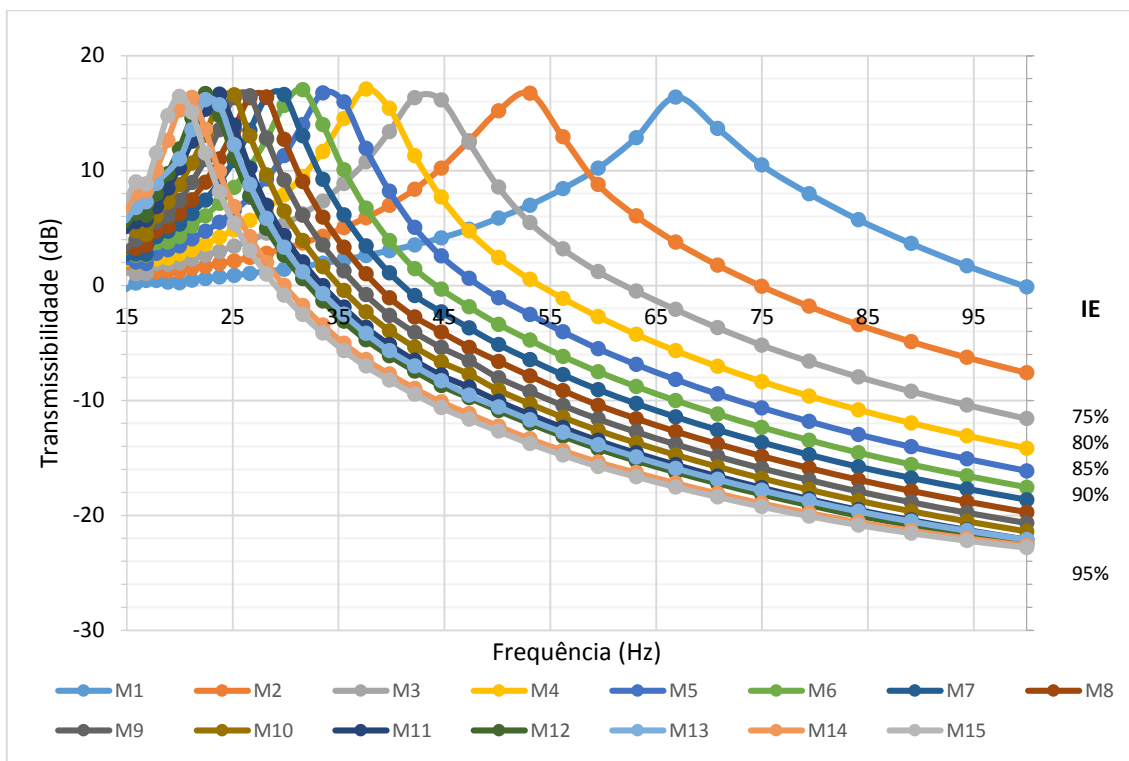




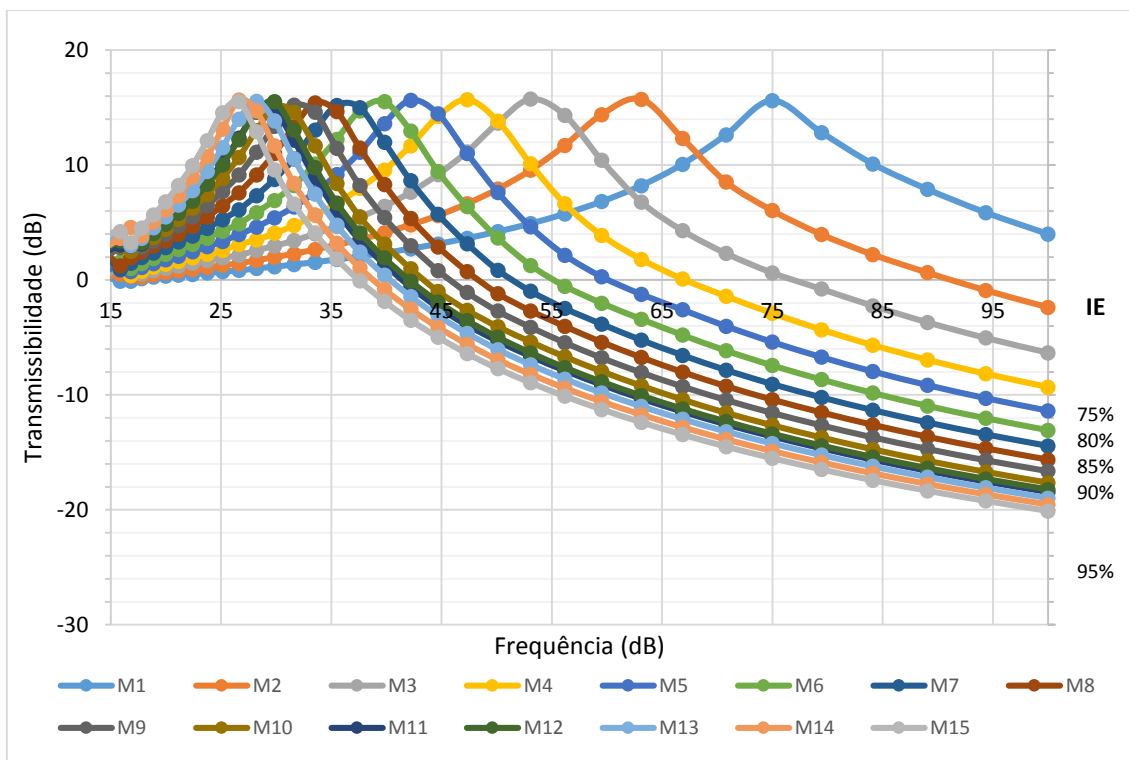
d)



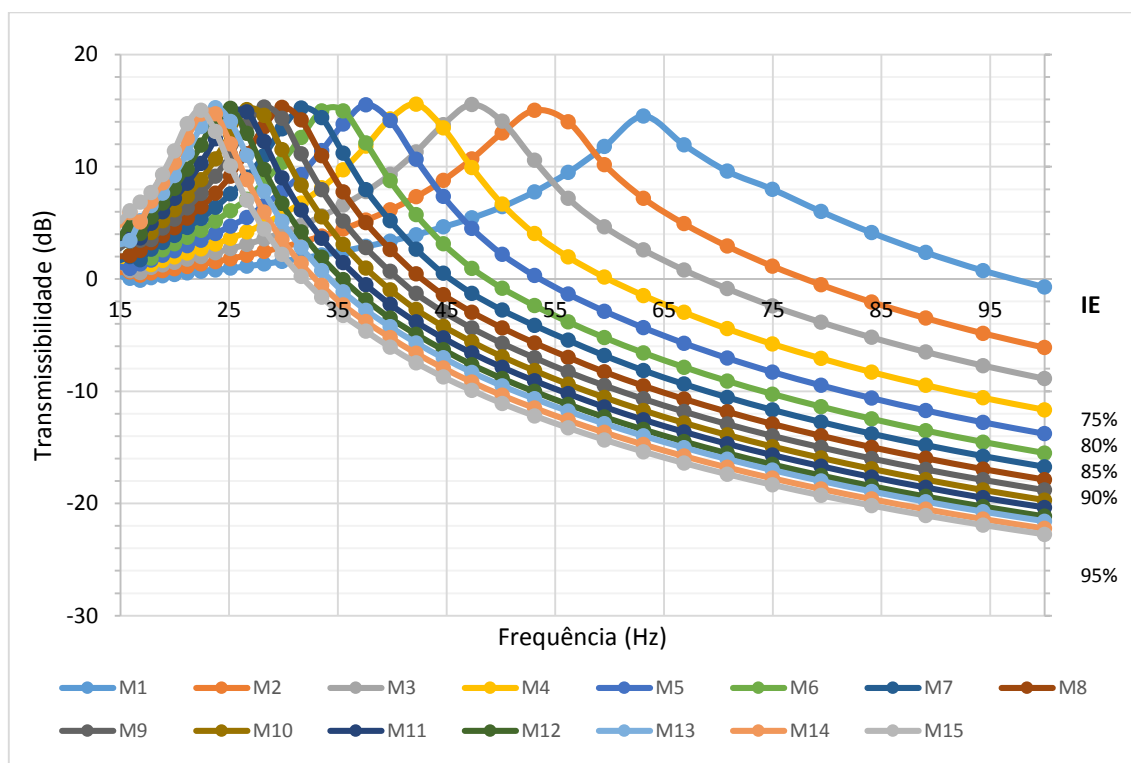
e)



f)



g)



h)

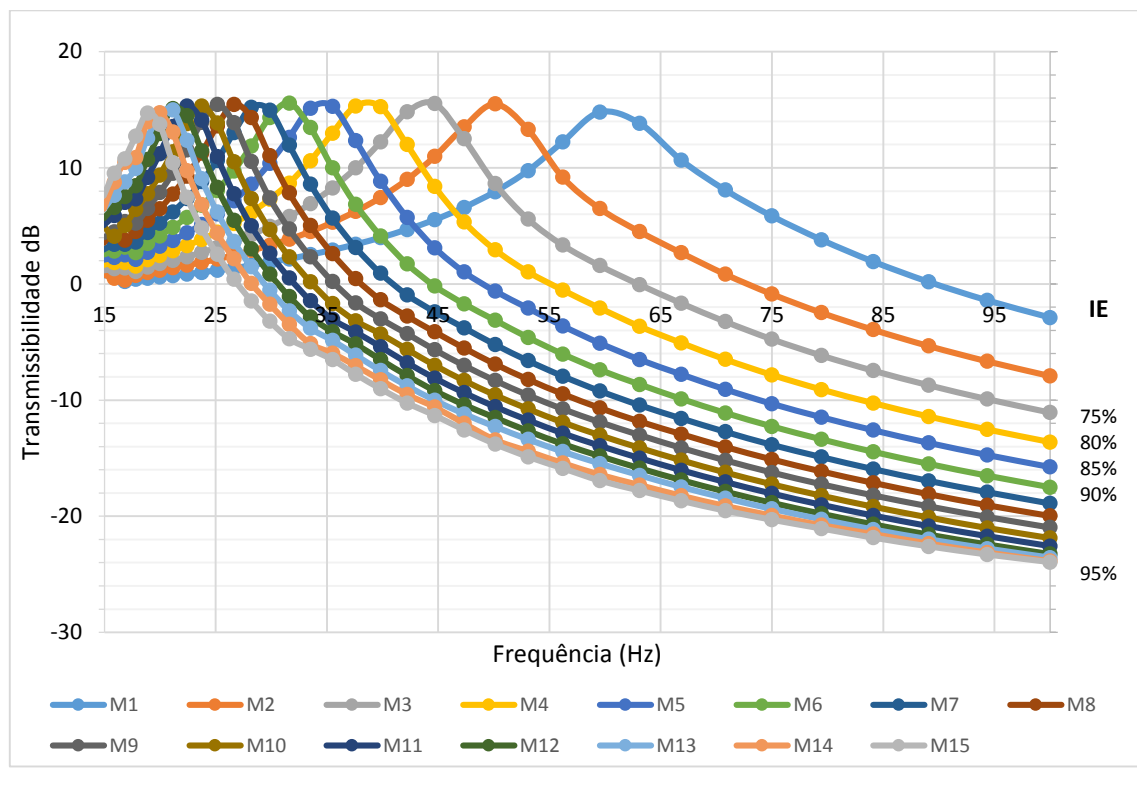


Figura 3.12 - Curvas de transmissibilidade para várias cargas, (amostras com 900 cm<sup>2</sup> de área): a) Amostra 1 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); b) Amostra 2 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); c) Amostra 3 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura); d) Amostra 4 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); e) Amostra 5 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); f) Amostra 6 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura); g) Amostra 7 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); h) Amostra 8 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); i) Amostra 9 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura).

Comparando os gráficos da figura 3.12 a), b) e c), ou seja, das amostras 1, 2 e 3, todos com a massa volúmica de 110-120 kg/m<sup>3</sup>, pode dizer-se que os resultados melhoram com o aumento de espessura das amostras. A primeira amostra, com a espessura de 30 mm, garante uma transmissibilidade de cerca de -19 dB, (cerca de 90% do isolamento de vibrações) aos 100Hz. A amostra 2, com 40 mm de espessura, já garante uma transmissibilidade de -25 dB, enquanto a amostra 3, com 50 mm de espessura, melhora este valor para -27 dB, (superior a 95% do isolamento de vibrações). Verifica-se, ainda, que o aumento de espessura da amostra determina uma maior área negativa destas curvas de transmissibilidade, ou seja um maior isolamento de vibrações e uma maior gama de frequências abrangidas.

---

De um modo geral, com o aumento da massa, a segunda frequência natural do sistema diminui, tal como se pode verificar através da expressão 2.24. Assim, com a diminuição da frequência natural do sistema, as curvas de transmissibilidade vão-se deslocando para a esquerda com o aumento de massa sobre a amostra, e por consequência, esta, quando submetida a um maior carregamento, garante um melhor isolamento de vibrações para frequências mais baixas.

A análise das curvas de transmissibilidade, correspondentes aos maiores carregamentos, permite verificar que estas tendem a sobrepor-se. Para cargas mais baixas, um pequeno aumento de carregamento, (a colocação de uma placa de aço) determina uma grande diferença nas curvas de transmissibilidade, fazendo com que a zona de amplificação diminua consideravelmente e a zona de isolamento de vibrações aumente de forma significativa. Numa fase posterior, quando as cargas são mais elevadas, os resultados já não exibem grande melhoria. Nalguns casos, verifica-se mesmo que o aumento do carregamento corresponde a uma regressão do comportamento. Se se analisar por exemplo os gráficos da figura 3.12 a), (amostra 1) quando submetida aos carregamentos M14 e M15, observam-se piores desempenhos do que na presença dos carregamentos M12 e M13. Nas altas frequências é bem visível o recuo destas curvas. Neste caso concreto, a última curva, (M15), aos 100 Hz, garante apenas uma transmissibilidade de -18 dB quando seria expectável um valor próximo dos -20 dB. Este recuo verifica-se também para os gráficos das figuras 3.12 b) e c), (a mesma massa volúmica do provete utilizado para ilustrar os resultados da figura 3.12 a). Este comportamento é provocado pela deformação excessiva da amostra, (cerca de 5 a 6 % para os maiores carregamentos).

Deste modo, conclui-se que os sistemas para os quais os carregamentos conduzam a grandes deformações devem ser evitados, pelo que não devem ser uma opção em termos de dimensionamento de apoios antivibráticos.

A análise dos resultados obtidos com os gráficos das figuras 3.12 d), e) e f) correspondentes às amostras 4, 5 e 6, com massa volúmica de 140-160 kg/m<sup>3</sup>, com os gráficos das figuras 3.12 g), h) e i), amostras 7, 8 e 9, com massa volúmica de 170-190 kg/m<sup>3</sup>, corroboram as conclusões obtidas com as amostras ensaiadas com massa volúmica de 110-120 kg/m<sup>3</sup>. Amostras com espessuras superiores, mas com a mesma massa volúmica, garantem melhores resultados.

Interessa também analisar de que forma a massa volúmica afeta o comportamento dinâmico do material. Para isso, são comparadas entre si os resultados das amostras 1, 4 e 7, figuras 3.12 a), d) e g), de menor espessura, (30 mm de espessura), 2, 5 e 8, figuras 3.12 b), e) e h), (40 mm de espessura) e por fim as mais espessas, 3, 6 e 9, figuras c), f) e i), de 50 mm de espessura.

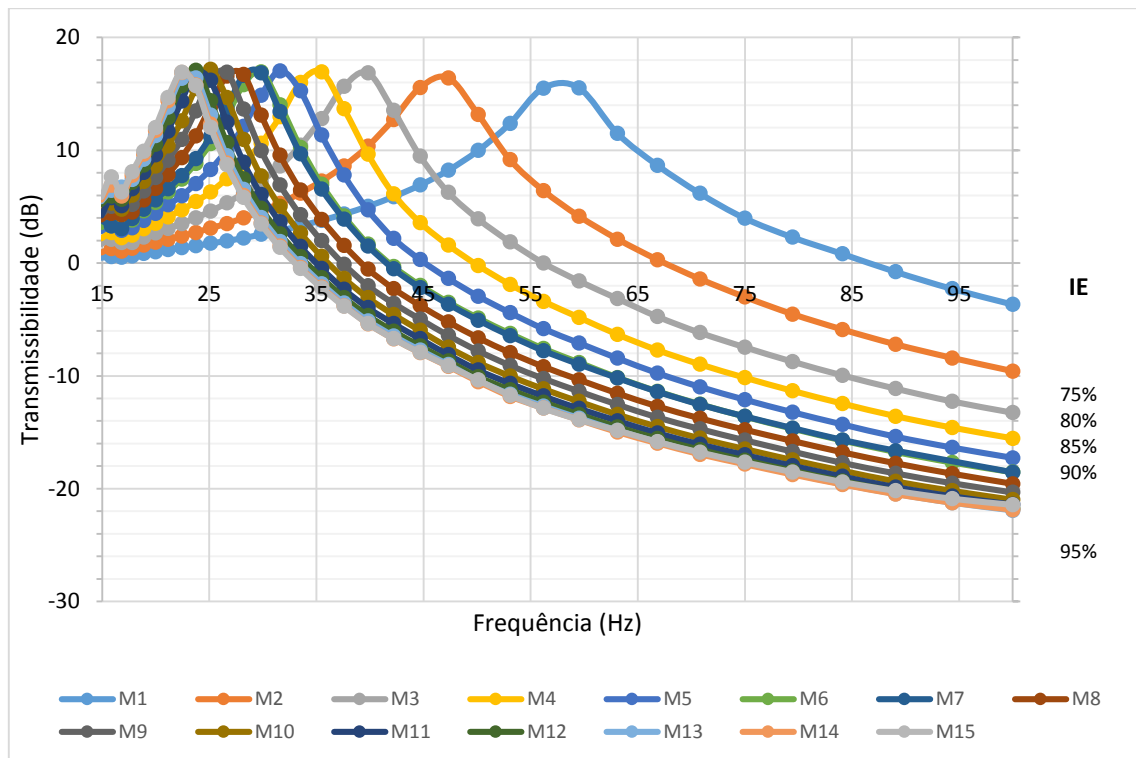
---

Relativamente às amostras 1, 4 e 7, não existem grandes diferenças no que se refere ao isolamento de vibrações na presença de carregamentos mais altos: estes sistemas garantem cerca de 90% de isolamento de vibrações, nos três casos, aos 100 Hz. No entanto, se se analisar uma curva correspondente a um determinado carregamento, verifica-se que o comportamento é dependente da massa volúmica da amostra. Por exemplo, na presença do carregamento M3 na amostra 1, (110-120 kg/m<sup>3</sup>), a curva de transmissibilidade cruza o valor nulo aos 71 Hz, garantindo no máximo cerca de -9 dB de transmissibilidade aos 100 Hz. Por outro lado, a amostra 4, (140-160 kg/m<sup>3</sup>), começa a ser eficaz apenas aos 75 Hz garantindo uma transmissibilidade, aos 100 Hz, de cerca de -7 dB. A amostra com maior massa volúmica, (170-190 kg/m<sup>3</sup>), apresenta resultados ainda piores. Verifica-se que a área de isolamento efetivo de vibrações é mais reduzida, (começa a ser eficaz aos 77 Hz e garante um mínimo de transmissibilidade, aos 100 Hz, de cerca de -6 dB).

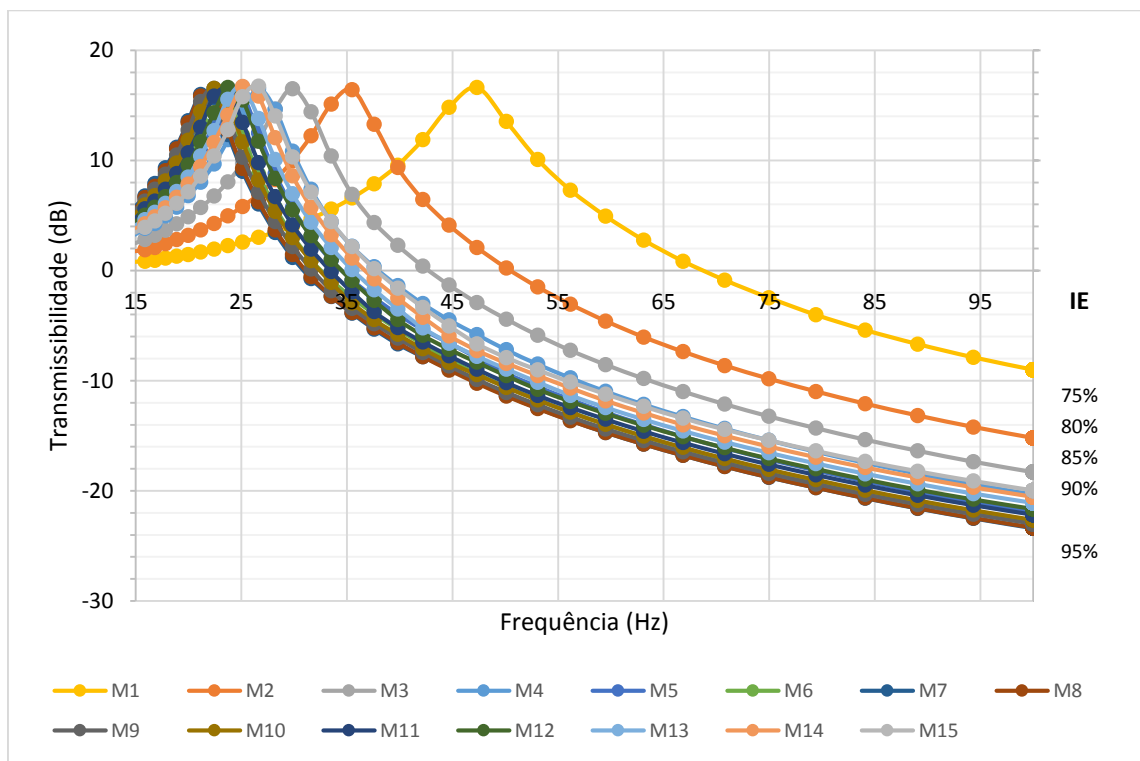
As amostras de 40 mm, (2, 5 e 8), corroboram as conclusões anteriores: os melhores resultados correspondem às amostras com menor massa volúmica. Se comparamos as curvas da amostra 2, de 110-120 kg/m<sup>3</sup>, com a amostra 5, de 140-160 kg/m<sup>3</sup>, facilmente se verifica que a amostra com menor massa volúmica apresenta melhores resultados. Para carregamentos ainda reduzidos, a amostra 2 apresenta melhores desempenhos comparativamente com a amostra 5. Por outro lado, comparando os resultados da amostra 5 com os da amostra 8, pode parecer que a amostra 8 garante um isolamento de vibrações mais eficaz nas altas frequências quando submetido a carregamentos mais elevados. Este comportamento deve-se ao facto de a amostra 5, com menor massa volúmica, sofrer deformações maiores (cerca de 4%) do que aquelas registadas pela amostra 8 (cerca de 2%).

Embora a amostra 6 nas altas frequências apresente melhores resultados que a amostra 9, (ligeiramente melhores), quando deveria ser ao contrário, se se analisar os resultados da amostra 3, de menor massa volúmica, percebe-se claramente que quanto menor é a massa volúmica da amostra melhor é o seu comportamento dinâmico. Esta amostra, (amostra 3), apresenta valores de transmissibilidade na ordem dos -27 dB, que corresponde a mais de 95% de absorção de vibrações. Por outro lado a amostra de maior massa volúmica, (amostra 9), apresenta valores de -23 dB para os 100 Hz de frequência de excitação. A amostra de valor intermédio tem como valor máximo de isolamento -22 dB. Deve dizer-se que sendo o ICB produto de um material natural obtido através de grânulos de cortiça apresenta alguma variabilidade, pelo que amostras aparentemente iguais podem conduzir a resultados ligeiramente diferentes. Possivelmente por esta razão, a amostra 9 apresenta resultados ligeiramente superiores daqueles obtidos com a amostra 6 quando a tendência seria uma melhoria das características dinâmicas com a diminuição de massa volúmica.

Como já foi referido, para além das 9 amostras com 900 cm<sup>2</sup> de área, apresentadas na figura 3.12, foi realizado um estudo para verificar a influência da área dos provetes. Foram testadas experimentalmente amostras com ½ e ¼ da área inicial, (450 cm<sup>2</sup> e 225 cm<sup>2</sup>). Os resultados obtidos para estas amostras de menor área, apresentam-se na figura seguinte.



a)



b)

Figura 3.13 - Curvas de transmissibilidade para várias massas: a) Amostra 4 ( $140\text{-}160\text{ kg/m}^3$ ,  $30\text{ mm}$  de espessura e  $450\text{ cm}^2$ ); b) Amostra 4 ( $140\text{-}160\text{ kg/m}^3$ ,  $30\text{ mm}$  de espessura e  $225\text{ cm}^2$ ).

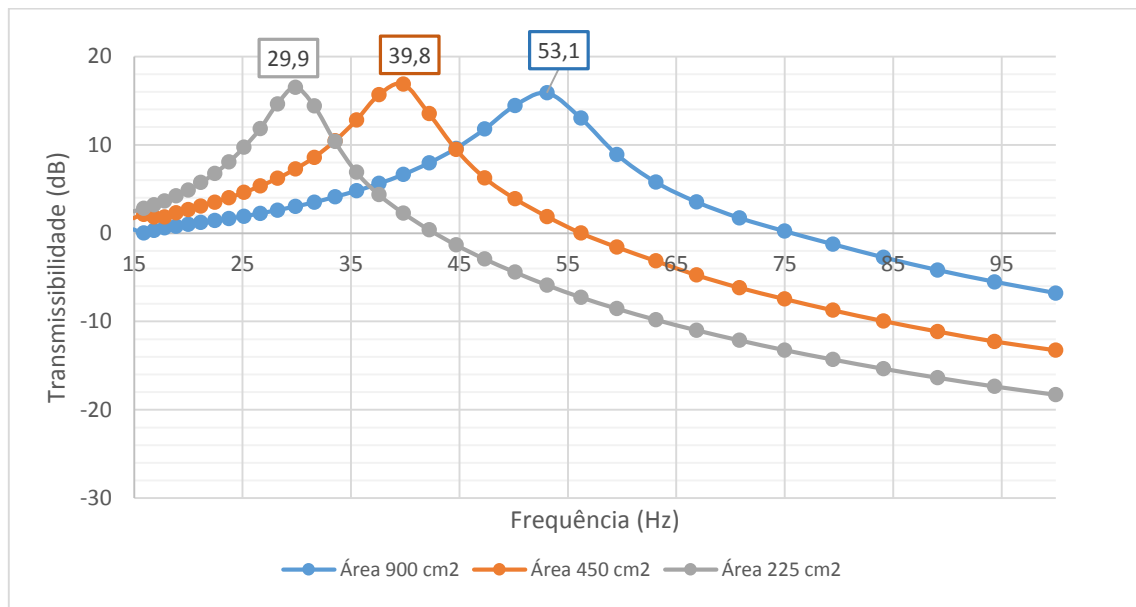
Na figura 3.13 b) é inegável o efeito da deformação do provete relativamente à transmissibilidade. As curvas de transmissibilidade denotam um pior comportamento quando o provete é submetido a cargas elevadas. Os valores de transmissibilidade correspondentes ao carregamento M15 são equivalentes aos obtidos para o carregamento M4. Este tipo de comportamento inicia-se com a oitava massa de carregamento. Ou seja, até às 8 massas a frequência natural da amostra vai diminuindo, as curvas de transmissibilidade vão-se deslocando para a esquerda e os resultados melhoram. A partir desta massa constata-se um retrocesso do comportamento com o aumento sucessivo da massa de carregamento. Esta amostra, com  $\frac{1}{4}$  da área da figura 3.12 d) está sujeita a uma tensão máxima de  $482,49\text{ kPa}$ .

Para  $\frac{1}{2}$  da área inicial, figura 3.13, a), a deformação não é tão expressiva pelo que apenas se verifica o deteriorar dos resultados para as massas mais elevadas (M14 e M15). Os valores máximos de tensão correspondentes a M14 e M15 são  $225,16\text{ kPa}$  e  $241,24\text{ kPa}$ , respetivamente. A tensão máxima para os provetes de maior área, ( $900\text{ cm}^2$ ), é de  $120,62\text{ kPa}$ .

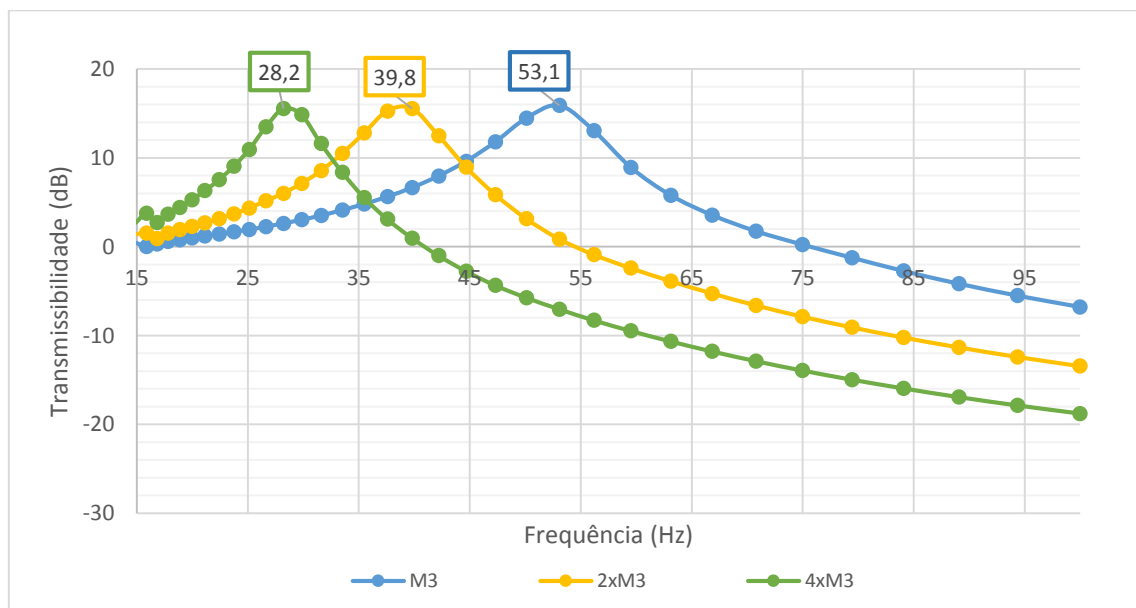


O estudo das áreas é importante não só para confirmar o efeito da deformação mas também para perceber a relação entre comportamentos na presença de provestes com áreas distintas.

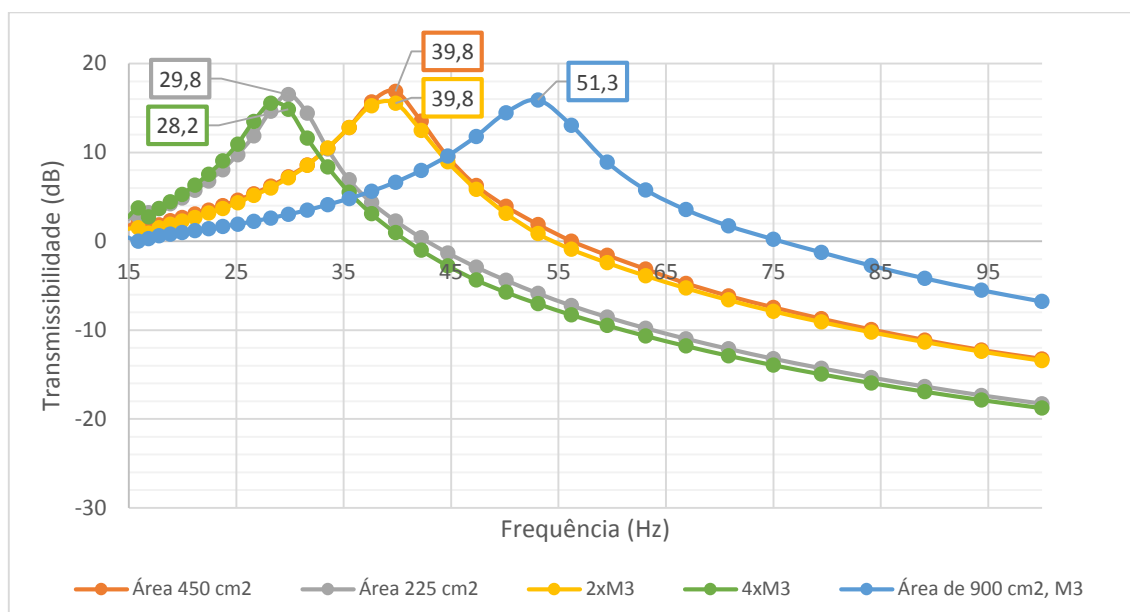
Em termos teóricos o aumento da tensão de compressão obtida com a diminuição da área é equivalente a aumentar a massa de carregamento mantendo a mesma área. Essa comparação em termos experimentais é apresentada na figura seguinte.



a)



b)



c)

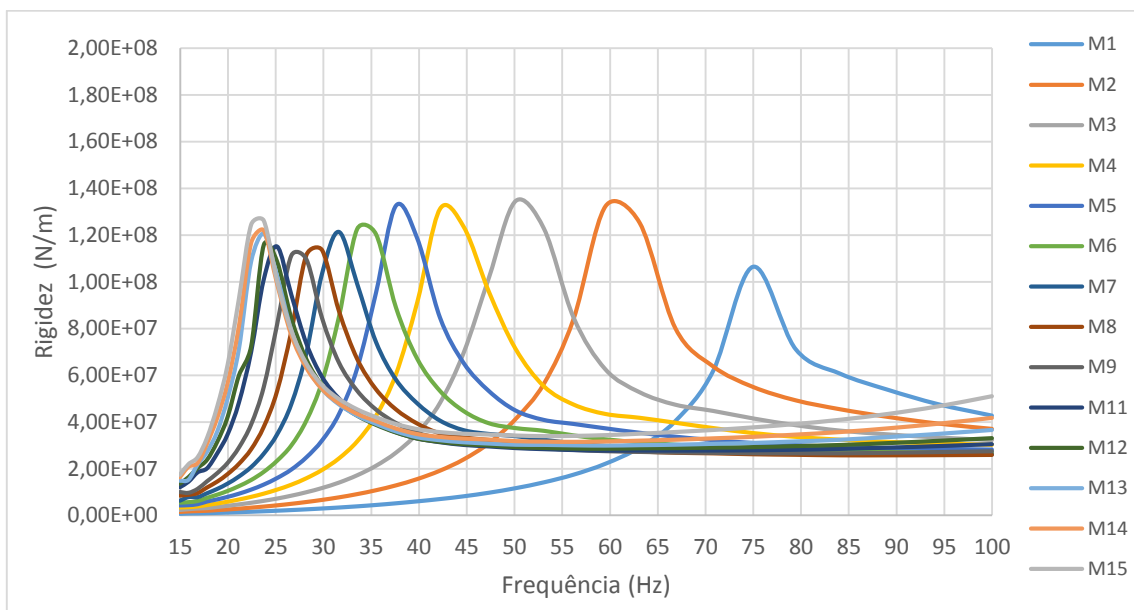
Figura 3.14 – Curvas de transmissibilidade da Amostra 4 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura): a) Massa M3, áreas de 900 cm<sup>2</sup>, 450 cm<sup>2</sup> e 225 cm<sup>2</sup>; b) Área de 900 cm<sup>2</sup>, massas M3, M6 e M12; c) sobreposição dos resultados obtidos em a) e b).

Na figura 3.14 estão identificados os valores de frequência que correspondem ao máximo valor de transmissibilidade registado. No entanto, a frequência correspondente ao pico de transmissibilidade pode não ser exatamente aquela que se apresenta. Por exemplo, quando é dito que para a área intermédia (450 cm<sup>2</sup>) a frequência natural correspondente ao carregamento M3 é 39,8 Hz, não significa que seja exatamente 39,8 Hz. O que é efetivamente correto dizer-se é que a frequência natural se encontra na vizinhança deste valor, na banda de 40 Hz, ou seja pode situar-se entre os 37,6 Hz e os 42,2 Hz. O mesmo se passa para todos os outros valores apresentados.

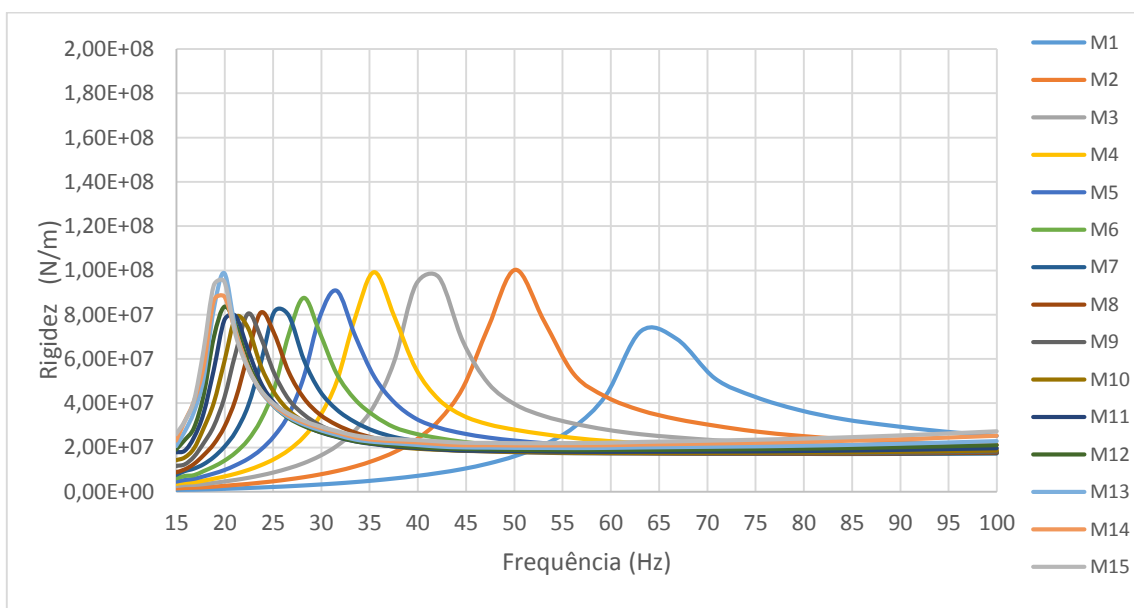
A figura 3.14 c) agrupa os resultados experimentais ilustrados nas figura 3.14, a) e b). A análise destes resultados permite verificar que o aumento da tensão de compressão obtida com a diminuição da área é equivalente a aumentar a massa de carregamento mantendo a mesma área.

### 3.4.3 Rigidez Dinâmica

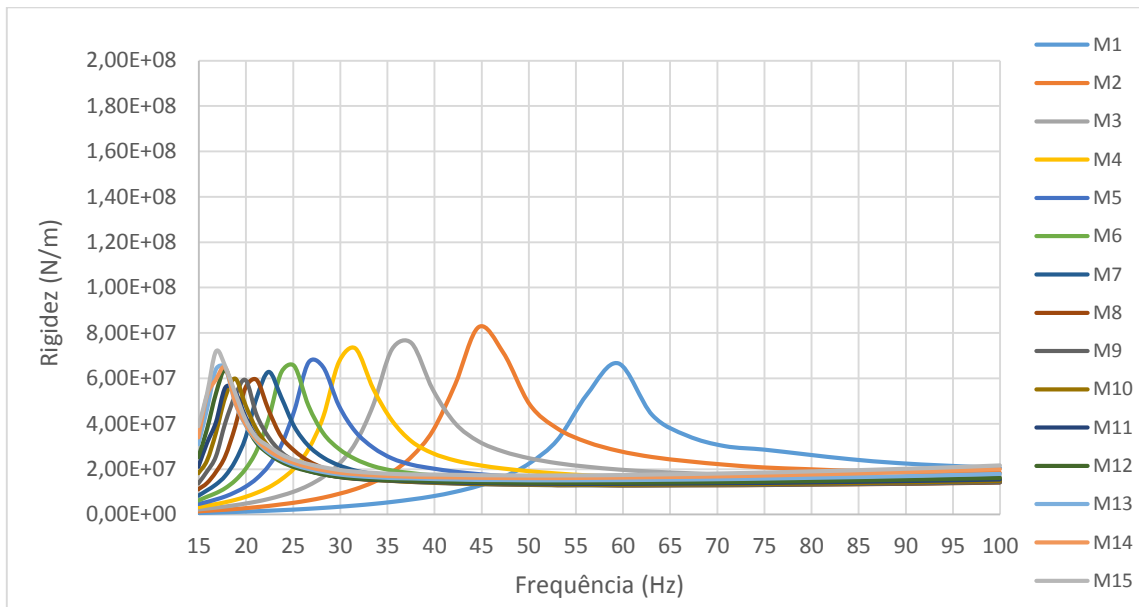
As figuras seguintes correspondem aos valores da rigidez calculados para as várias frequências de excitação, para os vários carregamentos, determinados através da equação 3.7, indicada na norma ISO 10846-3:2002. Como já se tinha referido os valores de rigidez obtidos só são válidos na zona em se regista maior isolamento.



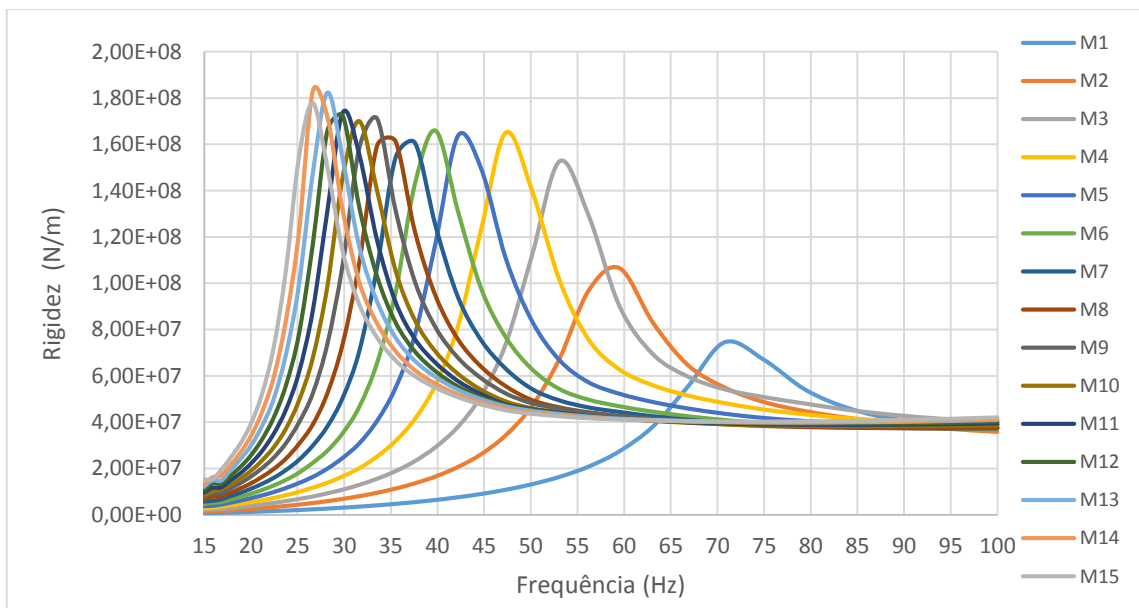
a)



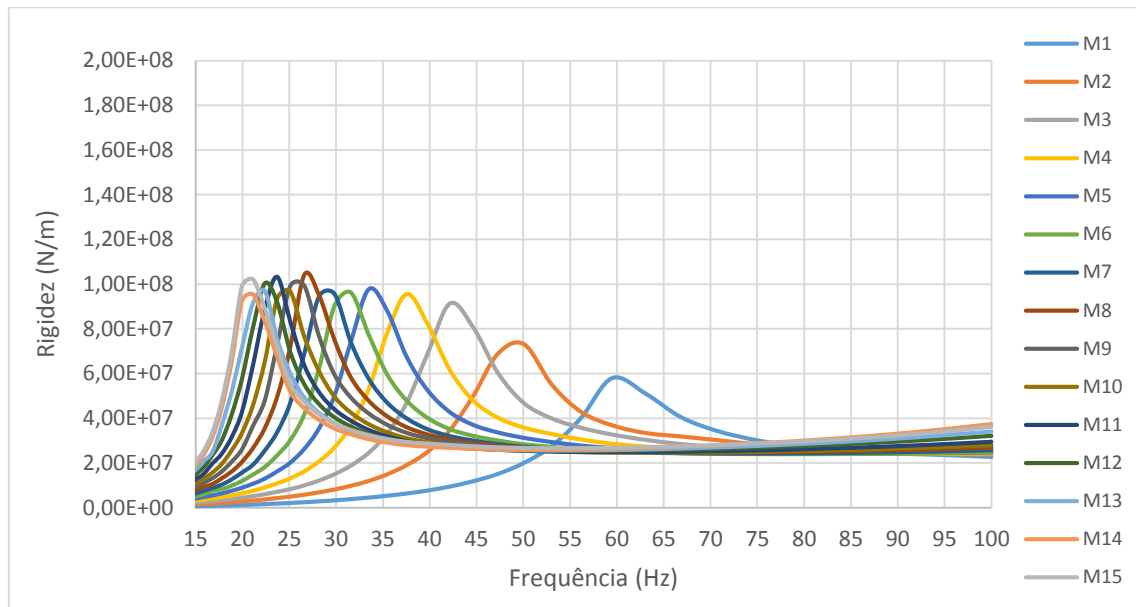
b)



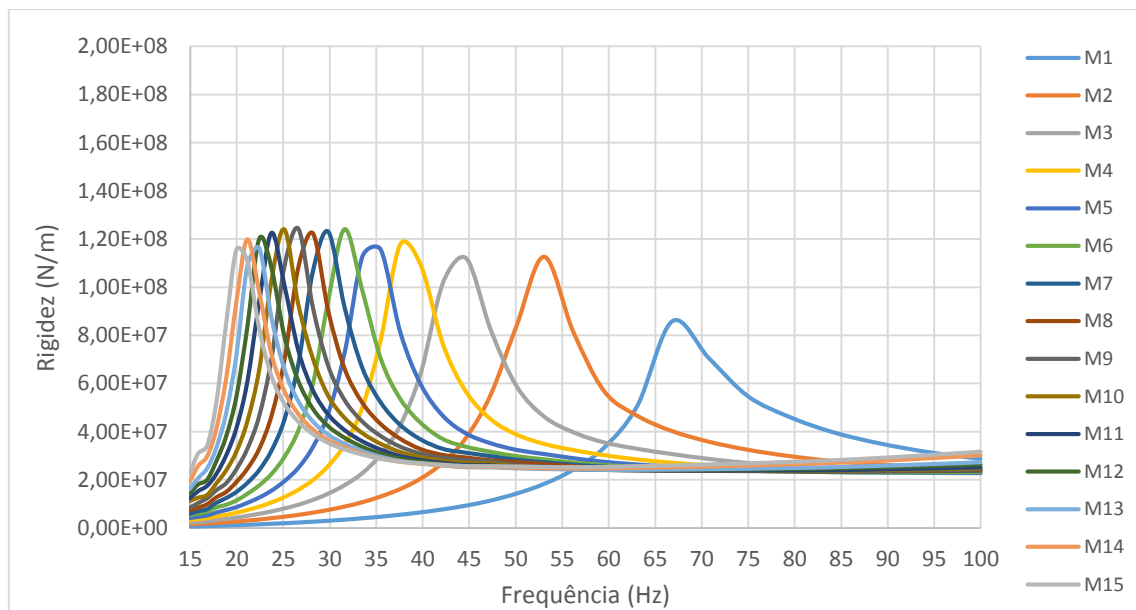
c)



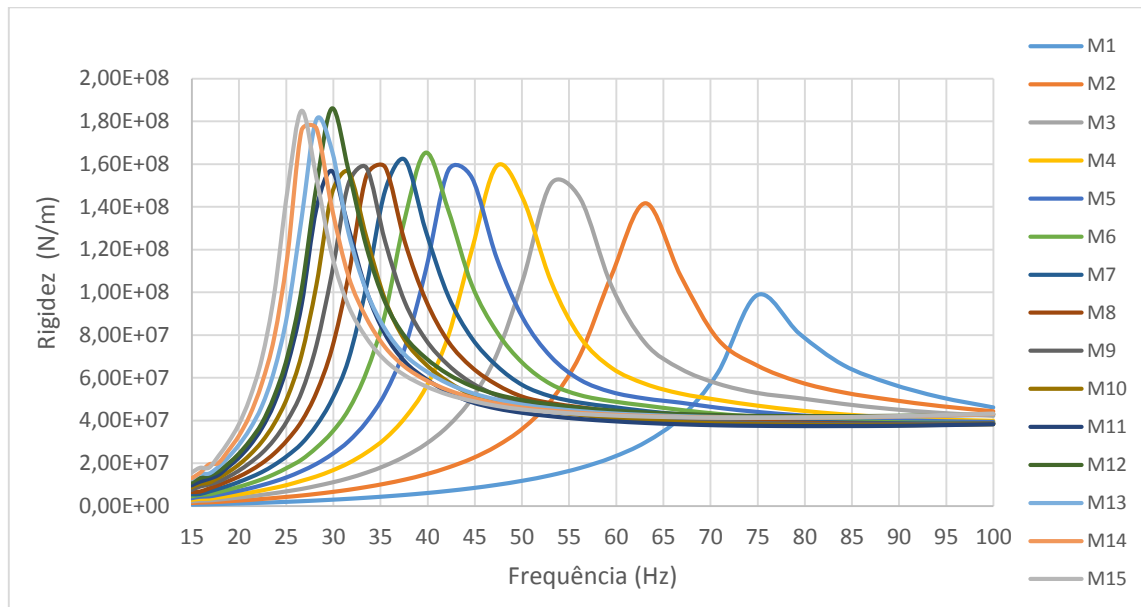
d)



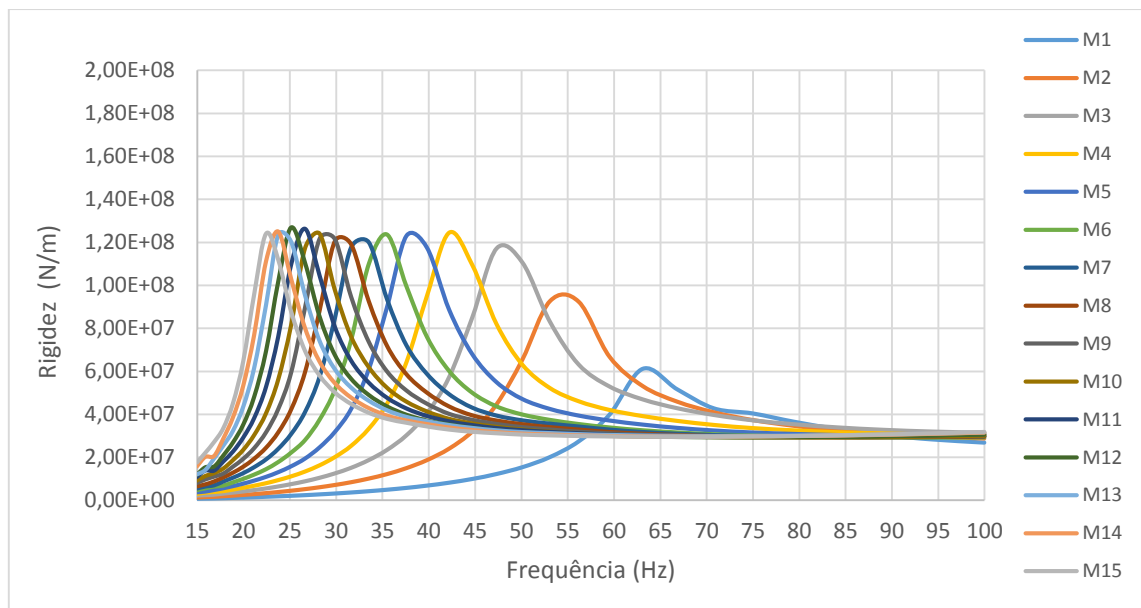
e)



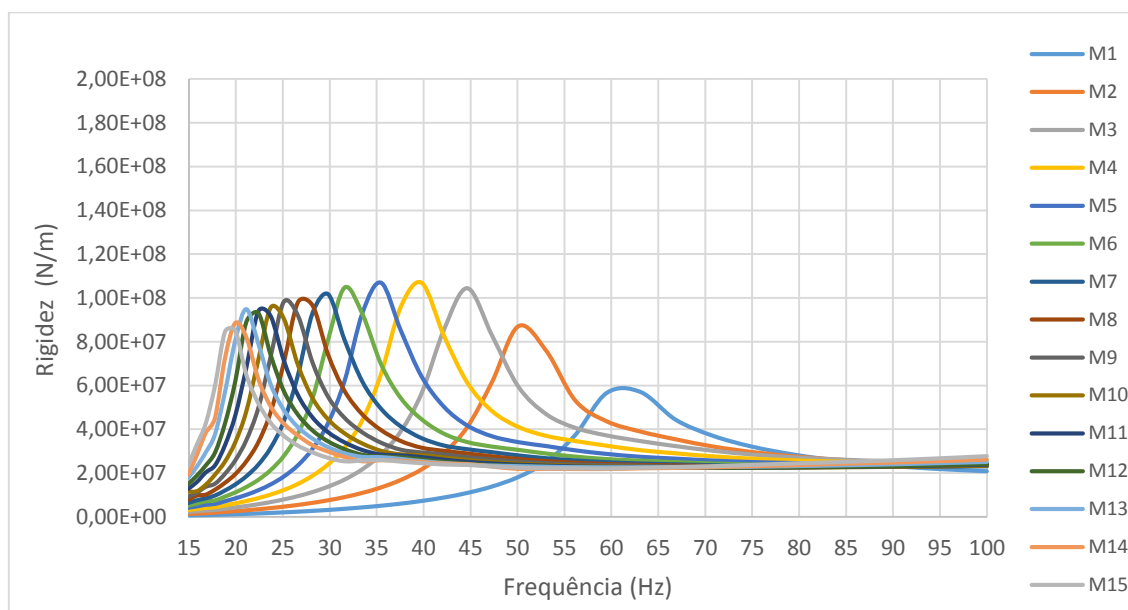
f)



g)



h)



i)

Figura 3.15 – Rigidez dinâmica para várias cargas, (amostras com 900 cm<sup>2</sup> de área): a) Amostra 1 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); b) Amostra 2 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); c) Amostra 3 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura); d) Amostra 4 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); e) Amostra 5 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); f) Amostra 6 (140-160 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura); g) Amostra 7 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 30 mm de espessura); h) Amostra 8 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 40 mm de espessura); i) Amostra 9 (170-190 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura).

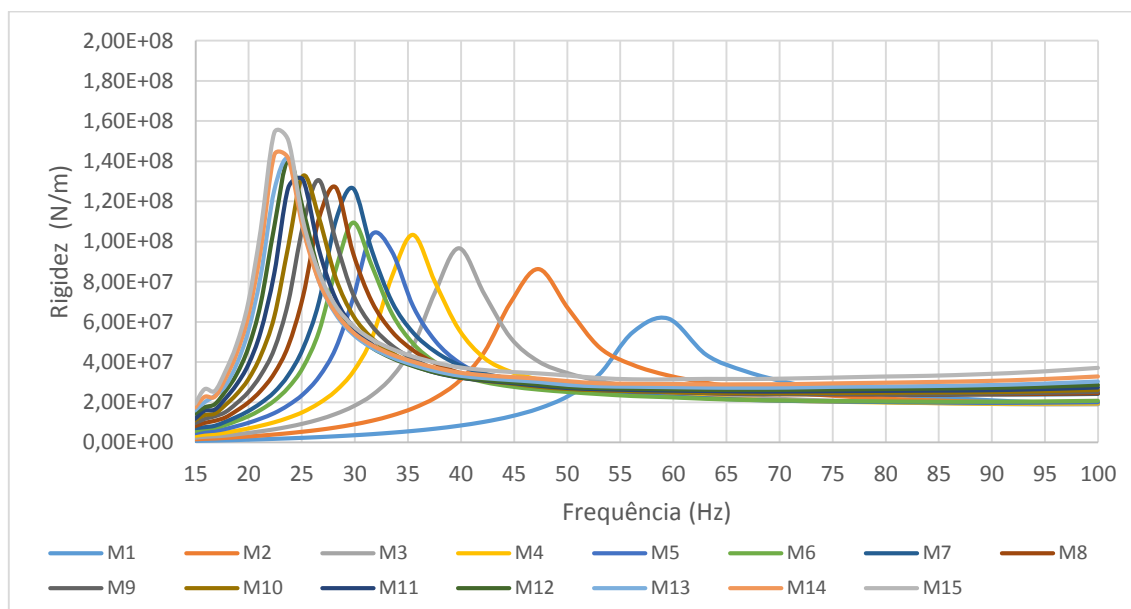
À semelhança do comportamento registado no caso da transmissibilidade, os picos das curvas vão correspondendo sucessivamente a valores de frequências naturais mais baixos à medida que a massa de carregamento aumenta. É significativa a diferença de valores obtidos para as baixas e altas frequências.

Verifica-se que para maiores frequências de excitação, ou seja quando  $|T| \ll 1$ , os valores de rigidez convergem para o mesmo valor, ou seja a rigidez deixa de variar com a frequência. Esta frequência é tanto mais baixa quanto maior for a massa de carregamento.

Observa-se que a rigidez diminui substancialmente com o aumento da espessura das amostras. Comparando em termos de espessura, ou seja analisando as amostras com igual massa volúmica, verifica-se nos três casos que a rigidez diminui com o aumento de espessura. Por outro lado, em função da massa volúmica pode concluir-se que a rigidez diminui para menores valores de massa volúmica.

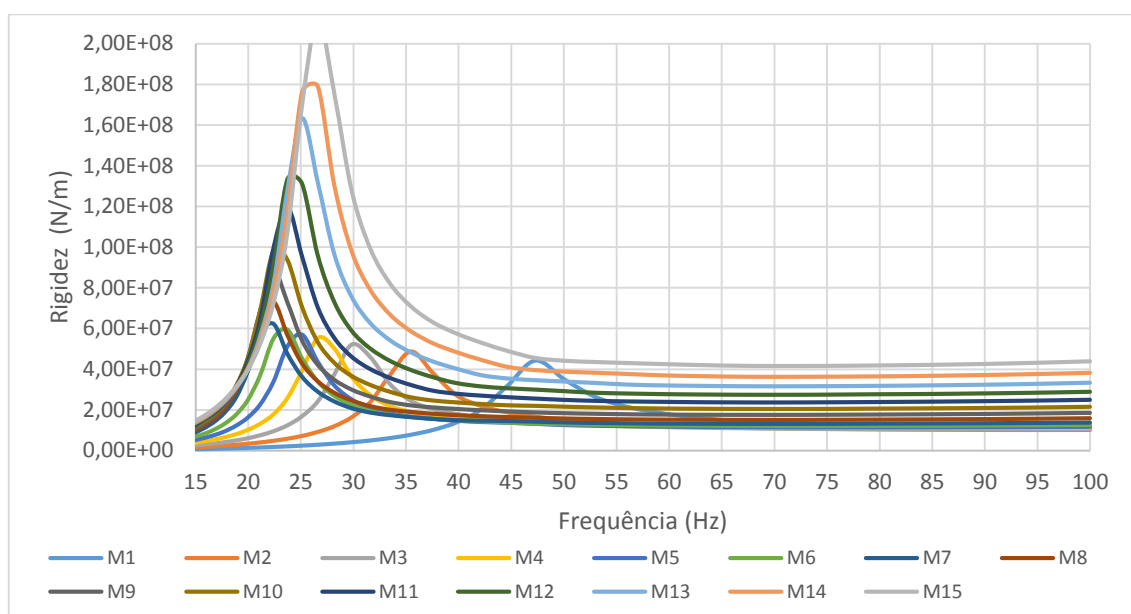
Para além destas conclusões, já espectáveis após a análise das curvas de transmissibilidade, é também interessante ver de que forma o efeito da deformação se reflete nos valores de rigidez dinâmica. A rigidez aumenta quando a deformação é considerável. Veja-se o exemplo a) da figura 3.15, as últimas curvas, correspondentes aos maiores carregamentos e conseqüentemente a maiores deformações, apresentam valores de rigidez que claramente se afastam dos valores expectáveis. Neste caso concreto para as altas frequências de excitação a rigidez já não é constante e começa a aumentar. Este fenómeno é mais evidente nas amostras de menor massa volumica. Este comportamento está associado às deformações que passam a ser muito acentuadas e que determinam o aumento da rigidez do provete.

Apresentam-se em seguida os valores obtidos para as amostras com  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{1}{4}$  da área inicial.



a)





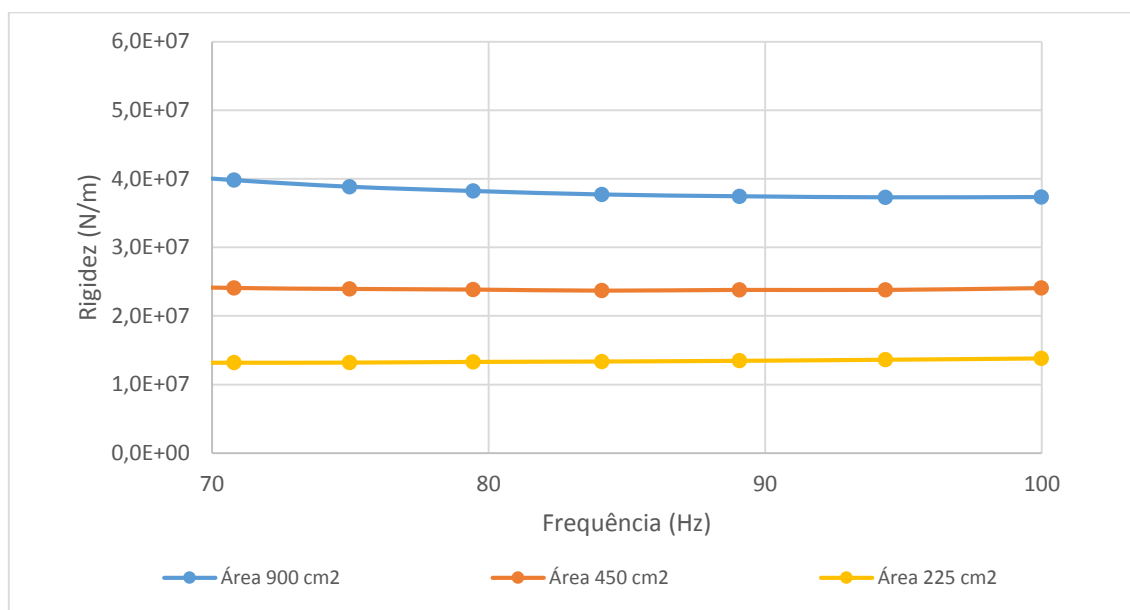
b)

Figura 3.16 - Curvas de rigidez para várias massas: a) Amostra 4 ( $140\text{-}160\text{ kg/m}^3$ , 30 mm de espessura e  $450\text{ cm}^2$ ); b) Amostra 4 ( $140\text{-}160\text{ kg/m}^3$ , 30 mm de espessura e  $225\text{ cm}^2$ ).

Os resultados da figura 3.16 a) corroboram as conclusões relativas à transmissibilidade dos resultados apresentados na figura 3.13 a). O efeito da deformação apenas altera os resultados correspondentes aos dois últimos carregamentos (M14 e M15). Para estas massas é claro o aumento de rigidez.

Pela análise da figura 3.16 b) é evidente o aumento de rigidez com o aumento de deformação dos provetes. Estes valores de rigidez advêm da deformação excessiva provocada pela compressão.

Na figura seguinte apresenta-se um gráfico para o carregamento M7, (apenas nas altas frequências ou seja quando a rigidez tende a ser constante) para as diferentes áreas consideradas.



a)

Figura 3.17 - Curvas de rigidez da amostra 4 ( $140\text{-}160\text{ kg/m}^3$ , 30 mm de espessura, submetida ao carregamento M7): a) Provetes com as áreas de  $900\text{ cm}^2$ ,  $450\text{ cm}^2$ , e  $225\text{ cm}^2$ ;

A análise desta figura permite concluir que a rigidez obtida (aplicando a equação 3.7) diminuiu quando a área diminuiu.

#### 3.4.4 Fator de Amortecimento

As figuras seguintes apresentam os fatores de amortecimento avaliados experimentalmente. Os resultados apresentados referem-se a valores médios dos ensaios realizados para os cinco carregamentos atrás definidos (M1, M4, M8, M11 e M15).

O primeiro gráfico, (figura 3.18), agrupa os resultados em termos de massas volúmicas, de modo a tentar perceber se existe alguma relação entre as diferentes espessuras e os valores do fator de amortecimento obtidos.

No segundo gráfico, (figura 3.19), agrupam-se os resultados em termos de espessuras.

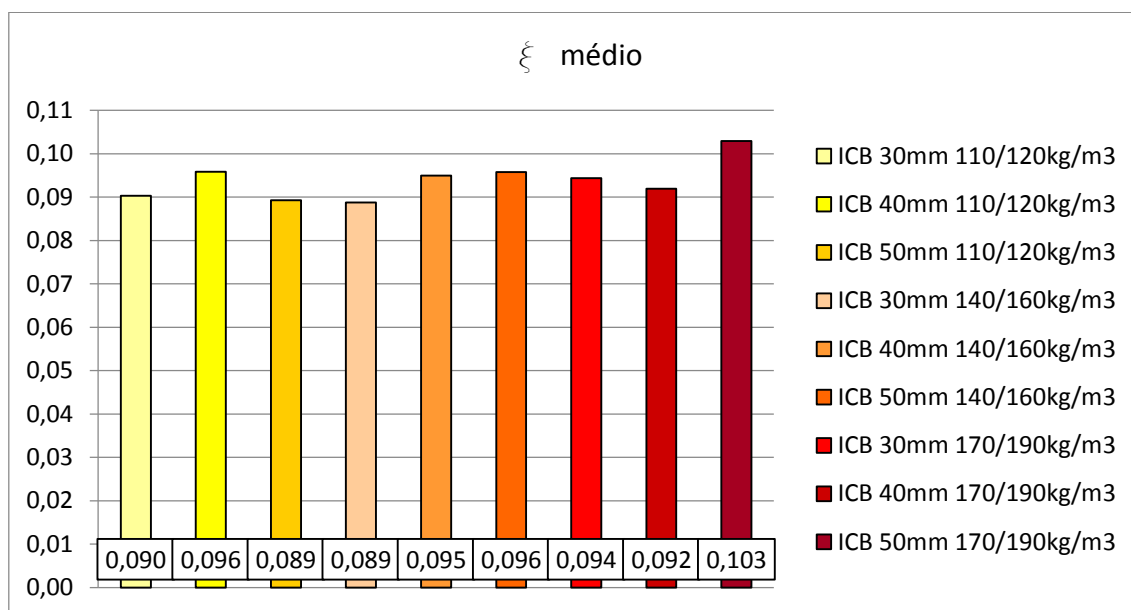


Figura 3.18 - Fator de amortecimento médio (comparação em termos de massas volúmicas).

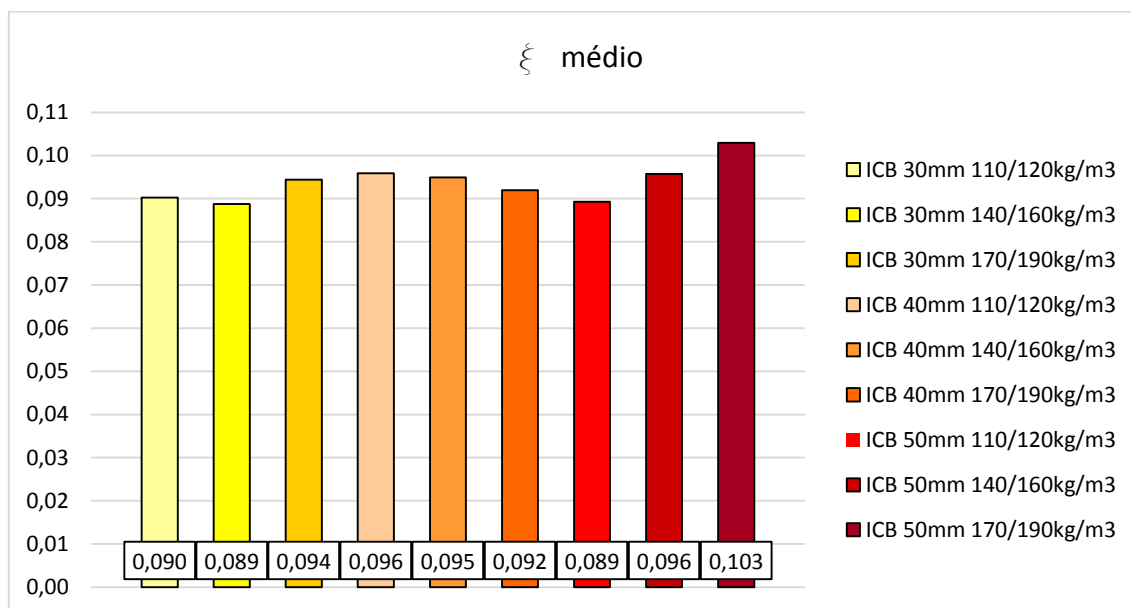


Figura 3.19 - Fator de amortecimento médio (comparação em termos de espessuras).

De um modo geral verifica-se que os fatores de amortecimento obtidos são muito próximos uns dos outros e relativamente reduzidos. A análise dos resultados não permite verificar a relação entre o fator de amortecimento e a variação da espessura e/ou da massa volúmica.

## 4 APLICAÇÕES PRÁTICAS

### 4.1 Introdução

A caracterização dinâmica do ICB permitiu verificar a possibilidade da execução de apoios antivibráticos de ICB. Neste capítulo apresentam-se um conjunto de tabelas de dimensionamento deste tipo de apoios, de modo a auxiliar a sua utilização prática.

O dimensionamento tem por base a definição prévia da gama de frequências que se pretende isolar e o nível de isolamento que se tenciona garantir. O dimensionamento terá que considerar, ainda, as dimensões e o peso do equipamento que constituiu a fonte de vibração.

A análise de resultados apresentada no capítulo 3 permitiu concluir que a massa volúmica e a espessura determinam o comportamento dinâmico dos apoios. Os melhores resultados dinâmicos estão associados à utilização de ICB com menor massa volúmica e maior espessura. Não devem, ainda, ser considerados níveis de tensão que provoquem deformações excessivas. Considera-se que o valor de deformação estática não deve ultrapassar os 5%. Contudo, a definição rigorosa deste limite requer mais estudos, os quais são excluídos do âmbito da presente dissertação.

### 4.2 Dimensionamento

Para ilustrar a forma como o dimensionamento é realizado, selecionou-se o ICB com 110-120 kg/m<sup>3</sup> de massa volúmica e 50 mm de espessura.

As curvas de transmissibilidade obtidas para a amostra 3, com 900 cm<sup>2</sup> de área, associadas a carregamentos estáticos que não ultrapassam os 5% de deformação, estão representadas na figura 4.1. As curvas correspondentes aos carregamentos M14 e M15 foram, desta forma, excluídas. Foram, ainda, retiradas as curvas com níveis de absorção de vibração inferiores a 75%. Para a amostra 3, essas curvas são relativas às massas de carregamento M1, M2 e M3 (ver figura 4.1).

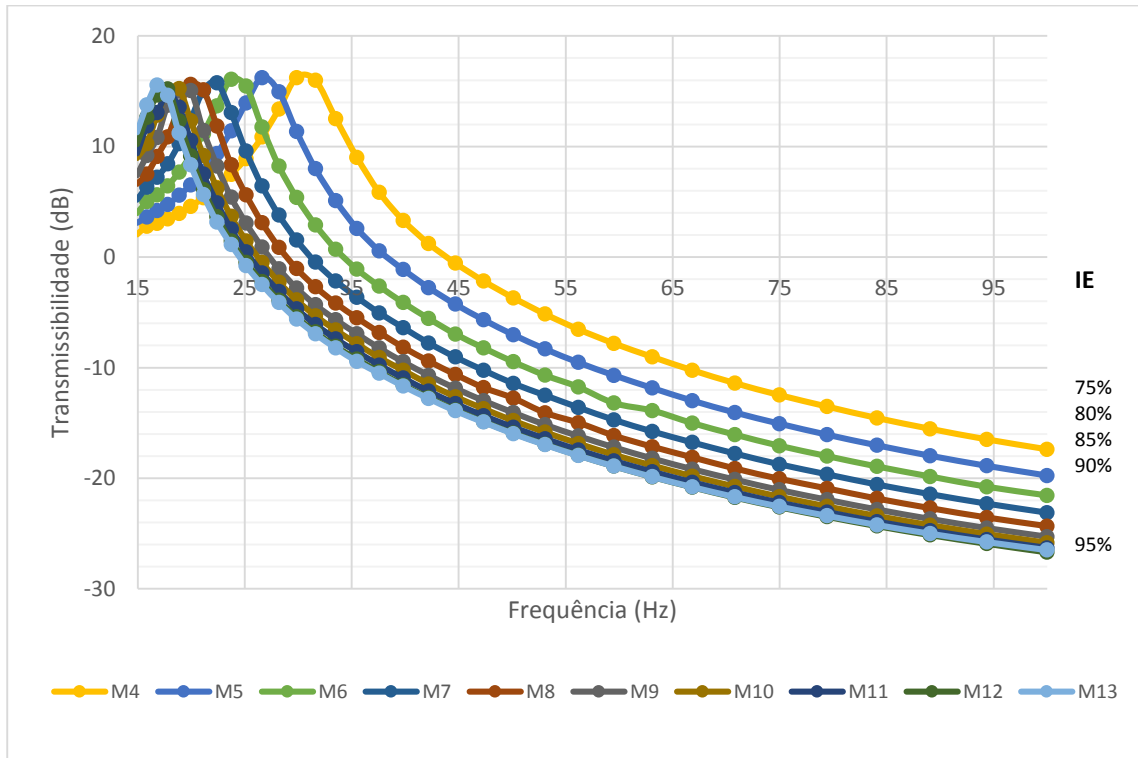


Figura 4.1 – Curvas de transmissibilidade selecionadas para dimensionamento –  
Amostra 3 (110-120 kg/m<sup>3</sup> e 50 mm de espessura).

Considere-se que se pretende isolar pelo menos 90% das vibrações numa gama de frequências dos 70 Hz aos 100 Hz (valores meramente exemplificativos. Para este efeito são escolhidas as curva de transmissibilidade (do gráfico da figura 4.1) que garantam estes requisitos (ver figura 4.2).

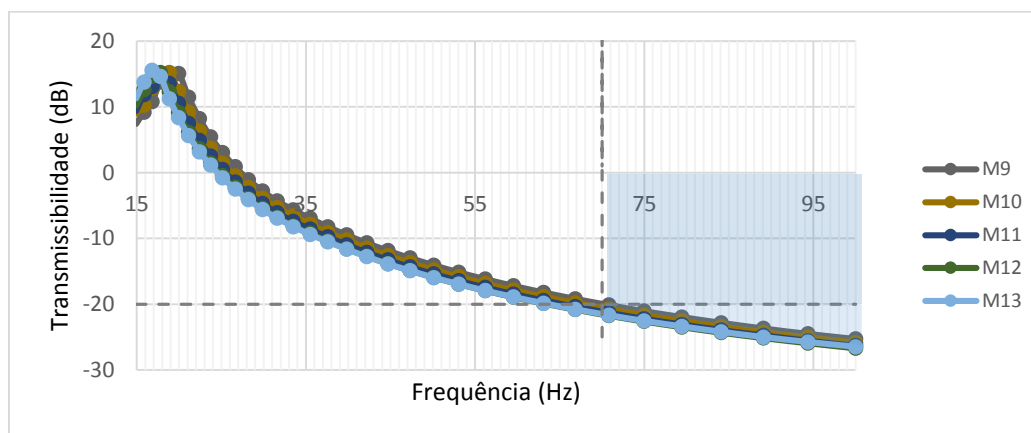


Figura 4.2 – Curvas de transmissibilidade que garantem os requisitos de isolamento previamente definidos.

Da análise da figura 4.2, depreende-se que a partir do carregamento M9 as exigências pré definidas já são garantidas. Este carregamento corresponde a uma tensão de 72,37 kPa. Sabendo-se o peso do equipamento, é definida a área máxima do apoio (ou conjunto de apoios).

$$\sigma = \frac{M \times g}{A} \quad (4.1)$$

em que:

$M$  – é a massa do equipamento (kg),

$g$  – é a aceleração gravítica, (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$A$  – área do apoio (m<sup>2</sup>)

Neste caso, assumindo o valor de 500 kg para a massa do equipamento, obtém-se uma área máxima de apoio de 677 cm<sup>2</sup>. Caso se optem por 4 apoios quadrangulares, (para os quatro cantos do equipamento), resulta em cerca de 13cm de lado, totalizando uma área de 676 cm<sup>2</sup>. Deve, contudo, limitar-se a área mínima dos apoios de modo a evitar uma deformação excessiva. Atendendo à equação determinada para a deformação provocada por uma ação de compressão (ver figura 3.11),

$$y(x) = 63,461 \ln(x) + 7,5659 \quad (4.2)$$

obtém-se, para uma deformação de 5%, uma tensão de 109,7kPa. Este valor determina um valor mínimo da área do apoio de 447 cm<sup>2</sup>.

### 4.3 Apresentação de Tabelas de Dimensionamento

Seguindo os procedimentos utilizados no exemplo anterior foram elaboradas tabelas de dimensionamento para os vários tipos de ICB testados. Destas tabelas resultam áreas máximas e mínimas (cm<sup>2</sup>) para os apoios antivibráticos. Estas tabelas foram elaboradas para equipamentos com massas que variam entre os 100 kg e os 1000 kg. Cada tabela foi realizada considerando um determinado nível de isolamento numa determinada gama de frequências. Consta também nestas tabelas o valor da deformação correspondente à área máxima, ou seja o valor mínimo de deformação.

Note-se que a numeração de 1 a 9 corresponde um tipo de amostra, sendo que, de 1 a 3 são relativos a amostras de ICB de 110-120 kg/m<sup>3</sup>, a 1 de 30 mm de espessura, a 2 de 40 mm e a 3 de 50 mm. Os valores 4, 5 e 6 correspondem a ICB de 140-160 kg/m<sup>3</sup> com espessuras de 30

mm, 40 mm e 50 mm respetivamente. Por fim, os últimos 3 números correspondem a um ICB de 170-190 kg/m<sup>3</sup> com, espessuras de 30 mm, 40 mm e 50 mm.

Tabela 4.1 - Tabelas de dimensionamento de apoios antivibráticos com um isolamento de 75%, a) gama de frequências 70 Hz -100 Hz; b) gama de frequências 80 Hz -100 Hz; c) gama de frequências 90 Hz -100 Hz.

| Isolamento de 75%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa do equipamento (kg)          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 152  |      | 305  |      | 457  |      | 609  |      | 762  | 0,73            |
| 2                                  | 89   | 244  | 179  | 487  | 268  | 731  | 357  | 975  | 447  | 1219 | 0,67            |
| 3                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,84            |
| 4                                  |      | 111  |      | 222  |      | 332  |      | 443  |      | 554  | 0,79            |
| 5                                  | 66   | 174  | 133  | 348  | 199  | 522  | 266  | 696  | 332  | 870  | 0,75            |
| 6                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,94            |
| 7                                  |      | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609  | 0,52            |
| 8                                  | 44   | 152  | 87   | 152  | 131  | 305  | 174  | 457  | 218  | 609  | 0,61            |
| 9                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,72            |

| Isolamento de 75%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa do equipamento (kg)          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 914  |      | 1066 |      | 1219 |      | 1371 |      | 1523 | 0,73            |
| 2                                  | 536  | 1462 | 625  | 1706 | 715  | 1950 | 804  | 2194 | 893  | 2437 | 0,67            |
| 3                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,84            |
| 4                                  |      | 665  |      | 776  |      | 886  |      | 997  |      | 1108 | 0,79            |
| 5                                  | 399  | 1045 | 465  | 1219 | 532  | 1393 | 598  | 1567 | 664  | 1741 | 0,75            |
| 6                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,94            |
| 7                                  |      | 731  |      | 853  |      | 975  |      | 1097 |      | 1219 | 0,52            |
| 8                                  | 261  | 762  | 305  | 914  | 348  | 1066 | 392  | 1219 | 435  | 1371 | 0,61            |
| 9                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,72            |

a)

| Isolamento de 75%                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| Massa (kg)                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
|                                    | 100              |                  | 200              |                  | 300              |                  | 400              |                  | 500              |                  | Deformação (mm) |
|                                    | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> |                 |
| 1                                  |                  | 174              |                  | 348              |                  | 522              |                  | 696              |                  | 870              | 0,65            |
| 2                                  | 89               | 244              | 179              | 487              | 268              | 731              | 357              | 975              | 447              | 1219             | 0,67            |
| 3                                  |                  | 305              |                  | 609              |                  | 914              |                  | 1219             |                  | 1523             | 0,74            |
| 4                                  |                  | 135              |                  | 271              |                  | 406              |                  | 542              |                  | 677              | 0,67            |
| 5                                  | 66               | 203              | 133              | 406              | 199              | 609              | 266              | 812              | 332              | 1016             | 0,69            |
| 6                                  |                  | 203              |                  | 406              |                  | 609              |                  | 812              |                  | 1016             | 0,86            |
| 7                                  |                  | 135              |                  | 271              |                  | 406              |                  | 542              |                  | 677              | 0,49            |
| 8                                  | 44               | 174              | 87               | 348              | 131              | 522              | 174              | 696              | 218              | 870              | 0,58            |
| 9                                  |                  | 203              |                  | 406              |                  | 609              |                  | 812              |                  | 1016             | 0,68            |

| Isolamento de 75%                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| Massa (kg)                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
|                                    | 600              |                  | 700              |                  | 800              |                  | 900              |                  | 1000             |                  | Deformação (mm) |
|                                    | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> | A <sub>min</sub> | A <sub>máx</sub> |                 |
| 1                                  |                  | 1045             |                  | 1219             |                  | 1393             |                  | 1567             |                  | 1741             | 0,65            |
| 2                                  | 536              | 1462             | 625              | 1706             | 715              | 1950             | 804              | 2194             | 893              | 2437             | 0,67            |
| 3                                  |                  | 1828             |                  | 2133             |                  | 2437             |                  | 2742             |                  | 3047             | 0,74            |
| 4                                  |                  | 812              |                  | 948              |                  | 1083             |                  | 1219             |                  | 1354             | 0,67            |
| 5                                  | 399              | 1219             | 465              | 1422             | 532              | 1625             | 598              | 1828             | 664              | 2031             | 0,69            |
| 6                                  |                  | 1219             |                  | 1422             |                  | 1625             |                  | 1828             |                  | 2031             | 0,86            |
| 7                                  |                  | 812              |                  | 948              |                  | 1083             |                  | 1219             |                  | 1354             | 0,49            |
| 8                                  | 261              | 1045             | 305              | 1219             | 348              | 1393             | 392              | 1567             | 435              | 1741             | 0,58            |
| 9                                  |                  | 1219             |                  | 1422             |                  | 1625             |                  | 1828             |                  | 2031             | 0,68            |

b)



| Isolamento de 75%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,50            |
| 2                                  | 89   | 406  | 179  | 812  | 268  | 1219 | 357  | 1625 | 447  | 2031 | 0,52            |
| 3                                  |      | 406  |      | 812  |      | 1219 |      | 1625 |      | 2031 | 0,65            |
| 4                                  |      | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016 | 0,52            |
| 5                                  | 66   | 305  | 133  | 609  | 199  | 914  | 266  | 1219 | 332  | 1523 | 0,58            |
| 6                                  |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,72            |
| 7                                  |      | 152  |      | 305  |      | 457  |      | 609  |      | 762  | 0,46            |
| 8                                  | 44   | 203  | 87   | 406  | 131  | 609  | 174  | 812  | 218  | 1016 | 0,54            |
| 9                                  |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,61            |

| Isolamento de 75%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,50            |
| 2                                  | 536  | 2437 | 625  | 2844 | 715  | 3250 | 804  | 3656 | 893  | 4062 | 0,52            |
| 3                                  |      | 2437 |      | 2844 |      | 3250 |      | 3656 |      | 4062 | 0,65            |
| 4                                  |      | 1219 |      | 1422 |      | 1625 |      | 1828 |      | 2031 | 0,52            |
| 5                                  | 399  | 1828 | 465  | 2133 | 532  | 2437 | 598  | 2742 | 664  | 3047 | 0,58            |
| 6                                  |      | 1828 |      | 2133 |      | 2437 |      | 2742 |      | 3047 | 0,72            |
| 7                                  |      | 914  |      | 1066 |      | 1219 |      | 1371 |      | 1523 | 0,46            |
| 8                                  | 261  | 1219 | 305  | 1422 | 348  | 1625 | 392  | 1828 | 435  | 2031 | 0,54            |
| 9                                  |      | 1828 |      | 2133 |      | 2437 |      | 2742 |      | 3047 | 0,61            |

c)

Tabela 4.2 - Tabelas de dimensionamento de apoios antivibráticos com um isolamento de 80%, a) gama de frequências 70 Hz -100 Hz; b) gama de frequências 80 Hz -100 Hz; c) gama de frequências 90 Hz -100 Hz.

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 94   |      | 187  |      | 281  |      | 375  |      | 469  | 1,38            |
| 2                                  | 89   | 244  | 179  | 487  | 268  | 731  | 357  | 975  | 447  | 1219 | 0,86            |
| 3                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,84            |
| 4                                  |      | 87   |      | 174  |      | 261  |      | 348  |      | 435  | 1,03            |
| 5                                  | 66   | 135  | 133  | 271  | 199  | 406  | 266  | 542  | 332  | 677  | 0,89            |
| 6                                  |      | 135  |      | 271  |      | 406  |      | 542  |      | 677  | 1,11            |
| 7                                  |      | 87   |      | 174  |      | 261  |      | 348  |      | 435  | 0,66            |
| 8                                  | 44   | 111  | 87   | 222  | 131  | 332  | 174  | 443  | 218  | 554  | 0,73            |
| 9                                  |      | 135  |      | 271  |      | 406  |      | 542  |      | 677  | 0,81            |

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 562  |      | 656  |      | 750  |      | 844  |      | 937  | 1,38            |
| 2                                  | 536  | 1462 | 625  | 1706 | 715  | 1950 | 804  | 2194 | 893  | 2437 | 0,86            |
| 3                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,84            |
| 4                                  |      | 522  |      | 609  |      | 696  |      | 783  |      | 870  | 1,03            |
| 5                                  | 399  | 812  | 465  | 948  | 532  | 1083 | 598  | 1219 | 664  | 1354 | 0,89            |
| 6                                  |      | 812  |      | 948  |      | 1083 |      | 1219 |      | 1354 | 1,11            |
| 7                                  |      | 522  |      | 609  |      | 696  |      | 783  |      | 870  | 0,66            |
| 8                                  | 261  | 665  | 305  | 776  | 348  | 886  | 392  | 997  | 435  | 1108 | 0,73            |
| 9                                  |      | 812  |      | 948  |      | 1083 |      | 1219 |      | 1354 | 0,81            |

a)

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,65            |
| 2                                  | 89   | 305  | 179  | 609  | 268  | 914  | 357  | 1219 | 447  | 1523 | 0,59            |
| 3                                  |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,74            |
| 4                                  |      | 102  |      | 203  |      | 305  |      | 406  |      | 508  | 0,87            |
| 5                                  | 66   | 174  | 133  | 348  | 199  | 522  | 266  | 696  | 332  | 870  | 0,75            |
| 6                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,94            |
| 7                                  |      | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609  | 0,52            |
| 8                                  | 44   | 152  | 87   | 305  | 131  | 457  | 174  | 609  | 218  | 762  | 0,61            |
| 9                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,72            |

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,65            |
| 2                                  | 536  | 1828 | 625  | 2133 | 715  | 2437 | 804  | 2742 | 893  | 3047 | 0,59            |
| 3                                  |      | 1828 |      | 2133 |      | 2437 |      | 2742 |      | 3047 | 0,74            |
| 4                                  |      | 609  |      | 711  |      | 812  |      | 914  |      | 1016 | 0,87            |
| 5                                  | 399  | 1045 | 465  | 1219 | 532  | 1393 | 598  | 1567 | 664  | 1741 | 0,75            |
| 6                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,94            |
| 7                                  |      | 731  |      | 853  |      | 975  |      | 1097 |      | 1219 | 0,52            |
| 8                                  | 261  | 914  | 305  | 1066 | 348  | 1219 | 392  | 1371 | 435  | 1523 | 0,61            |
| 9                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,72            |

b)

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  | 89   | 174  | 179  | 348  | 268  | 522  | 357  | 696  | 447  | 870  | 0,65            |
| 2                                  |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,59            |
| 3                                  |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,74            |
| 4                                  | 66   | 135  | 133  | 271  | 199  | 406  | 266  | 542  | 332  | 677  | 0,67            |
| 5                                  |      | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016 | 0,69            |
| 6                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,79            |
| 7                                  | 44   | 135  | 87   | 271  | 131  | 406  | 174  | 542  | 218  | 677  | 0,49            |
| 8                                  |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,58            |
| 9                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,64            |

| Isolamento de 80%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  | 536  | 1045 | 625  | 1219 | 715  | 1393 | 804  | 1567 | 893  | 1741 | 0,65            |
| 2                                  |      | 1828 |      | 2133 |      | 2437 |      | 2742 |      | 3047 | 0,59            |
| 3                                  |      | 1828 |      | 2133 |      | 2437 |      | 2742 |      | 3047 | 0,74            |
| 4                                  | 399  | 812  | 465  | 948  | 532  | 1083 | 598  | 1219 | 664  | 1354 | 0,67            |
| 5                                  |      | 1219 |      | 1422 |      | 1625 |      | 1828 |      | 2031 | 0,69            |
| 6                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,79            |
| 7                                  | 261  | 812  | 305  | 948  | 348  | 1083 | 392  | 1219 | 435  | 1354 | 0,49            |
| 8                                  |      | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741 | 0,58            |
| 9                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,64            |

c)

Tabela 4.3 - Tabelas de dimensionamento de apoios antivibráticos com um isolamento de 85%, a) gama de frequências 70 Hz -100 Hz; b) gama de frequências 80 Hz -100 Hz; c) gama de frequências 90 Hz -100 Hz.

| Isolamento de 85%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 100                                |               | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 89            | 203  | 179  | 406  | 268  | 609  | 357  | 812  | 447  | 1016            | 0,57 |
| 3                                  |               | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016            | 0,76 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | 66            | 94   | 133  | 187  | 199  | 281  | 266  | 375  | 332  | 469             | 0,95 |
| 6                                  |               | 111  |      | 222  |      | 332  |      | 443  |      | 554             | 1,06 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | 44            | 94   | 87   | 187  | 131  | 281  | 174  | 375  | 218  | 469             | 0,62 |
| 9                                  |               | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609             | 0,69 |

| Isolamento de 85%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 600                                |               | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 536           | 1219 | 625  | 1422 | 715  | 1625 | 804  | 1828 | 893  | 2031            | 0,57 |
| 3                                  |               | 1219 |      | 1422 |      | 1625 |      | 1828 |      | 2031            | 0,76 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | 399           | 562  | 465  | 656  | 532  | 750  | 598  | 844  | 664  | 937             | 0,95 |
| 6                                  |               | 665  |      | 776  |      | 886  |      | 997  |      | 1108            | 1,06 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | 261           | 562  | 305  | 656  | 348  | 750  | 392  | 844  | 435  | 937             | 0,62 |
| 9                                  |               | 731  |      | 853  |      | 975  |      | 1097 |      | 1219            | 0,69 |

a)

| Isolamento de 85%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 135  |      | 271  |      | 406  |      | 542  |      | 677  | 0,83            |
| 2                                  | 89   | 174  | 179  | 348  | 268  | 522  | 357  | 696  | 447  | 870  | 0,86            |
| 3                                  |      | 244  |      | 487  |      | 731  |      | 975  |      | 1219 | 0,84            |
| 4                                  |      | 102  |      | 203  |      | 305  |      | 406  |      | 508  | 0,87            |
| 5                                  | 66   | 135  | 133  | 271  | 199  | 406  | 266  | 542  | 332  | 677  | 0,89            |
| 6                                  |      | 152  |      | 305  |      | 457  |      | 609  |      | 762  | 1,02            |
| 7                                  |      | 87   |      | 174  |      | 261  |      | 348  |      | 435  | 0,66            |
| 8                                  | 44   | 122  | 87   | 244  | 131  | 366  | 174  | 487  | 218  | 609  | 0,69            |
| 9                                  |      | 152  |      | 305  |      | 457  |      | 609  |      | 762  | 0,77            |

| Isolamento de 85%                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |      | 812  |      | 948  |      | 1083 |      | 1219 |      | 1354 | 0,83            |
| 2                                  | 536  | 1045 | 625  | 1219 | 715  | 1393 | 804  | 1567 | 893  | 1741 | 0,86            |
| 3                                  |      | 1462 |      | 1706 |      | 1950 |      | 2194 |      | 2437 | 0,84            |
| 4                                  |      | 609  |      | 711  |      | 812  |      | 914  |      | 1016 | 0,87            |
| 5                                  | 399  | 812  | 465  | 948  | 532  | 1083 | 598  | 1219 | 664  | 1354 | 0,89            |
| 6                                  |      | 914  |      | 1066 |      | 1219 |      | 1371 |      | 1523 | 1,02            |
| 7                                  |      | 522  |      | 609  |      | 696  |      | 783  |      | 870  | 0,66            |
| 8                                  | 261  | 731  | 305  | 853  | 348  | 975  | 392  | 1097 | 435  | 1219 | 0,69            |
| 9                                  |      | 914  |      | 1066 |      | 1219 |      | 1371 |      | 1523 | 0,77            |

b)

| Isolamento de 85%                  |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    |    | 100  |      | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |
|                                    |    | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |    |      | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870  | 0,65            |
| 2                                  | 89 |      | 203  | 179  | 406  | 268  | 609  | 357  | 812  | 447  | 1016 | 0,98            |
| 3                                  |    |      | 305  |      | 609  |      | 914  |      | 1219 |      | 1523 | 0,74            |
| 4                                  |    |      | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609  | 0,73            |
| 5                                  | 66 |      | 174  | 133  | 348  | 199  | 522  | 266  | 696  | 332  | 870  | 0,75            |
| 6                                  |    |      | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016 | 0,86            |
| 7                                  |    |      | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609  | 0,52            |
| 8                                  | 44 |      | 152  | 87   | 305  | 131  | 457  | 174  | 609  | 218  | 762  | 0,61            |
| 9                                  |    |      | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016 | 0,68            |

| Isolamento de 85%                  |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
| Massa (kg)                         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |
|                                    |     | 600  |      | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |
|                                    |     | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |
| 1                                  |     |      | 1045 |      | 1219 |      | 0,65 |      | 1567 |      | 1741 | 0,65            |
| 2                                  | 536 |      | 1219 | 625  | 1422 | 715  | 0,98 | 804  | 1828 | 893  | 2031 | 0,98            |
| 3                                  |     |      | 1828 |      | 2133 |      | 0,74 |      | 2742 |      | 3047 | 0,74            |
| 4                                  |     |      | 731  |      | 853  |      | 0,73 |      | 1097 |      | 1219 | 0,73            |
| 5                                  | 399 |      | 1045 | 465  | 1219 | 532  | 0,75 | 598  | 1567 | 664  | 1741 | 0,75            |
| 6                                  |     |      | 1219 |      | 1422 |      | 0,86 |      | 1828 |      | 2031 | 0,86            |
| 7                                  |     |      | 731  |      | 853  |      | 0,52 |      | 1097 |      | 1219 | 0,52            |
| 8                                  | 261 |      | 914  | 305  | 1066 | 348  | 0,61 | 392  | 1371 | 435  | 1523 | 0,61            |
| 9                                  |     |      | 1219 |      | 1422 |      | 0,68 |      | 1828 |      | 2031 | 0,68            |

c)

Tabela 4.4 - Tabelas de dimensionamento de apoios antivibráticos com um isolamento de 90%, a) gama de frequências 70 Hz -100 Hz; b) gama de frequências 80 Hz -100 Hz; c) gama de frequências 90 Hz -100 Hz.

| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 100                                |               | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 3                                  | 89            | 135  | 179  | 271  | 268  | 406  | 357  | 542  | 447  | 677             | 1,39 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 6                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 9                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |

| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 70 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 600                                |               | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 3                                  | 536           | 812  | 625  | 948  | 715  | 1083 | 804  | 1219 | 893  | 1354            | 1,39 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 6                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 9                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |

a)



| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 100                                |               | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 89            | 122  | 179  | 244  | 268  | 366  | 357  | 487  | 447  | 609             | 1,26 |
| 3                                  |               | 174  |      | 348  |      | 522  |      | 696  |      | 870             | 1,08 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 6                                  | 66            | 87   | 133  | 174  | 199  | 261  | 266  | 348  | 332  | 435             | 1,72 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 9                                  | 44            | 102  | 87   | 203  | 131  | 305  | 174  | 406  | 218  | 508             | 0,97 |

| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 80 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 600                                |               | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 536           | 731  | 625  | 853  | 715  | 975  | 804  | 1097 | 893  | 1219            | 1,26 |
| 3                                  |               | 1045 |      | 1219 |      | 1393 |      | 1567 |      | 1741            | 1,08 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 6                                  | 399           | 522  | 465  | 609  | 532  | 696  | 598  | 783  | 664  | 870             | 1,72 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 9                                  | 261           | 609  | 305  | 711  | 348  | 812  | 392  | 914  | 435  | 1016            | 0,97 |

b)

| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 100                                |               | 200  |      | 300  |      | 400  |      | 500  |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 89            | 152  | 179  | 305  | 268  | 457  | 357  | 609  | 447  | 762             | 0,98 |
| 3                                  |               | 203  |      | 406  |      | 609  |      | 812  |      | 1016            | 0,95 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | 66            | 87   | 133  | 174  | 199  | 261  | 266  | 348  | 332  | 435             | 1,37 |
| 6                                  |               | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609             | 1,21 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | 44            | 94   | 87   | 187  | 131  | 281  | 174  | 375  | 218  | 469             | 0,82 |
| 9                                  |               | 122  |      | 244  |      | 366  |      | 487  |      | 609             | 0,86 |

| Isolamento de 90%                  |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| Gama de frequências 90 Hz - 100 Hz |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| Massa (kg)                         |               |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 600                                |               | 700  |      | 800  |      | 900  |      | 1000 |      | Deformação (mm) |      |
| Amin                               | Amáx          | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx | Amin | Amáx |                 |      |
| 1                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 2                                  | 536           | 914  | 625  | 1066 | 715  | 1219 | 804  | 1371 | 893  | 1523            | 0,98 |
| 3                                  |               | 1219 |      | 1422 |      | 1625 |      | 1828 |      | 2031            | 0,95 |
| 4                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 5                                  | 399           | 522  | 465  | 609  | 532  | 696  | 598  | 783  | 664  | 870             | 1,37 |
| 6                                  |               | 731  |      | 853  |      | 975  |      | 1097 |      | 1219            | 1,21 |
| 7                                  | Não aplicável |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |      |
| 8                                  | 261           | 562  | 305  | 656  | 348  | 750  | 392  | 844  | 435  | 937             | 0,82 |
| 9                                  |               | 731  |      | 853  |      | 975  |      | 1097 |      | 1219            | 0,86 |

c)

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Considerações Finais

A presente dissertação avaliou, de forma experimental, a utilização de ICB na execução de apoios anti vibráteis. Para este efeito procedeu-se à caracterização dinâmica deste material. O estudo permitiu aferir de que modo a espessura, a massa volúmica e a área do material influenciam o seu comportamento dinâmico.

Os ensaios dinâmicos realizados permitiram concluir que provetes com menor massa volúmica e maior espessura apresentavam melhores características anti vibráteis. No entanto, os ensaios realizados permitiram concluir que as cargas utilizadas não devem conduzir a deformações exageradas (superiores a 5% quando submetidas a carregamento estático). Os ensaios de compressão realizados permitiram, ainda, concluir que o ICB apresenta um comportamento não linear quando carregado.

Os resultados obtidos permitiram concluir que o ICB é um material adequado para o isolamento de vibrações, tendo-se proposto, para este efeito, um conjunto de tabelas de dimensionamento.

A presente investigação científica contribuiu para alargar o leque de aplicações e potencialidades do ICB. Considera-se que o ICB pode mesmo vir a ser utilizado e comercializado no fabrico de apoios anti vibráteis. Contudo, julga-se ser prudente estudar o comportamento do ICB após carregamento prolongado.

### 5.2 Trabalhos Futuros

Perante os estudos agora terminados considera-se pertinente prosseguir a investigação científica nesta área. Deverá para este efeito alargar-se a gama de frequências testadas (até cerca dos 200 Hz).

Revela-se também importante estudar os efeitos de fluência do ICB, quando submetido a carregamento prolongado, no seu comportamento dinâmico. Embora não tenham sido

apresentados resultados, no âmbito desta dissertação, verificou-se que o carregamento prolongado conduzia a aumentos de rigidez e consequentemente a uma perda da capacidade de isolamento de vibrações.

Será, ainda necessário estudar o comportamento deste tipo de apoios quando submetidos a prolongados ciclos de carga, ou seja a sua durabilidade.

---

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clough, R., & Penzien, J. (1995). *Dynamics of structures* (third ed.). Berkeley, United States of America: Computers & Structures, Inc.

Costa, M. d. (2011). Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça. *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil*. Coimbra.

EN ISO 10846. (2002). *Acoustics and vibration - Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements: Part 3: Indirect method for determination of the dynamic stiffness of resilient supports of translatory motion* .

EN ISO 10846. (2008). *Acoustics and vibration - Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements; Part 2: Direct method for determination of the dynamic stiffness of resilient supports for translatory motion*.

EN ISO 10846. (2008). *Acoustics and vibration - Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements: Part 1: Principles and guidelines*.

Gonçalves, J. G. (2013). Dissertação de Mestrado. *Caracterização da rigidez dinâmica de apoios anti-vibráteis - metodologias e equipamento*. Universidade de Coimbra.

Jardin, R., Fernandes, F., Pereira, A., & Alves de Sousa, R. (2015). Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials and Design*, 121-126.

Maes, J., Sol, H., & Guillaume, P. (2006). Measurements of the dynamic railpad properties. *Journal of Sound and Vibration*, 557-565.

NP EN 826. (1996). *Determinação do comportamento à compressão de produtos de isolamento térmico*.

Richards, C. M., & Singh, R. (2001). Characterization of rubber isolator nonlinearities in the context of single-andmulti-degree-of-freedom experimental systems. *Journal of Sound and Vibration*, 807-834.

- Silva, J. M., & Maia, N. (s.d.). *Sebenta de vibrações e ruído*. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Tadeu, A., António, J., Pedro, F., & Dias, S. (2014). Caracterização de apoios antivibráteis de cortiça. *IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA*. Valdivia, Chile.
- Thompson, D., Vliet, W., & Verheij, J. (1998). Developments of the indirect method. *Journal of Sound and Vibration*, 169-188.
- Xiao, Z., & Xingjian, J. (2012). The transmissibility of vibration isolators with cubic nonlinear. *Journal of Sound and Vibration*, 1336-1354.